

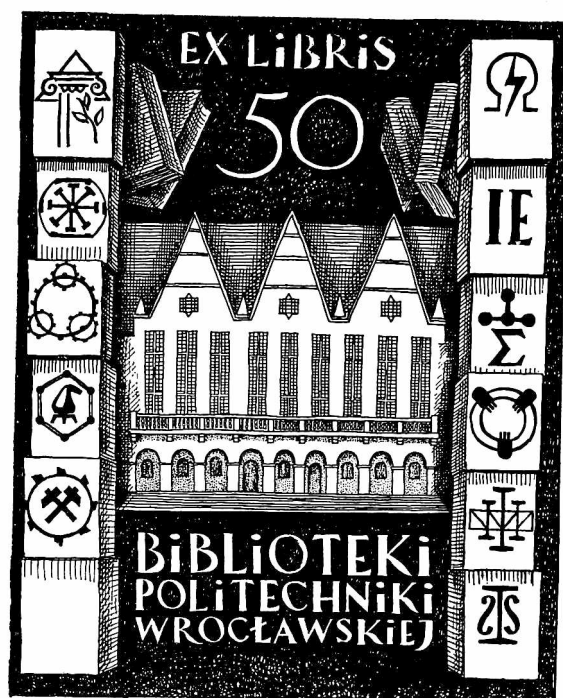
*BIBLIOTEKA KOMPATYBILNOŚCI
ELEKTROMAGNETYCZNEJ*



RYSZARD J. ZIELIŃSKI

**KOMPATYBILNOŚĆ
ELEKTROMAGNETYCZNA
W TELEKOMUNIKACJI SATELITARNEJ**

EMC



**KOMPATYBILNOŚĆ
ELEKTROMAGNETYCZNA
W TELEKOMUNIKACJI SATELITARNEJ**

RYSZARD J. ZIELIŃSKI

**KOMPATYBILNOŚĆ
ELEKTROMAGNETYCZNA
W TELEKOMUNIKACJI SATELITARNEJ**



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
WROCLAW 1999

**Instytut Telekomunikacji i Akustyki
Politechniki Wrocławskiej**

RECENZENCI

Daniel Józef Bem

Władysław Kołosowski

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Alicja Kordas

KOREKTA

Zofia Jasina



301993 W / 3

© Copyright by Oficyna Wydawnicza
Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999

**OFICYNA WYDAWNICZA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 53-370 Wrocław

ISBN 83-7085-453-2

Biblioteka Główna i OIINT
Politechniki Wrocławskiej



001246554

Ark. wyd. 17,5. Ark. druk. 16³/8.
Papier offset. kl. III, 80 g, B1.
Drukarnia Oficyny Wydawniczej
Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 990/99.

Zapewnienie kompatybilności elektromagnetycznej, czyli harmonijnego współistnienia urządzeń w środowisku elektromagnetycznym, polegającego na osiągnięciu stanu, w którym rozpatrywany obiekt w minimalnym stopniu wpływa degradująco na środowisko elektromagnetyczne i równocześnie środowisko to w znikomym stopniu oddziałując na pracę obiektu, jest podstawowym wymaganiem.

W odniesieniu do systemów radiokomunikacyjnych spełnienie warunku kompatybilności elektromagnetycznej jest trudniejsze do spełnienia, gdyż systemy te w sposób zamierzony stanowią źródło promieniowania elektromagnetycznego. Promieniowaniu energii pożądanej (przenoszącej użyteczną informację w określonym pasmie częstotliwości do określonego obszaru przestrzeni) towarzyszą zawsze efekty uboczne związane z tzw. promieniowaniami ubocznymi (emisje pozapasmowe) oraz przenikaniem promieniowania do obszarów niepożądanych. Ze względu na bardzo szybkie wdrażanie nowych systemów oraz ograniczenia w możliwości korzystania z nowych pasm, warunków kompatybilności elektromagnetycznej jest coraz trudniej spełnić. Szczegółowe znaczenie ma kompatybilność elektromagnetyczna w systemach satelitarnych, które z racji swoich właściwości mogą obsługiwać duże obszary Ziemi i powodować różnego rodzaju zaburzenia w działaniu innych systemów satelitarnych i naziemnych.

Omówiono zagadnienia kompatybilności elektromagnetycznej w telekomunikacji satelitarnej, ze szczególnym uwzględnieniem nowo opracowanych systemów stosujących małe terminale naziemne VSAT i SNG. Analizowano większość zagadnień związanych z pracą naziemnych terminali satelitarnych, z uwzględnieniem aspektów systemowych i urządzeńowych. Aspekty systemowe obejmują metody analizy kompatybilności wewnętrznej oraz kompatybilności zewnętrznej w stosunku do naziemnych systemów łączności i systemów lotniczych. Opracowane modele matematyczne opierają się na międzynarodowych, a także krajowych normach ETSI. Aspekty użytkowe dotyczą wymagań nakładanych na terminale satelitarne oraz sposobów ich pomiaru i oceny. Pomiędzy innymi omówiono parametry związane z kompatybilną pracą systemów w orbicie, stanowiące zupełnie odrębne zagadnienie.

SPIS RZECZY

Wykaz skrótów.....	9
Wykaz oznaczeń.....	12
1. Wstęp.....	14
1.1. Definicja stacji satelitarnej (terminalu) VSAT.....	16
1.2. Architektura systemów VSAT.....	19
1.2.1. Architektura gwiazdy.....	19
1.2.2. Architektura kraty.....	21
1.2.3. Architektura typu punkt–punkt.....	22
2. Terminologia, definicje i jednostki.....	24
2.1. Definicje zgodne z regulaminem radiokomunikacyjnym (RR).....	24
2.2. Definicje zgodne ze standardami ETSI.....	26
2.3. Jednostki mocy.....	26
2.4. Zalecenia i raporty ITU.....	27
3. Zakłócenia – klasyfikacja, efekty i dopuszczalne poziomy.....	28
3.1. Efekty wywoływane przez promieniowanie uboczne w stacjach odbiorczych i maksymalne dopuszczalne zakłócenia na wejściu odbiornika.....	28
3.2. Źródła promieniowania ubocznego.....	33
3.2.1. Potencjalne źródła promieniowania ubocznego.....	33
3.2.2. Parametry określające promieniowanie uboczne.....	34
3.2.3. Promieniowanie w głównej wiązce anteny naziemnej stacji satelitarnej.....	36
4. Modele interferencyjne.....	37
4.1. Podstawowe parametry modelu.....	37
4.1.1. Charakterystyka stacji zakłócanej.....	37
4.1.2. Charakterystyka stacji zakłócającej.....	39
4.1.3. Propagacja.....	44
4.2. Model ITU.....	45
4.3. Model probabilistyczny.....	45
4.3.1. Określenie dopuszczalnego poziomu zakłóceń.....	45
4.4. Model deterministyczny.....	47
4.4.1. Mechanizm interferencji.....	48
4.4.2. Stacja zakłócająca.....	48
4.4.3. Stacja zakłócana.....	48
4.4.4. Poziom zakłóceń na wejściu niskoszumnego wzmacniacza.....	50
4.4.5. Przykładowe wyniki symulacji uzyskane za pomocą modelu deterministycznego.....	51
4.4.6. Zakłócanie stacji linii radiowych.....	52
4.5. Wpływ wielu stacji zakłócających na naziemną stację zakłócającą z małą anteną VSAT.....	54
4.5.1. Mechanizm interferencji.....	54
4.5.2. Stacje zakłócające.....	54
4.5.3. Stacja zakłócana.....	55

4.5.4. Wyniki symulacji	57
4.5.5. Efekt oddziaływania sygnałów zakłócających z wielu stacji VSAT	60
4.6. Porównanie modeli dla promieniowania ubocznego	61
5. Parametry elektryczne stacji satelitarnej (terminalu) VSAT	62
5.1. Przykłady parametrów stacji satelitarnych VSAT	62
5.2. Podstawowe parametry stacji VSAT stosowane w analizie kompatybilności	63
5.2.1. Parametry stacji VSAT spełniającej normy ETSI	64
5.2.2. Parametry stacji VSAT nie badanej na zgodność z normą ETSI	64
6. Dopuszczalne poziomy promieniowania ubocznego w funkcji odległości	66
7. Określenie odległości koordynacyjnej dla promieniowania w pasmie użytecznym poza obszarem pożądanym	69
7.1. Stacja zakłócająca – model źródła zakłócenia	69
7.2. Model propagacyjny	70
7.3. Stacja zakłócana	70
7.4. Wyniki symulacji	71
7.5. Dobór zakresów częstotliwości	71
8. Metodyka postępowania w przypadku wystąpienia zakłócenia	76
9. Analiza norm związanych z emisyjnością naziemnych stacji satelitarnych VSAT	78
9.1. Normy ITU związane z określeniem parametrów technicznych terminali VSAT	78
9.1.1. Graniczne poziomy zakłóceń radioelektrycznych w pasmie 30–1000 MHz	79
9.1.2. Promieniowanie uboczne w obszarze niepożądanym poza pasmem pracy	80
9.1.3. Promieniowanie uboczne w obszarze promieniowania pożądanego poza pasmem promieniowania pożądanego	81
9.1.4. Dyskryminacja polaryzacji	82
9.1.5. Promieniowanie pożądanego poza obszarem promieniowania pożądanego	83
9.2. Parametry kompatybilnościowe naziemnych stacji satelitarnych VSAT wymagane przez EUTELSAT	84
9.2.1. Charakterystyka promieniowania anteny nadawczej	85
9.2.2. EIRP promieniowania ubocznego poza pasmem użytecznym w obszarze promieniowania pożądanego	86
9.2.3. EIRP promieniowania ubocznego poza pasmem użytecznym w obszarze promieniowania niepożądanego	87
9.2.4. Dyskryminacja polaryzacji	88
9.3. Parametry kompatybilnościowe naziemnych stacji satelitarnych VSAT wymagane przez FCC	89
10. Koordynacja międzynarodowa	93
10.1. Wyznaczanie obszaru koordynacyjnego zgodnie z zaleceniem IS.847-1	94
10.1.1. Wstępne założenia	96
10.1.2. Kontury pomocnicze	100
10.1.3. Kontury dodatkowe	100
10.1.4. Określenie odległości koordynacyjnej przy propagacji ortodromowej (mod 1)	100
10.1.5. Procedura wyznaczania odległości koordynacyjnej przy propagacji ortodromowej (mod 1)	101
10.1.6. Maksymalna odległość koordynacyjna dla propagacji ortodromowej (mod 1) ..	107

10.1.7. Określenie odległości koordynacyjnej przy propagacji przez rozpraszanie na hydrometeorach	107
10.1.8. Minimalna odległość koordynacyjna i kontur koordynacyjny	112
10.2. Wyznaczanie obszaru koordynacyjnego wokół nadawczej naziemnej stacji satelitarnej pracującej w pasmach częstotliwości przypisanych dla dwukierunkowej łączności	113
10.3. Wyznaczanie obszaru koordynacyjnego wokół nadawczej naziemnej stacji satelitarnej pracującej w pasmach częstotliwości wspólnych z systemami naziemnymi i współpracującej z niegeostacjonarnymi satelitami.....	119
10.3.1. Metody statystyczne	122
10.3.2. Metoda TIG	123
10.4. Obszary koordynacyjne dla satelitarnych służb ruchowych.....	124
11. Metody pomiaru emisyjności naziemnych stacji satelitarnych VSAT	128
11.1. Stanowiska pomiarowe	128
11.1.1. Wolna przestrzeń – pomiar w polu dalekim	129
11.1.2. Komora bezodbiciowa.....	130
11.1.3. Otwarta przestrzeń (wolna półprzestrzeń)	134
11.1.4. Antena kompaktowa.....	135
11.1.5. Komora częściowo bezodbiciowa (z przewodzącą podłogą)	136
11.2. Ogólne warunki pomiaru.....	137
11.2.1. Źródła zasilania	137
11.2.2. Urządzenia pomiarowe.....	137
11.2.3. Badane urządzenie.....	139
11.2.4. Warunki otoczenia.....	139
11.2.5. Uchyb pomiaru	140
11.2.6. Wyniki pomiaru i sprawozdanie z badań	140
11.2.7. Wymagania związane z bezpieczeństwem	140
11.3. Szczegółowe warunki pomiaru stacji satelitarnych VSAT odnośnie wymagań radioelektrycznych.....	142
11.3.1. Promieniowanie uboczne w obszarze promieniowania niepożądanego	142
11.3.2. Promieniowanie uboczne w obszarze promieniowania pożądanego	149
11.3.3. Zastępcza moc promieniowania izotropowo w obszarze promieniowania niepożądanego	152
11.3.4. Dyskryminacja polaryzacji anteny nadawczej.....	160
11.3.5. Tłumienie sygnału nośnej.....	162
12. Sterowanie i nadzór terminalu VSAT.....	164
12.1. Stany pracy terminalu VSAT	164
12.2. Kanał sygnalizacyjny (sterowania)	166
12.3. Funkcje nadzoru.....	167
12.4. Sprawdzanie systemu sterowania i nadzoru.....	169
12.4.1. Sprawdzenie kanału sterującego CC	170
12.4.2. Sprawdzenie systemu nadzoru procesorów	171
12.4.3. Sprawdzenie systemu nadzoru podsystemu nadawczego	171
12.4.4. Sprawdzenie prawidłowości transmisji w systemie nadzoru.....	171
12.4.5. Odbiór rozkazów z centrum CCMF	172

12.4.6. Sprawdzenie zachowania terminalu po włączeniu lub zerowaniu rejestrów...	174
13. Odporność na zakłócenia.....	148
14. Wymagania mechaniczne.....	177
14.1. Stabilność wycelowania anteny.....	177
14.2. Dokładność wycelowania anteny.....	177
14.3. Ustawianie polaryzacji.....	177
15. Koordynacja miejsca i częstotliwości dla terminali VSAT.....	178
15.1. Koordynacja miejsca.....	178
15.2. Koordynacja częstotliwości.....	182
15.3. Upoważnienie do transmisji.....	182
16. Kompatybilność naziemnych stacji satelitarnych VSAT z systemami lotniczymi.....	184
16.1. Podatność aparatury elektronicznej zainstalowanej na pokładzie statku powietrznego.....	185
16.1.1. Normy europejskie.....	185
16.1.2. Normy opracowane przez NATO.....	190
16.1.3. Wojskowe normy amerykańskie MIL-STD-461.....	190
16.1.4. Norma CAP 208 dotycząca radiowej aparatury pokładowej.....	191
16.1.5. Tendencje w ustalaniu poziomów podatności aparatury elektronicznej na pokładzie statku powietrznego.....	192
16.1.6. Wymagania stawiane elektronicznej aparaturze na pokładzie samolotu.....	193
16.2. Określenie natężenia pola wokół satelitarnej stacji nadawczej.....	194
16.2.1. Określenie poziomów promieniowania pożądanego.....	195
16.2.2. Rozkład pola w zadanej odległości od anteny.....	200
16.2.3. Natężenie pola elektrycznego w głównej wiązce anteny.....	204
16.2.4. Wyznaczenie szerokości wiązki.....	207
16.2.5. Przelot samolotu przez główną wiązkę.....	211
16.2.6. Określenie pola elektromagnetycznego w głównej wiązce anteny oddziałującego na samolot podczas podejścia do lądowania.....	216
16.2.7. Określenie pola elektromagnetycznego poza główną wiązką anteny.....	229
16.2.8. Wyznaczenie maksymalnych poziomów promieniowania w pasmie pracy naziemnej stacji satelitarnej VSAT.....	233
16.3. Skuteczność ekranowania kadłubów statków powietrznych.....	241
16.3.1. Metoda pomiaru.....	241
16.3.2. Wyniki pomiarów.....	242
16.3.3. Skuteczność ekranowania kadłubów statków powietrznych.....	246
17. Ochrona ludzi przed promieniowaniem terminali VSAT.....	248
18. Podsumowanie.....	255
Literatura.....	257

WYKAZ SKRÓTÓW

Skrót	Nazwa oryginalna	Tłumaczenie polskie
1	2	3
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i>	Transmisja z potwierdzeniem
BER	<i>Bit error rate</i>	Bitowa stopa błędów
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>	Binarne (dwuwartościowe) kluczkowanie fazy
BSM	<i>Broadband Satellite Multimedia</i>	Szerokopasmowy satelitarny system multimedialny
BSS	<i>Broadcasting Satellite Service</i>	Satelitarna służba radiodifuzyjna (rozsiawcza)
C/I	<i>Carrier to Interference ratio</i>	Stosunek mocy sygnału użytecznego do zakłóceń
C/N	<i>Carrier to Noise ratio</i>	Stosunek mocy sygnału użytecznego do szumów
CAA	<i>Civil Aviation Authority</i>	Inspektorat Lotnictwa Cywilnego
CCD	<i>Central Control Disable</i>	Centralne sterowanie jest niedostępne
CCE	<i>Central Control Enable</i>	Centralne sterowanie jest dostępne
CCIR	<i>Comite Consultatif International des Radiocommunications</i>	Międzynarodowy Doradczy Komitet Radiokomunikacyjny
CCMF	<i>Centralised Control and Monitoring Function</i>	Centralne funkcje sterowania i monitorowania
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>	Kodowy dostęp wielokrotny
CENELEC	<i>Comite Europeen de Normalisation Electrotechnique</i>	Europejski Normalizacyjny Komitet Elektrotechniczny
CISPR	<i>Comite International Special des Perturbations Radioelectriques</i>	Międzynarodowy Komitet Specjalny ds. Zakłóceń Radioelektrycznych
CMF	<i>Control and Monitoring Functions</i>	Funkcje sterowania i monitorowania
CV	<i>Control Variable</i>	Zmienna sterowania
D-BPSK	<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i>	Różnicowe dwuwartościowe kluczkowanie fazy
D-QPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>	Różnicowe czterowartościowe kluczkowanie fazy
DE-BPSK	<i>Differentially Encoded Binary Phase Shift Keying</i>	Różnicowo kodowane dwuwartościowe kluczkowanie fazy
DE-QPSK	<i>Differentially Encoded Quadrature Phase Shift Keying</i>	Różnicowo kodowane czterowartościowe kluczkowanie fazy
Eb/No	<i>Energy per bit to one sided spectral noise density</i>	Stosunek energii przypadającej na 1 bit do jednostronnej widmowej gęstości szumu
EDP	<i>Electronic Data Processing</i>	Elektroniczne przetwarzanie dokumentów
EIRP	<i>Equivalent Isotropically Radiated Power</i>	Zastępcza moc promieniowana izotropowo
EN	<i>European Norm</i>	Norma Europejska

1	2	3
ERC	<i>European Radiocommunications Committee</i>	Europejski Komitet Radiokomunikacyjny
ETR	<i>ETSI Technical Report</i>	Raport Techniczny ETSI
ETS	<i>ETSI Telecommunications Standard</i>	Standard Telekomunikacyjny ETSI
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>	Europejski Instytut Standardów Telekomunikacyjnych
EUROCAE	<i>European Organisation for Civil Aviation Electronics</i>	Europejska Organizacja ds. Cywilnej Elektroniki Lotniczej
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>	Federalna Komisja Łączności (USA)
FDM	<i>Frequency Division Multiplex</i>	Zwielokrotnienie częstotliwościowe
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>	Dostęp wielokrotny poprzez podział częstotliwości
FEC	<i>Forward-acting Error Correction</i>	Kodowanie nadmiarowe
FM	<i>Frequency Modulation</i>	Modulacja częstotliwości
FSS	<i>Fixed Satellite Service</i>	Stała służba satelitarna
HEO	<i>Highly Elliptical Orbit</i>	Wydłużona orbita eliptyczna
HIRF	<i>High Intensity Radiated Fields</i>	Pole elektromagnetyczne o dużym natężeniu
HIRTA	<i>High Intensity Radio Transmission Areas</i>	Obszary, w których może wystąpić pole elektromagnetyczne o dużym natężeniu
HPA	<i>High Power Amplifier</i>	Wzmacniacz dużej mocy
HRC	<i>Hypothetical Reference Circuit</i>	Analogowe łącze odniesienia
I/N	<i>Interference to noise ratio</i>	Stosunek mocy zakłócenia interferencyjnego do mocy szumu
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>	Międzynarodowa Organizacja Lotnictwa Cywilnego
ICO	<i>Intermediate Circular Orbit</i>	Średnia orbita kołowa
IDWM	<i>ITU-R Digitized World Map</i>	Cyfrowa mapa świata ITU-R
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>	Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna
IF	<i>Intermediate Frequency</i>	Częstotliwość pośrednia (p.cz.)
ILS	<i>Instrument Landing System</i>	System lądowania na przyrządy
ITE	<i>Information Technology Equipment</i>	Urządzenia techniki informatycznej
ITU-R	<i>International Telecommunications Union – Radiocommunication Sector</i>	Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny – Sektor radiokomunikacji
JAA	<i>Joint Aviation Authorities</i>	Zrzeszenie władz lotnictwa cywilnego
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>	Orbita niska
LISN	<i>Line Impedance Stabilisation Network</i>	Sieć sztuczna
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>	Wzmacniacz niskoszumny
LNB	<i>Low Noise Block</i>	Blok niskoszumny
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>	Orbita średnia
MIL-STD	<i>Military Standard</i>	Standard wojskowy (USA)

1	2	3
MLS	<i>Microwave Landing System</i>	Mikrofalowy system lądowania na przyrządy
MSK	<i>Minimum Shift Keying</i>	Kluczowanie częstotliwości z zachowaniem ciągłości fazy
MSS	<i>Mobile Satellite Service</i>	Satelitarna służba ruchowa
NCM	<i>Network Control and Monitoring</i>	System sterowania i monitorowania sieci
OATS	<i>Open Area Test Site</i>	Stanowisko do badań w otwartej przestrzeni
prETS	<i>Provisional ETSI</i>	Standard Telekomunikacyjny ETSI przed publiczną oceną
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>	Kluczowanie fazy
PSTN	<i>Public Switched Telecommunication Network</i>	Publiczna sieć telekomunikacyjna z komutacją kanałów
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>	Czterwartościowe kluczowanie fazy
r.m.s.	<i>route-mean-square</i>	Średnia kwadratowa
RBW	<i>Resolution bandwidth</i>	Szerokość filtru pomiarowego
RC	<i>Response/Return Channel</i>	Kanał zwrotny
Rec.	<i>Recommendation</i>	Zalecenie
RF	<i>Radio Frequency</i>	Częstotliwości radiowe, w.cz.
RR	<i>Radio Regulations</i>	Regulamin radiokomunikacyjny
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>	Stowarzyszenie Inżynierów Samochodowych
SCPC	<i>Single Carrier per Channel</i>	Jedna nośna na kanał
SE	<i>Spectrum Engineering</i>	Inżynieria widma
SES	<i>Satellite Earth Station</i>	Naziemna stacja satelitarna
SG	<i>Study Group</i>	Grupa robocza
SMF	<i>Status Monitoring Fail</i>	Terminal jest niesprawny
SMP	<i>Status Monitoring Pass</i>	Terminal jest sprawny
SMV	<i>Self Monitoring Variable</i>	Zmienna stanu terminala
SNG	<i>Satellite News Gathering</i>	Satelitarna stacja reporterska
STANAG	<i>Standardization Agreement (NATO)</i>	Standard wojskowy (NATO)
STC	<i>Subtechnical Committee</i>	Podkomitet techniczny
STE	<i>Special Test Equipment</i>	Specjalne wyposażenie do pomiarów
TBR	<i>Technical Basis for Regulation</i>	Techniczne podstawy wymagań
TC SES	<i>Technical Committee Satellite Earth Stations and Systems</i>	Komitet Techniczny Naziemnych Stacji Satelitarnych i Systemów
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>	Dostęp wielokrotny przez podział czasu
TES	<i>Transportable Earth Station</i>	Przewoźna naziemna stacja satelitarna
TIG	<i>Time-invariant Gain</i>	Metoda wykorzystująca niezmienny w czasie zysk energetyczny anteny
TV	<i>Television</i>	Telewizja, telewizyjny
TVRO	<i>Television Receive Only</i>	Telewizyjny terminal satelitarny stosowany tylko do odbioru
VSAT	<i>Very Small Apperture Terminal</i>	Satelitarny terminal z małą anteną
WRC	<i>World Radiocommunications Conference</i>	Światowa Konferencja Radiokomunikacyjna

WYKAZ OZNACZEŃ

λ	– długość fali elektromagnetycznej
γ	– kąt elewacji anteny
Δ	– współczynnik korekcyjny
φ	– kąt od osi głównej wiązki antenowej
β	– tłumienność właściwa
η	– sprawność anteny
ρ	– gęstość pary wodnej
ζ	– szerokość geograficzna
B	– zastępcze pasmo szumowe (pasmo pomiarowe)
c	– prędkość światła w próżni ($3 \cdot 10^8$ m)
d	– odległość
D	– średnica apertury anteny
$d_{\max}$	– odległość maksymalna
$d_{\min}$	– odległość minimalna
D_{sd}	– odległość do strefy dalekiej
E	– natężenie pola elektrycznego (amplituda)
$\vec{E}$	– wektor natężenia pola elektrycznego
E_b	– energia przypadająca na jeden bit
f	– częstotliwość
G	– zysk energetyczny anteny
G_{ina}	– wzmocnienie niskoszumnego wzmacniacza
$\vec{H}$	– wektor natężenia pola magnetycznego
I	– moc zakłóceń
k	– stała Boltzmanna ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
L	– tłumienie wolnej przestrzeni
$L_b(p)$	– minimalna dopuszczalna tłumienność wolnej przestrzeni dla $p\%$ czasu
L_r	– tłumienie spowodowane opadem deszczu
L_t	– tłumienie linii
M	– liczba stanów modulacji
M_S	– margines interferencyjny
N	– moc szumu
N	– liczba naturalna, liczba jednocześnie nadających terminali VSAT
N_0	– widmowa gęstość szumu
N_L	– szum łącza
p	– procent czasu
P	– moc
P_b	– prawdopodobieństwo przekłamania bitu
P_{dom}	– moc zakłóceń od najsilniejszej stacji
P_{tot}	– wypadkowa moc zakłóceń na wejściu odbiornika
R	– intensywność opadów (mm/h)
R_b	– szybkość transmisji bitów
S	– gęstość strumienia mocy (amplituda)
T	– zastępcza temperatura szumowa

t	– czas
T_0	– temperatura standardowa (290 K)
T_a	– temperatura szumowa anteny
T_{a0}	– temperatura szumowa anteny w warunkach czystego nieba
T_b	– czas trwania jednego bitu
T_{dc}	– zastępcza szumowa temperatura konwertera
T_e	– zastępcza szumowa temperatura systemu odbiorczego
T_f	– fizyczna temperatura atmosfery
T_{lna}	– zastępcza temperatura szumowa niskoszumnego wzmacniacza
v	– prędkość
W	– współczynnik równoważności



1. WSTĘP

W ostatnich latach gwałtownie wzrasta wykorzystywanie systemów telekomunikacyjnych w zakresie częstotliwości powyżej 1 GHz. Masowa produkcja sprzętu telekomunikacyjnego stosowanego w tych systemach już się rozpoczęła lub rozpocznie się w najbliższym czasie. Przykładami takich systemów są:

- naziemne satelitarne stacje odbiorcze telewizji TVRO pracujące w zakresie 11/12 GHz,
- terminale VSAT do odbioru danych pracujące w zakresie 11/12 GHz,
- naziemne satelitarne stacje ruchome umożliwiające transmisję danych z niewielkimi szybkościami pracujące w zakresie 11/12/14 GHz,
- naziemne interaktywne terminale satelitarne SIT pracujące w zakresie 11/12 GHz – odbiór i 30 GHz – nadawanie,
- naziemne linie radiowe do transmisji sygnałów cyfrowych pracujące w zakresach 11, 14, 23, 38, 50 GHz.

Stacje te pracują w zakresach częstotliwości, które są przyznane wyłącznie dla specyficznych rodzajów służb lub są dzielone przez inne służby. W celu koordynacji ich pracy w zadanych zakresach częstotliwości CCIR (obecnie ITU-R) opracował specjalne procedury. Ten sposób postępowania sprawdzał się, gdy większość systemów łączności była w rękach administracji, która problemy interferencyjne rozwiązywała zgodnie z zaleceniami CCIR dla konkretnych przypadków. Wraz z pojawieniem się systemów z małymi terminalami, które mogą być użytkowane praktycznie przez każdego i w każdym miejscu, a ich liczba może być bardzo duża, takie podejście do zagadnienia jest trudne lub wręcz niemożliwe.

Celem pracy jest przedstawienie wybranych zagadnień związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną w łączności satelitarnej. Dokonano analizy kompatybilności elektromagnetycznej naziemnych stacji satelitarnych wyposażonych w małe anteny. Do tej kategorii zalicza się bardzo dynamicznie rozwijające się systemy VSAT i stacje SNG TES. W najbliższej przyszłości do grupy tej dołączą satelitarne interaktywne terminale multimedialne SIT. Dużo miejsca poświęcono analizie zagrożenia interferencyjnego, jakie tego typu stacje mogą stwarzać dla innych systemów radiokomunikacyjnych oraz urządzeń elektronicznych instalowanych na pokładzie statku powietrznego. Skalę problemu można sobie uzmysłowić, jeśli weźmiemy pod uwagę, że obecnie (1999 rok) Eutelsat, jeden z operatorów sieci VSAT w Europie, obsługuje około 26 tys. terminali VSAT. Eutelsat nie jest monopolistą w tym zakresie. Do ogólnej liczby terminali VSAT pracujących w Europie należy doliczyć te, które wykorzystują operatorów narodowych, np. Hispasat czy Italsat. Również liczba stacji reporterskich SNG wzrasta bardzo szybko wraz ze zwiększającą się liczbą niezależnych nadawców radiowych i telewizyjnych i z globalizacją usług. Na horyzoncie pojawia się nowa klasa satelitarnych stacji nadawczo-odbiorczych SIT, które umożliwiają dołączenie indywidualnego odbiorcy do sieci Internet i do serwerów świadczących usługę

gi multimedialne. Szacuje się, że w przyszłości liczba tych terminali liczona będzie w milionach.

W pierwszej części pracy wprowadzono terminologię stosowaną w odniesieniu do naziemnych stacji satelitarnych przez ETSI i ITU. W następnym rozdziale przedstawiono niepożądane efekty, które mogą być wynikiem pracy naziemnej stacji satelitarnej. Analiza tych efektów prowadzi do budowy modelu interferencyjnego stacji VSAT oraz określenia odległości koordynacyjnych i innych warunków umożliwiających uzyskanie kompatybilności elektromagnetycznej wewnętrznej oraz zewnętrznej (w stosunku do innych systemów). Podstawowym parametrem branym pod uwagę przy szacowaniu zagrożenia interferencyjnego jest odległość pomiędzy stacjami: zakłócaną i zakłócającą. Z tego punktu widzenia przedyskutowano kilka modeli. Redukcja promieniowania ubocznego do wartości pomijalnie małej z punktu widzenia zagrożeń interferencyjnych nie zawsze jest technicznie możliwa lub ekonomicznie opłacalna. Dlatego też duże znaczenie ma określenie dopuszczalnych poziomów zakłóceń w taki sposób, że z jednej strony z technicznego punktu widzenia sensowne jest przestrzeganie tych poziomów, a z drugiej strony poziomy te zapewniają wystąpienie istotnych zakłóceń spowodowanych promieniowaniem jedynie w bardzo małym, ściśle zdefiniowanym procencie przypadków.

Naziemne stacje satelitarne VSAT i SNG są stacjami dość dobrze opisanymi z punktu widzenia standaryzacji. W pracy przedstawiono podstawowe normy opisujące tego typu stacje satelitarne ze szczególnym uwzględnieniem występujących różnic.

Zaprezentowano również najnowsze zalecenia ITU-R związane z zagadnieniami międzynarodowej koordynacji pracy naziemnych stacji satelitarnych. Koordynacja ta jest wymagana, gdy stacja pracuje w zakresie częstotliwości wspólnie użytkowanym z innymi systemami naziemnymi i satelitarnymi. Poruszono zagadnienia związane z międzynarodową koordynacją terminali pracujących w satelitarnej służbie ruchomej MSS.

Analiza i zapewnienie kompatybilności elektromagnetycznej dla danego typu źródeł promieniowania elektromagnetycznego jest możliwe tylko wtedy, gdy są unormowane poziomy emisyjności oraz metody ich pomiaru i weryfikacji. Metody te zaprezentowano w pracy. Jednym z warunków dopuszczenia terminali VSAT do komercyjnego użytku jest zapewnienie zdalnego nadzoru nad terminalem. Warunek ten nałożono, by w razie awarii terminalu można go było wyłączyć. Ma on zatem istotne znaczenie dla kompatybilności elektromagnetycznej. Zagadnienia związane ze sterowaniem i nadzorem stanowią treść jednego z rozdziałów pracy. Dla szczegółowej analizy zagrożenia elektronicznej aparatury na pokładzie samolotu przez promieniowanie wytwarzane przez stacje satelitarne VSAT i SNG opracowano specjalny model promieniowania anteny w strefie bliskiej. Wyniki analizy pokazują, że niezbędne jest wprowadzenie procedur koordynacyjnych. Konieczność opracowania i wprowadzenia jednolitej procedury koordynacyjnej dostrzeżono ostatnio w krajach Unii Europejskiej. Przykłady takich procedur zamieszczono w pracy. Na zakończenie dokonano analizy wpływu stacji satelitarnej na człowieka. Zaproponowano metody wyznaczania stref ochronnych.

1.1. DEFINICJA STACJI SATELITARNEJ (TERMINALU) VSAT

Systemy satelitarne VSAT oraz stacje reporterskie SNG pracują w stałej służbie satelitarnej. Jeszcze do niedawna wszystkie stacje satelitarne pracujące w takiej służbie musiały przed instalacją być skoordynowane. Dla krajów wielkości Polski oznaczało to w praktyce koordynację międzynarodową na szczepku Międzynarodowej Unii Telekomunikacyjnej ITU.

Koordynacja polega na wyznaczeniu obszaru koordynacyjnego dla planowanej lokalizacji i częstotliwości pracy stacji satelitarnej. Obszar koordynacyjny to obszar, w którym poziom zakłóceń emitowanych ze stacji satelitarnej przekracza dopuszczalne wartości. Jest on obliczany na podstawie opracowanej w ITU procedury [2, 67]. Zagadnienia te przedstawiono w rozdziale 10. Jeśli w granicach obszaru koordynacyjnego znajdują się inne stacje satelitarne, to należy od administracji krajów, na terytorium których znajdują się te stacje, uzyskać zgodę na instalację. Proces koordynacji jest dość długi i pracochłonny. Przez wiele lat zapewniał on niezakłócone warunki pracy systemów satelitarnych. Hamował jednak ich szybki rozwój oraz uniemożliwiał szybkie instalowanie oraz elastyczne dostosowywanie się do wymogów i potrzeb użytkowników. Dlatego też w połowie lat osiemdziesiątych, najpierw w Stanach Zjednoczonych (rok 1984), a potem w innych częściach świata, pojawiła się klasa systemów, dla których administracje wielu krajów zgodziły się w znacznym stopniu zliberalizować wymagania prawne. Działania te miały na celu promowanie łączności satelitarnej. Stacje satelitarne stosowane w tych systemach otrzymały nazwę VSAT. Podobne, zliberalizowane wymagania prawne zastosowano również dla satelitarnych stacji reporterskich SNG, służących do przekazu „na żywo” głosu i dźwięku z odległych miejsc do studiów radiowych i telewizyjnych. W tym przypadku, z uwagi na konieczność instalacji stacji SNG w bardzo krótkim i trudnym do zaplanowania czasie i miejscu, żadne międzynarodowe procedury koordynacyjne nie mogły być zaadaptowane. Nie oznacza to jednak, że stacje tego typu nie podlegają żadnej kontroli. Jak to pokazano w dalszych rozdziałach, terminale VSAT i SNG mogą być źródłem poważnych zakłóceń.

W 1992 roku w Polsce rozpoczęło pracę dwóch operatorów systemów VSAT: Telekomunikacja Polska S.A., ze stacją centralną zainstalowaną w Porębie Leśnej, oraz Telekomunikacja Satelitarna S.A., ze stacją centralną zainstalowaną w Bielsku-Białej. Państwowa Agencja Radiokomunikacyjna, zdając sobie sprawę z istniejącego zagrożenia, zleciła podjęcie badań w tym zakresie Instytutowi Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej. W tym samym roku autor niniejszej monografii został zatrudniony jako ekspert w zakresie łączności satelitarnej i kompatybilności elektromagnetycznej w Europejskim Instytucie Norm Telekomunikacyjnych ETSI w grupie PT 23 V, opracowującej standard stacji SNG. Po powrocie do kraju prace były kontynuowane i doprowadziły do wyjaśnienia wielu aspektów kompatybilnościowych związanych z wprowadzaniem terminali VSAT i SNG do Polski.

Również w roku 1992 ITU opracowało definicję terminalu VSAT [15, 47]. Za podstawę techniczną przyjęto, opracowane wcześniej w ETSI, standardy telekomunikacyjne [31, 32]. Przyjęcie definicji terminalu VSAT położyło kres stosowaniu innych typów stacji satelitarnych jako terminali VSAT i omijaniu procedur koordynacyjnych.

Zgodnie z zaleceniami Międzynarodowej Unii Telekomunikacyjnej ITU stacje satelitarne z małymi antenami VSAT wyróżniają się między innymi następującymi cechami [15, 47]:

1. Pracują zwykle w zamkniętych sieciach dla określonych zastosowań rozsiewczych (tylko odbiorcze stacje VSAT) lub porozumiewawczych (stacje nadawczo-odbiorcze VSAT).

Przy użyciu systemów VSAT buduje się wydzielone sieci korporacyjne. Sieci te mogą mieć połączenie zarówno z sieciami publicznymi klasycznymi (z komutacją kanałów) PSTN [30, 62], jak również z publicznymi sieciami transmisji danych, w których stanowią jedno z ogniw łańcucha telekomunikacyjnego. Definicja terminalu VSAT obejmuje trzy klasy terminali: tylko odbiorcze, tylko nadawcze oraz nadawczo-odbiorcze. Definicja nie wyklucza stosowania systemu VSAT w sieciach publicznych.

2. Są zazwyczaj instalowane bezpośrednio u użytkownika, a ich gęstość występowania może być bardzo duża.

Instalacja terminalu satelitarnego VSAT bezpośrednio u użytkownika jest jedną z często wymienianych zalet systemów VSAT. Oprócz niewątpliwych korzyści finansowych należy zwrócić również uwagę na dodatkowy aspekt związany z ochroną środowiska oraz uzyskaniem niezbędnych zezwoleń na instalację, który jest łatwiejszy do rozwiązania w przypadku wykorzystania przez użytkownika możliwości instalacji stacji na własnym terenie. Jak jednak pokazano w dalszych rozdziałach, terminale VSAT nie mogą być instalowane w dowolnym miejscu. Nie ma ograniczeń na liczbę terminali VSAT instalowanych na danym obszarze. Problemy związane z występowaniem dużej ich liczby na ograniczonym małym obszarze i związanymi z tym zwiększonymi zakłóceniami są częściowo eliminowane przez uwzględnienie liczby jednocześnie pracujących terminali w parametrach opisujących dopuszczalne poziomy emisyjności.

3. Często są elementami sieci o topologii gwiazdy, składającej się ze względnie dużej stacji centralnej, zwanej stacją hub, i wielu naziemnych stacji VSAT.

Znane są również sieci o konfiguracji kraty (ang. *mesh*) bez stacji centralnej (sieci ze sterowaniem rozproszonym). Architekturę systemu VSAT przedstawiono w dalszej części pracy.

4. Pracują zazwyczaj w trybie bezobsługowym.

Terminale VSAT, zgodnie z obowiązującymi normami, są wyposażone w systemy zdalnego nadzoru i sterowania. Dlatego też wszelkie zmiany konfiguracyjne systemu mogą być realizowane centralnie. Obniża to koszty utrzymania systemu.

5. Zazwyczaj są monitorowane i sterowane z centralnego ośrodka.

Mogą również być wykorzystane lokalne ośrodki monitorowania i sterowania. System zdalnego monitorowania i sterowania terminalu VSAT, umożliwiający jego bezobsługową pracę, pełni drugą bardzo istotną funkcję – wyłącza terminal VSAT w razie jego wadliwej pracy, przez co eliminuje możliwość powstawania niekontrolowanych zakłóceń.

6. Zazwyczaj wykorzystują transmisję cyfrową z szybkością nie większą niż 2 Mb/s.

Przeważająca liczba dotychczas stosowanych terminali VSAT nadaje z niewielkimi szybkościami transmisji, najczęściej 64 kb/s. Rysujące się możliwości zastosowania tego typu systemów w szybko rozwijającym się rynku usług multimedialnych może jednak doprowadzić do zwiększenia szybkości transmisji do 2 Mb/s i wszelkich związanych z tym konsekwencji.

7. Średnice anten naziemnych stacji satelitarnych z małymi antenami (VSAT) są zwykle ograniczone do 2,4 m (pasmo K_u).

Warunek ten w istotny sposób wyróżnia terminale VSAT od innych naziemnych stacji satelitarnych pracujących w satelitarnej służbie stałej, które są zazwyczaj znacznie większe. Umożliwia również traktowanie terminali VSAT w znacznie bardziej liberalny sposób niż dużych stacji satelitarnych i budowę wolnego i zintegrowanego rynku dla tego typu stacji. Normy europejskie są w tym zakresie bardziej liberalne i dopuszczają maksymalny wymiar apertury anteny równy 3,8 m.

8. Zazwyczaj są wyposażone w nadajniki radiowe o małej mocy, moc promieniowana musi zostać ograniczona, jeśli wymagają tego względy bezpieczeństwa.

Moc nadajnika nie musi być zbyt duża w przypadku stosowania terminalu VSAT do transmisji danych z szybkościami ok. 64 kb/s. Rozwój sieci cyfrowych i zastosowań multimedialnych może jednak wymusić budowę terminali o znacznie większych szybkościach transmisji i większych mocach promieniowanych. Maksymalne wartości dopuszczalne ograniczone normami przedstawiono w dalszej części pracy.

9. Wiele administracji wprowadziło uproszczone procedury licencyjne ułatwiające wprowadzanie VSAT-ów.

Chęć liberalizacji przepisów prawnych była jedną z przyczyn powstania systemów VSAT. Liberalizacja dotyczy znacznie prostszych procedur udzielania licencji oraz koordynacji miejsca lokalizacji. Umożliwia sprzedaż terminali VSAT i świadczenie usług w wielu krajach. Znacznie skraca czas instalacji terminalu i zwiększa atrakcyjność tego typu rozwiązania.

10. Techniczne parametry stacji VSAT oraz funkcje monitorujące i sterujące siecią powinny być zgodne z odpowiednimi zaleceniami ITU-R [15, 16, 17, 18].

W odniesieniu do Europy techniczne parametry stacji VSAT oraz systemu nadzoru i monitorowania muszą być zgodne z normami ETSI. Aspekt ten jest omawiany w dalszej części pracy. Wymagania ITU-R są oparte na wcześniej opracowanych normach ETSI.

11. Terminal naziemny pracujący w pasmach częstotliwości 11/12/14 GHz może być traktowany jako terminal VSAT (w rozumieniu ITU), jeśli jego parametry techniczne spełniają wymagania:

a) zastępcza moc promieniowana izotropowo EIRP w pasmie 40 kHz nie przekracza 57 dBW,

b) zysk energetyczny anteny podczas odbioru nie przekracza 52 dBi,

c) szybkość transmisji danych nie przekracza 2,048 Mb/s.

Normy europejskie nie narzucają podobnych ograniczeń na terminale VSAT. Dlatego też przy określaniu najbardziej krytycznych warunków pracy terminalu VSAT związanych z jego właściwościami emisyjnymi uwzględnione zostaną zalecenia ITU.

1.2. ARCHITEKTURA SYSTEMÓW VSAT

Systemy VSAT w zależności od przeznaczenia są budowane według trzech podstawowych konfiguracji: gwiazdy, kraty i punkt–punkt. W systemach o architekturze gwiazdy informacja przesyłana pomiędzy terminalami przechodzi przez stację centralną, tzw. hub. Stacja ta jest zazwyczaj wyposażona w dużą antenę, dzięki czemu poprawia się bilans energetyczny łącza, a terminale VSAT mogą być wyposażone w mniejsze anteny i transmitować większe strumienie danych. W tego typu systemach łatwiej jest również nadzorować pracę całego systemu oraz organizować dostęp do publicznych naziemnych systemów łączności przez stację centralną.

W systemach VSAT o architekturze kraty informacja jest przesyłana bezpośrednio pomiędzy terminalami (bez pośrednictwa innych stacji). W zależności od wybranego sposobu organizacji systemu jedna ze stacji (dowolnie wybrana) może pełnić funkcje stacji centralnej, ale tylko w zakresie zarządzania systemem. Zajmuje się ona zestawianiem oraz zwalnianiem łączy, monitorowaniem jakości łączy, taryfikacją itp. W systemach o architekturze kraty terminale są wyposażone w relatywnie większe anteny i przenoszą mniejszy ruch.

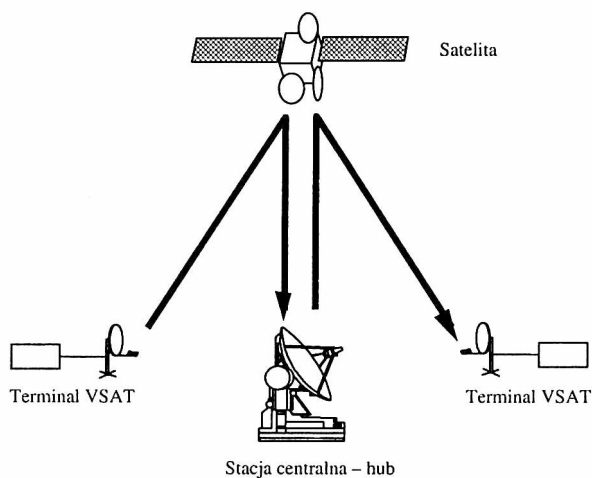
W systemach typu punkt–punkt nie jest wymagana stacja centralna hub, gdyż nie występują problemy związane z zestawieniem połączenia. Funkcje zarządzania i monitorowania systemu są zazwyczaj realizowane poza nim na podstawowym, wymaganym przez normy ETS 300 160 [33] i ETS 300 161 [34] poziomie.

1.2.1. ARCHITEKTURA GWIAZDY

Systemy VSAT oparte na architekturze gwiazdy stosują do transmisji informacji stację pośredniczącą, zwaną stacją centralną. Stacja ta spełnia wiele istotnych zadań. Jednym z nich jest regeneracja strumienia danych.

Do demodulatora terminalu VSAT należy doprowadzić sygnał o odpowiednim poziomie. Straty w łączy satelitarnym pomiędzy terminalem a satelitą (w pasmie K_u 12/14 GHz) wynoszą około 200 dB w kierunku Ziemia–satelita i satelita–Ziemia, a moc nadajnika na satelicie jest ograniczona do kilkudziesięciu watów. Dlatego też, by terminale VSAT mogły być wyposażone w stosunkowo małe anteny, w pierwszym okresie budowy systemów VSAT ich architektura miała strukturę gwiazdy. Dzięki odpowiednio dużym rozmiarom stacji centralnej (jest ona typowo wyposażona w antenę o średnicy od kilku do kilkunastu metrów i nadajnik o mocy od kilkudziesięciu do kilkuset watów) możliwe było uzyskanie wartości stosunku sygnału do szumu w łączy terminal VSAT–stacja centralna wystarczającego do prawidłowej demodulacji i detekcji sygnału, nawet podczas bardzo niekorzystnych warunków meteorologicznych wprowadzających dodatkowe tłumienie sygnału. Odebrany sygnał po regeneracji jest wysyłany przez stację centralną do terminalu VSAT.

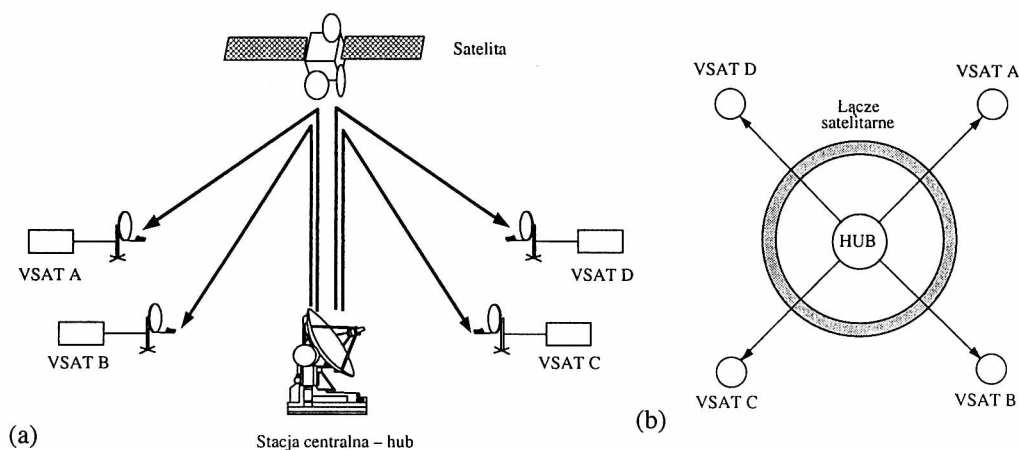
Schemat transmisji informacji w systemie VSAT o architekturze gwiazdy pokazano na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Transmisja informacji pomiędzy dwoma terminalami w systemie VSAT o architekturze gwiazdy

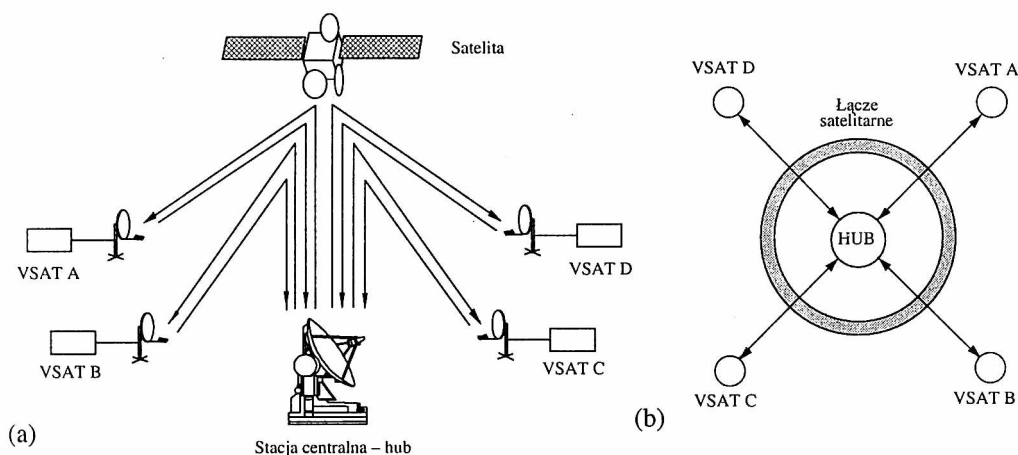
Systemy satelitarne VSAT o strukturze gwiazdy dzielą się na systemy rozsiewcze (ang. *one-way*) oraz na systemy dwukierunkowe (ang. *two-way*). W systemach rozsiewczych jedynie stacja centralna może przysyłać informacje do terminali. Transmisja informacji w przeciwnym kierunku jest niemożliwa. W tego typu systemach stosuje się **terminale tylko odbiorcze**.

Strukturę rozsiewczego systemu VSAT o architekturze gwiazdy pokazano na rysunku 1.2.



Rys. 1.2. System VSAT do dystrybucji danych o architekturze gwiazdy: (a) przykład z czterema terminalami odbiorczymi VSAT (strzałki pokazują przepływ informacji w łączu stacja centralna–terminal poprzez satelitę), (b) uproszczony schemat tego typu systemu (strzałki pokazują jednokierunkowe łącza)

W systemach dwukierunkowych każdy terminal VSAT może zarówno odbierać dane, jak i je nadawać do ściśle określonego innego terminalu lub grupy terminali. W przypadku wymiany informacji pomiędzy dwoma terminalami dane czterokrotnie pokonują dystans pomiędzy naziemną stacją satelitarną a satelitą. Powstałe na skutek tego opóźnienie wynosi około 0,5 s i stanowi niedogodność przy transmisji sygnałów telefonicznych. Przy ciągłej transmisji danych opóźnienie występuje jedynie w trakcie zestawiania połączenia i nie stanowi istotnego utrudnienia. Podczas pracy interaktywnej opóźnienie może ograniczać przepustowość kanału, jeśli transmisja odbywa się z potwierdzeniem. W systemie o architekturze gwiazdy również stacja centralna może pełnić rolę terminalu VSAT. Jest ona jednak w uprzywilejowanej sytuacji. Wymiana informacji pomiędzy stacją centralną a dowolnym terminalem jest obciążona opóźnieniem o połowę mniejszym niż przy połączeniu terminal–terminal. Dlatego też systemy VSAT dołącza się do naziemnych sieci telekomunikacyjnych zazwyczaj poprzez stację centralną. Dwukierunkowy system VSAT o architekturze gwiazdy stosuje **nadawczo-odbiorcze terminale VSAT** (rys. 1.3).



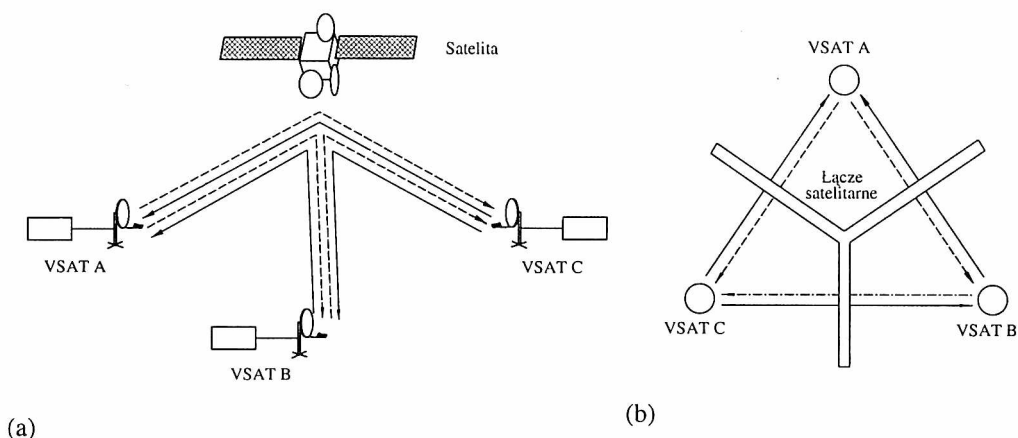
Rys. 1.3. Dwukierunkowy system VSAT o architekturze gwiazdy: (a) przykład z czterema terminalami VSAT (strzałki pokazują przepływ informacji w łączu stacja centralna–terminal i terminal–stacja centralna poprzez satelitę, linią przerywaną zaznaczono łącze uprzywilejowane, w którym stacją końcową jest stacja centralna), (b) uproszczony schemat tego typu systemu (strzałki pokazują dwukierunkowe łącza)

1.2.2. ARCHITEKTURA KRATY

Innego typu rozwiązaniem są systemy VSAT o architekturze kraty. W systemach tych nie wyróżnia się żadnej stacji, przez którą transmitowany jest cały ruch w systemie. Jest to zasadnicza cecha odróżniająca te systemy od systemów o architekturze gwiazdy. Systemy o architekturze kraty mogą być budowane w dwóch wariantach. W pierwszym – jedna ze stacji pełni rolę stacji sterującej i nadzorującej. W wariantcie drugim funkcje nadzoru i sterowania systemu są rozproszone pomiędzy wszystkie

terminale. Rozwiązanie stosujące wydzieloną stację sterującą i nadzorującą stosowane jest zazwyczaj wtedy, gdy transmisja informacji w systemie wymaga zestawienia odpowiedniego połączenia i rezerwacji odpowiednich zasobów. W takim przypadku w fazie zestawiania połączenia stacja nadzorująca spełnia takie same funkcje, jak stacja centralna w systemie o architekturze gwiazdy. Po zestawieniu połączenia transmisja danych pomiędzy określonymi terminalami VSAT przebiega jednak bez udziału stacji nadzorującej. Po przesłaniu informacji terminal VSAT informuje stację nadzorującą o zakończeniu transmisji. Połączenie zostaje przez stację nadzorującą przerwane, a przyznane mu zasoby wracają do systemu.

W systemach z rozproszonymi funkcjami nadzoru i sterowania (z rozproszoną inteligencją) każdy terminal VSAT prowadzi obserwację łącza satelitarnego oraz dokonuje jego analizy. W zależności od wybranej metody dostępu do satelity terminal po zauważeniu wolnej szczeliny czasowej (TDMA) lub kanału częstotliwościowego (FDMA) rezerwuje go do transmisji przez powiadomienie pozostałych terminali o rezerwacji odpowiednich zasobów. Każdy z terminali prowadzi monitorowanie łącza i rejestr wolnych i zarezerwowanych zasobów systemu. Dalsze uproszczenie systemu jest możliwe wówczas, gdy wykorzystuje on dostęp kodowy CDMA. W tym przypadku obserwacja jakości transmisji w łączy (elementowej stopy błędu) umożliwia ocenę obciążenia łącza i rozpoczęcie transmisji, gdy jakość łącza jest wystarczająca. Schemat transmisji informacji w systemie VSAT o architekturze kraty pokazano na rysunku 1.4.



Rys. 1.4. System VSAT o architekturze kraty: (a) przykład z trzema terminalami VSAT (strzałki pokazują przepływ informacji w łączach pomiędzy terminalami), (b) uproszczony schemat tego typu systemu

1.2.3. ARCHITEKTURA TYPU PUNKT–PUNKT

Oprócz systemów stosujących architekturę gwiazdy lub kraty istnieją tendencje do zaliczenia do klasy systemów VSAT również jedno- lub dwukierunkowych łączy satelitarnych typu punkt–punkt. Łąca te obowiązują te same ograniczenia do-

tyczące wielkości anten i strumienia danych. Muszą one ponadto mieć odpowiednie funkcje zarządzania i monitorowania. Funkcje te mogą być realizowane za pośrednictwem łącza satelitarnego lub łącza naziemnego. Umożliwiają one między innymi natychmiastowe wyłączenie terminalu VSAT, gdy parametry jego pracy odbiegają od znamionowych i mogą powodować zakłócanie innych systemów. W tego typu systemach stosować można terminale nadawczo-odbiorcze, jeśli łącze jest dwukierunkowe, lub tylko nadawcze i tylko odbiorcze, gdy łącze jest jednokierunkowe.

2. TERMINOLOGIA, DEFINICJE I JEDNOSTKI

2.1. DEFINICJE ZGODNE Z REGULAMINEM RADIOKOMUNIKACYJNYM (RR)

Definicje są zgodne z *Regulaminem radiokomunikacyjnym* (RR) oraz z terminologią z zakresu radiokomunikacji, opracowaną przez Państwową Agencję Radiokomunikacyjną na podstawie tego regulaminu.

Emisja pozapasmowa (ang. *out-of-band*) – emisja na jednej lub wielu częstotliwościach wykraczających poza niezbędną szerokość pasma, lecz znajdujących się w bezpośrednim jego sąsiedztwie, wynikająca z procesu modulacji; emisja pozapasmowa nie obejmuje promieniowań ubocznych.

Promieniowanie uboczne (ang. *spurious emission*) – promieniowanie na jednej lub wielu częstotliwościach wykraczających poza niezbędną szerokość pasma i których poziom może być zmniejszony bez wpływu na przekazywaną informację. Pojęcie to obejmuje promieniowanie harmonicznych, promieniowania pasożytnicze, produkty intermodulacji i przemiany częstotliwości, z wyjątkiem emisji pozapasmowych.

Promieniowania niepożądane (ang. *unwanted emissions*) – zespół promieniowań ubocznych i promieniowań pochodzących z emisji pozapasmowych.

Przydzielone pasmo częstotliwości (ang. *assigned frequency band*) – pasmo częstotliwości, wewnątrz którego emisja danej stacji jest dozwolona; szerokość pasma jest równa niezbędnej szerokości pasma powiększonej o podwójną wartość bezwzględną tolerancji częstotliwości. W przypadku stacji kosmicznych przydzielone pasmo częstotliwości zawiera podwójne maksymalne przesunięcie, wynikające ze zjawiska Dopplera, mogące powstać w stosunku do dowolnego punktu na powierzchni Ziemi.

Niezbędna szerokość pasma (ang. *necessary bandwidth*) – dla danej klasy emisji, szerokość pasma częstotliwości wystarczająca do zapewnienia przesyłania informacji z wymaganą szybkością i jakością w danych warunkach.

Szerokość zajmowanego pasma (ang. *occupied bandwidth*) – taka szerokość pasma częstotliwości, że średnia moc promieniowana poniżej dolnej częstotliwości granicznej i powyżej górnej częstotliwości granicznej stanowi określony procent ($\beta/2$) całkowitej średniej mocy danej emisji.

Przeznaczenie (zakresu częstotliwości) (ang. *allocation*) – wpis do tablicy przeznaczeń zakresów częstotliwości danego zakresu częstotliwości w celu wykorzystania go przez jedną lub więcej ziemskich lub kosmicznych służb radiokomunikacyjnych

lub przez służbę radioastronomiczną w określonych warunkach. Termin ten stosuje się również do rozważanego zakresu częstotliwości.

Rezerwacja (częstotliwości lub kanału radiowego) (ang. *allotment*) – wpis wyznaczonego kanału do uzgodnionego planu, przyjętego przez kompetentną konferencję, w celu użytkowania go przez jedną lub wiele administracji dla ziemskiej lub kosmicznej służby radiokomunikacyjnej w jednym lub wielu krajach lub obszarach geograficznych w określonych warunkach.

Przydzielenie (częstotliwości lub kanału radiowego) (ang. *assignment*) – upoważnienie dane przez administrację na użytkowanie przez stację radiową określonej częstotliwości lub kanału radiowego w określonych warunkach.

Stacja – jeden lub więcej nadajników bądź odbiorników albo zestaw nadajników i odbiorników wraz z aparaturą pomocniczą niezbędny do pełnienia służby radiokomunikacyjnej lub służby radioastronomicznej w danym miejscu. Każda stacja jest klasyfikowana według służby, w której uczestniczy w sposób stały lub czasowy.

Stacja ziemska (ang. *terrestrial station*) – stacja zapewniająca radiokomunikację ziemską.

Stacja naziemna (ang. *earth station*) – stacja umieszczona na powierzchni Ziemi lub w górnej części atmosfery ziemskiej, przeznaczona do łączności:

- z jedną lub wieloma stacjami kosmicznymi,
- z jedną lub wieloma stacjami tego samego rodzaju za pomocą jednego lub więcej satelitów biernych lub innych obiektów kosmicznych.

Stacja kosmiczna (ang. *space station*) – stacja umieszczona na obiekcie, który znajduje się, jest przeznaczony do wyniesienia lub jest wynoszony poza główną część atmosfery ziemskiej.

Promieniowanie (ang. *radiation*) – strumień energii w formie fal radiowych z dowolnego źródła.

Emisja (ang. *emission*) – produkt promieniowania lub wytwarzanie promieniowania przez nadawczą stację radiową. Na przykład energia promieniowana przez lokalny generator (heterodynę) odbiornika nie jest emisją, lecz promieniowaniem.

Zastępcza moc promieniowana izotropowo EIRP – iloczyn mocy doprowadzanej do anteny przez jej zysk w danym kierunku w stosunku do anteny izotropowej (zysk izotropowy lub bezwzględny).

Zakłócenie (ang. *interference*) – efekt występujący podczas odbioru radiowego niepożądaną energią spowodowany emisją, promieniowaniem lub indukcją (albo kombinacją tych emisji, promieniowań lub indukcji), objawiający się pogorszeniem jakości transmisji bądź utratą informacji.

Zakłócenia dopuszczalne (ang. *permissible interference*) – zakłócenie obserwowane lub przewidywane, którego poziom spełnia kryteria ilościowe współużytkowania, ustalone w RR lub w zaleceniach ITU-R lub dodatkowo w specjalnych uzgodnieniach, których możliwość przewiduje RR.

2.2. DEFINICJE ZGODNE ZE STANDARDAMI ETSI

Część zewnętrzna terminalu VSAT (ang. *outdoor unit*) – część terminalu instalowana w miejscu, w którym zapewniona jest bezpośrednia widoczność do użytecznego satelity i która może pracować w (zewnętrznych) warunkach atmosferycznych.

Część zewnętrzna składa się zazwyczaj z trzech podstawowych elementów:

a) podsystemu antenowego przekształcającego energię padającej fali elektromagnetycznej w energię pola elektromagnetycznego w falowodzie i odwrotnie,

b) bloku niskoszumnego LNB, stanowiącego urządzenie wzmacniające o bardzo niskiej własnej temperaturze szumowej. Wzmacnia ono odebrany sygnał w zakresie wysokiej częstotliwości RF i dokonuje konwersji częstotliwości (przesunięcia) do zakresu częstotliwości pośrednich IF,

c) wzmacniacza mocy, który służy do wzmocnienia sygnału RF o niskim poziomie w celu wypromieniowania go poprzez antenę.

Część wewnętrzna terminalu VSAT (ang. *indoor unit*) – pozostała część terminalu. Zazwyczaj instalowana wewnątrz budynku i połączona z częścią zewnętrzną. Przewód łączący obie części jest zaliczony do części wewnętrznej terminalu.

Nominalne pasmo (ang. *nominated bandwidth*) – pasmo częstotliwości określane przez producenta. Nominalne pasmo powinno obejmować wszystkie elementy transmitowanego widma o poziomie większym niż określony poziom promieniowania ubocznego. Pasma to powinno być na tyle szerokie, by uwzględnić niestabilność częstotliwości nośnej.

Stan blokady transmisji (ang. *transmissions disabled state*) – w stanie tym terminal VSAT nie ma autoryzacji na transmisję, która jest wydawana przez centralny system funkcji sterowania i nadzoru CCMF.

Stan aktywnej nośnej (ang. *carrier-on state*) – terminal VSAT jest w tym stanie, jeśli uzyskał autoryzację na transmisję od CCMF oraz nadaje sygnał.

Stan wyłączonej nośnej (ang. *carrier-off state*) – terminal VSAT jest w tym stanie, jeśli uzyskał autoryzację na transmisję od CCMF, ale nie nadaje żadnego sygnału.

2.3. JEDNOSTKI MOCY

W pracy poziom mocy oraz zastępcza moc promieniowana izotropowo są zazwyczaj podawane w dB(pW).

Dla łatwego porównywania tego poziomu z wartościami wyrażonymi w innych jednostkach sporządzono tabelę 2.1. W ostatnich dwóch kolumnach tabeli, podano odpowiednio natężenie pola elektrycznego oraz gęstość strumienia mocy występującą w odległości 10 m od izotropowego źródła. Wartości te są poprawne jedynie dla pola dalekiego.

Tabela 2.1. Porównanie jednostek

W	Oznaczenie	dB(pW)	dBm	dB(W)	Natężenie pola elektrycznego E dB(μ V/m) ($d = 10$ m)	Gęstość mocy dB(W/m ²) ($d = 10$ m)
10^{-15}	fW	-30	-120	-150	-35,23	-181
10^{-12}	pW	0	-90	-120	-5,23	-151
10^{-9}	nW	30	-60	-90	24,77	-121
10^{-6}	μ W	60	-30	-60	54,77	-91
10^{-3}	mW	90	0	-30	84,77	-61
1	W	120	30	0	114,77	-31

2.4. ZALECENIA I RAPORTY ITU

Regulamin radiokomunikacyjny [67] określa w dodatku 8 pewne podstawowe poziomy maksymalnego średniego poziomu mocy ubocznych składników na wejściu toru zasilającego antenę. Wartości tych poziomów podane dla zakresu częstotliwości od 960 MHz do 17,7 GHz są w granicach od -10 do +20 dBm, odpowiadając poziomowi od 40 do 60 dB poniżej poziomu mocy emisji podstawowej. Poziomy te nie nadają się do wykorzystania w systemach, które stosują modulacje cyfrowe. Specyficzne służby mogą wymagać niższych poziomów mocy składników ubocznych.

Zgodnie z zaleceniem nr 66 *Regulaminu radiokomunikacyjnego* (Rev. WARC-92) CCIR powinien pilnie zająć się problemem promieniowania ubocznego w służbie satelitarnej. Grupa CCIR SG1 powinna zająć się również problemami nie objętymi dodatkiem 8.

CCIR rozpoczął prace w tym zakresie w SG 4, dając odpowiedź na pytanie 25/4 w postaci raportu 713-1 pt. *Promieniowanie uboczne ze stacji naziemnych i stacji kosmicznych pracujących w służbie satelitarnej stałej* (ang. *Spurious Emissions from Earth Stations and Space Stations of the Fixed-Satellite Service*). Raport ten daje przegląd tematyki, nie zawiera natomiast żadnych zaleceń związanych z dopuszczalnymi poziomami promieniowania ubocznego.

CCIR przyjął w 1992 roku w zaleceniu 726 poziomy, które w przeważającej części są zgodne z poziomami zaproponowanymi przez ETSI/STC-SES2.

Od roku 1998 w ETSI i ITU trwają prace mające na celu opracowanie zaleceń i norm związanych z emisyjnością różnego rodzaju terminali, w tym terminali naziemnych. W odniesieniu do stacji satelitarnych VSAT i SNG TES opracowane wymagania będą zgodne z istniejącymi normami.

3. ZAKŁÓCENIA – KLASYFIKACJA, EFEKTY I DOPUSZCZALNE POZIOMY

3.1. EFEKTY WYWOŁYWANE PRZEZ PROMIENIOWANIE UBOCZNE W STACJACH ODBIORCZYCH I MAKSYMALNE DOPUSZCZALNE ZAKŁÓCENIA NA WEJŚCIU ODBIORNIKA

Efekty wywoływane przez promieniowanie uboczne w stacji odbiorczej zależą od natury tych zakłóceń oraz od charakterystyki i przeznaczenia stacji.

Promieniowanie uboczne może być, ze względu na swoje właściwości widmowe, podzielone na:

- sinusoidalne,
- modulowane; w zależności od typu modulacji efekty mogą być podobne do efektów wywołanych sygnałem sinusoidalnym (np. sygnały FM) lub podobne do efektów wywołanych przez szum termiczny (np. sygnały QPSK),
- szumopodobne.

Ze względu na czas występowania promieniowanie uboczne można podzielić na:

- ciągle,
- okresowe paczki impulsów, np. wytwarzane przez stację pracującą z dostępem z podziałem czasu TDMA lub przez radar,
- występujące czasowo, np. wytwarzane przez stacje pracujące z dostępem na żądanie,
- chwilowe (ang. *transient*).

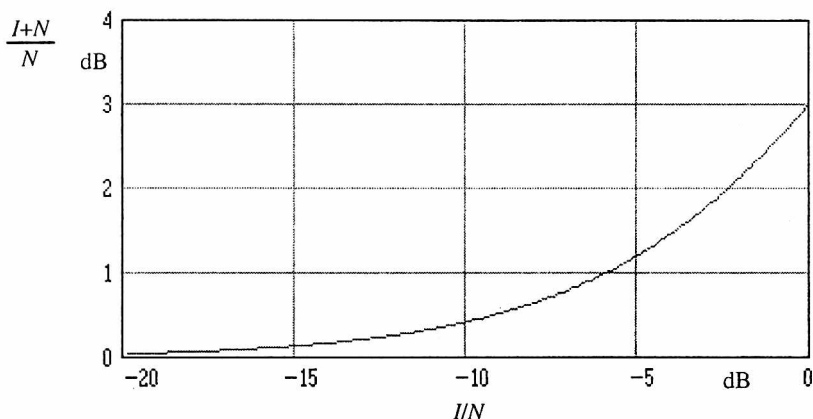
Efekty powodowane przez promieniowanie uboczne mogą być różnorodne. Przykłady występujących efektów to:

- nieprawidłowe działanie,
- chwilowe przerwy w prawidłowym działaniu,
- pogorszenie jakości obrazu w telewizyjnych stacjach odbiorczych,
- zwiększenie elementowej stopy błędów w stacjach odbierających sygnały cyfrowe,
- występowanie sekwencji błędów powodujących utratę synchronizacji,
- obniżony współczynnik dostępności stacji spowodowany obniżeniem marginesu bezpieczeństwa na zjawiska propagacyjne.

Maksymalny poziom zakłóceń dopuszczalnych na wejściu odbiornika może być zdefiniowany w dwojaki sposób:

- a) jako moc sygnału zakłócającego na wejściu odbiornika (I), która jest traktowana jako równoważny wzrost szumu cieplnego (N) na jego wejściu (zmniejszenie C/N),
- b) jako określony minimalny stosunek mocy sygnału nośnego do mocy zakłócenia (C/I).

W telekomunikacji satelitarnej korzysta się zazwyczaj z definicji maksymalnego poziomu zakłóceń dopuszczalnych w formie przedstawionej w punkcie a). Ponieważ łącza satelitarne pracują zazwyczaj z wartością C/N , wynoszącą kilka decybeli, oczywiste jest, że równoważny wzrost szumów spowodowany promieniowaniem ubocznym powinien być ułamkiem decybeli. Równoważny wzrost szumów jako funkcji stosunku poziomu zakłócenia do szumu I/N na wejściu odbiornika pokazano na rysunku 3.1. W tabeli 3.2 podano natomiast wartość stosunku zakłócenia do szumu własnego odbiornika w funkcji równoważnego wzrostu poziomu szumów.



Rys. 3.1. Równoważny wzrost poziomu szumu w funkcji stosunku zakłócenie–szum

Z tabeli 3.1 można wyznaczyć poziom zakłócenia w stosunku do szumów własnych odbiornika, który spowoduje obniżenie stosunku C/N o określoną wartość. Jeśli np. dopuszczamy w danym systemie pogorszenie stosunku C/N o 1 dB, to zakłócenie powinno być 5,9 dB poniżej poziomu szumów własnych odbiornika. Jeśli natomiast system dopuszcza jedynie degradację stosunku C/N o 0,1 dB, to poziom zakłócenia musi być mniejszy o 16,3 dB od poziomu szumów własnych odbiornika. Przy wartości stosunku I/N bliskiej 0 dB należy bardzo ostrożnie interpretować wyniki analizy.

Tabela 3.1. Wzrost poziomu całkowitych zakłóceń w funkcji stosunku zakłócenie–szum własny

$(I + N)/N$ dB	3	2	1	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05
I/N dB	0	-2,3	-5,9	-9,1	-11,5	-13,3	-16,3	-19,4
$\Delta T/T$ %	100	58	26	12	7	4,7	2,3	1,2

W systemach satelitarnych wpływ sygnału zakłócającego ujmuje się także jako względny przyrost temperatury szumowej systemu odbiorczego. Przyrost ten można

określić na podstawie znajomości temperatury szumowej systemu oraz poziomu zakłócenia I lub spadku stosunku C/N spowodowanego pojawieniem się zakłócenia. Jeśli równoważną moc szumów własnych na wejściu systemu odbiorczego oznaczmy przez N , a poziom zakłóceń przez I , to:

$$N = k T B,$$

$$I = k \Delta T B,$$

stąd

$$I + N = k B (T + \Delta T),$$

$$\frac{I + N}{N} = \frac{T + \Delta T}{T},$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{I + N}{N} - 1. \quad (3.1)$$

Wartości względnej zmiany temperatury szumowej systemu odbiorczego w funkcji zmiany stosunku C/N przedstawiono w tabeli 3.1.

W niektórych przypadkach takie podejście może jednak prowadzić do zbyt optymistycznej interpretacji wyników. Jak powiedziano wcześniej, reakcja odbiornika jest ściśle uzależniona od jego charakterystyki i typu zakłócenia. Niepoprawna praca demodulatora paczek impulsów może wystąpić już wówczas, gdy I/N wynosi -10 dB, jeśli zakłóceniem jest sygnał sinusoidalny o częstotliwości, na której pracuje demodulator (lub odstrojonej od niej o częstotliwość zegara danych). Dlatego też efekty wywołane promieniowaniem ubocznym należy rozpatrywać indywidualnie, biorąc pod uwagę rodzaj zakłócaney służby i charakterystykę zakłócenia. W Stanach Zjednoczonych FCC przyjęła, że do zapewnienia prawidłowej pracy określonych służb z określoną jakością wymagany jest pewien minimalny stosunek nośnej C do wypadkowego sygnału zakłócającego I . Poziomy dla różnych typów transmisji dla satelitarnej służby stałej FSS przedstawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Dopuszczalne poziomy zakłóceń transmisji dla satelitarnej służby stałej według FCC

Typ transmisji	C/I , dB	E_b/N_0 , dB
FM/TV; studyjna jakość	28	–
FM/TV; dobra jakość	22	–
Transmisja cyfrowa; cały transponder	–	25
Transmisja cyfrowa; wąskopasmowa, SCPC, T1 (1,544 Mb/s)	–	20
Transmisja cyfrowa; wąskopasmowa, SCPC, (54 kb/s)	–	20
Transmisja z rozproszonym widmem	–	20
FM-SCPC zakłócana głosem	maksymalny poziom zakłócenia nie może przekraczać 1000 pW w najgorszym kanale	
FM-SCPC sygnał foniczny	24	–

Naziemna stacja satelitarna jako źródło zakłóceń dla naziemnych linii radiowych powoduje wzrost wypadkowego sygnału zakłócającego. Należy jednak zaznaczyć, że na skutek bardzo dużego marginesu interferencyjnego stosowanego w naziemnych liniach radiowych (ok. 35 dB) wzrost wypadkowego zakłócenia o np. 0,5 dB nie powoduje znaczącego pogorszenia jakości transmisji i czasu dostępności linii.

Maksymalne zakłócenia dopuszczalne na wejściu odbiornika zależą bezpośrednio od poziomu odbieranej nośnej sygnału użytecznego, szumów własnych systemu odbiorczego oraz dopuszczalnego dla danego typu emisji stosunku C/N lub E_b/N_0 . Wymagany do zapewnienia odpowiedniej elementowej stopy błędów (prawidłowej pracy systemu) stosunek C/N lub E_b/N_0 zależy jedynie od rodzaju modulacji i detekcji sygnału. Wzory pozwalające określić prawdopodobieństwo przekłamania bitu P_b w funkcji E_b/N_0 dla najczęściej stosowanych w radiokomunikacji satelitarnej rodzajów modulacji zamieszczono w tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Prawdopodobieństwo przekłamania bitu P_b dla różnych typów modulacji i demodulacji fazy

Typ modulacji	Typ kodowania	Typ demodulacji	Oznaczenie	Prawdopodobieństwo P_b
BPSK	bezpośrednie	koherentna	BPSK	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$
QPSK	bezpośrednie	koherentna	QPSK	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$
MSK	bezpośrednie	koherentna	MSK	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$
BPSK	różnicowe	koherentna	DE-BPSK	$\operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$
QPSK	różnicowe	koherentna	DE-QPSK	$\operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}}$
BPSK	różnicowe	różnicowa	D-BPSK	$\frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{N_0}\right)$
QPSK	różnicowe	różnicowa	D-QPSK	wzór pod tabelą *)

$$*) \exp\left(-2 \frac{E_b}{N_0} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}+1}\right)^2 I_k\left(\sqrt{2} \frac{E_b}{N_0}\right) - \frac{1}{2} I_0\left(\sqrt{2} \frac{E_b}{N_0}\right) \exp\left(-2 \frac{E_b}{N_0}\right)\right),$$

I_0 i I_k są funkcjami Bessela II rodzaju.

W naziemnych liniach radiowych jakość transmisji wyraża się zazwyczaj przez podanie stosunku C/N , w łączach satelitarnych natomiast stosuje się częściej stosunek E_b/N_0 określający średnią wartość energii przypadającej na 1 bit do jednostronnej widmowej gęstości szumu będącej średnią mocą szumu w pasmie 1 Hz.

Dla większości systemów telekomunikacyjnych zastępcza szumowa szerokość pasma odbiornika jest większa niż teoretyczna minimalna szerokość pasma Nyquista. W celu porównania systemów teoretycznych korzystających z minimalnych szerokości pasma z systemami rzeczywistymi zajmującymi zazwyczaj szersze pasmo stosuje się zależność

$$\frac{E_b}{N_0} = \left(\frac{C}{R_b} \right) \frac{1}{N_0} = \left(\frac{C}{N_0} \right) \frac{1}{R_b} = \left(\frac{C}{N_0 B} \right) \frac{B}{R_b} = \left(\frac{C}{N} \right)_B \frac{B}{R_b}, \quad (3.2)$$

w której:

E_b – średnia energia przypadająca na 1 bit = CT_b ,

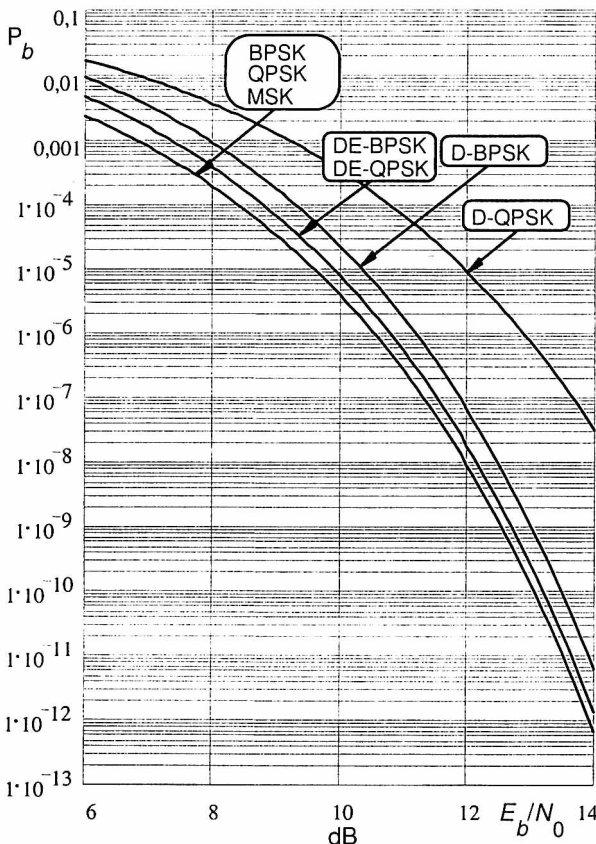
R_b – szybkość transmisji bitów $R_b = 1/T_b$,

T_b – czas trwania transmisji 1 bitu,

C – średnia moc nośnej,

N_0 – moc szumu w pasmie 1 Hz,

B – zastępcza szumowa szerokość pasma odbiornika.



Rys. 3.2. Teoretyczne prawdopodobieństwo przekłamania bitu P_b (bitowa stopa błędów) dla modemów pracujących w trybie BPSK, QPSK, DE-BPSK, DE-QPSK, D-BPSK i D-QPSK (oznaczenia zgodne z tab. 3.3)

Łącza satelitarne pracują z dużo większą niezawodnością niż naziemne linie radiowe. W systemach VSAT prawdopodobieństwo wystąpienia błędu jest rzędu 10^{-7} [57]. Najczęściej stosowanym w Europie rodzajem modulacji w systemach VSAT jest modulacja BPSK (2 – PSK) oraz QPSK (4 – PSK). Znając prawdopodobieństwo wystąpienia błędu w łączu, możemy z rysunku 3.2 określić stosunek E_b/N_0 lub, przekształcając zależność (3.2), wyznaczyć C/N .

Jeśli przez M określimy liczbę stanów, przy czym $M = 2, 4, 8, 16$ itd., to liczba bitów potrzebnych do przesłania informacji o każdym ze stanów wynosi n

$$n = \log_2(M), \quad (3.3)$$

a niezbędna szerokość pasma B

$$B = \frac{R_b}{n}. \quad (3.4)$$

Dla stacji satelitarnej z małą anteną (VSAT) nadającej z szybkością 64 kb/s i korzystającej z modulacji QPSK ($M = 4, n = 2$) uzyskamy prawdopodobieństwo wystąpienia błędu na poziomie 10^{-7} dla E_b/N_0 równego 11,3 dB. Wymagana minimalna szerokość pasma wynosi 32 kHz, a stosunek C/N obliczony z zależności (3.2) wynosi 14,3 dB. W rzeczywistych systemach szerokość pasma jest większa niż teoretyczna, a prawdopodobieństwo wystąpienia błędu nie uwzględnia powszechnie stosowanych metod kodowego zabezpieczenia transmisji FEC lub systemu transmisji z potwierdzeniem ARQ.

3.2. ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA UBOCZNEGO

3.2.1. POTENCJALNE ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA UBOCZNEGO

Poziomy graniczne promieniowania ubocznego wytwarzanego w zakresie częstotliwości powyżej 1 GHz powinny być ściśle zdefiniowane dla wszelkiego rodzaju urządzeń i ich elementów, które mogą zakłócać środowisko elektromagnetyczne. Do urządzeń tych i ich elementów zaliczają się:

- okablowanie i obudowy,
- urządzenia odbiorcze (np. satelitarne odbiorniki TVRO mogą generować promieniowanie uboczne z generatora lokalnego powodujące duże zakłócenia),
- urządzenia przemysłowe (np. grzejniki mikrofalowe),
- radary dopplerowskie,
- wykrywacze ruchu.

3.2.2. PARAMETRY OKREŚLAJĄCE PROMIENIOWANIE UBOCZNE

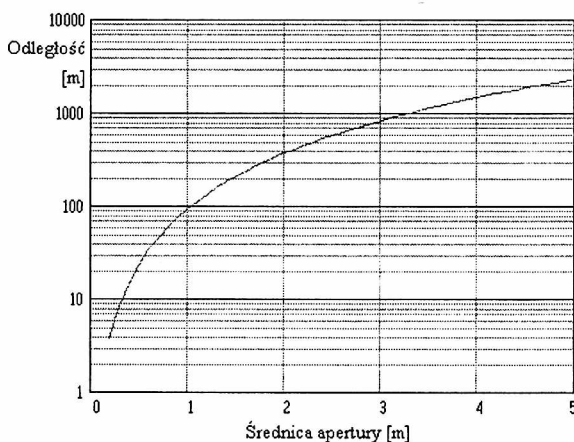
Poziom promieniowania ubocznego ze stacji satelitarnej może być wyrażony w formie *EIRP*. Dlatego też poziomy graniczne mogą być określone również w tej formie. Dopuszczalne promieniowanie uboczne odbierane przez stację odbiorczą może być wyrażone w formie mocy całkowitej docierającej do odbiornika w pasmie jego pracy. Powody takiego definiowania poziomów dopuszczalnych są następujące:

- emisja pożądana również jest określona przez podanie wartości *EIRP*. Ułatwia to porównanie poziomu tej emisji do poziomu promieniowania niepożądanego,
- *EIRP* jest niezależna od odległości (wyłączając zjawiska związane z polem bliskim),
- *EIRP* łatwo stosować w analizach kompatybilnościowych.

Takie określenie poziomów dopuszczalnych nie oznacza jednak, że zalecane są bezpośrednie pomiary *EIRP*.

Jak stwierdzono wcześniej, poziom promieniowania ubocznego może być określony za pomocą *EIRP*. W przypadku pomiarów konieczne jest użycie odbiornika pomiarowego z anteną pomiarową o ściśle określonym zysku. Na podstawie odległości pomiędzy urządzeniem badanym i anteną pomiarową wartość *EIRP* może być łatwo obliczona.

Wartość *EIRP* jest zwykle wyznaczana na podstawie pomiarów natężenia pola elektromagnetycznego. Należy przy tym zwrócić szczególną uwagę na wykonywanie tych pomiarów w polu dalekim. Często, ze względu na czułość systemu pomiarowego i inne czynniki, pomiarów dokonuje się w odległościach znacznie mniejszych, np. 10 m. Należy wtedy zwrócić szczególną uwagę na sensowność uzyskiwanych wyników i ich interpretację. Na rysunku 3.3 przedstawiono odległość do strefy dalekiej w funkcji wielkości apertury promieniującej przy częstotliwości 14 GHz.



Rys. 3.3. Odległość do strefy dalekiej (m) w funkcji rozmiarów apertury promieniującej D (m) przy częstotliwości 14 GHz

Pomiary *EIRP* dla każdego kierunku, każdej polaryzacji i dla wszystkich częstotliwości są bardzo czasochłonne. W praktyce wystarczy do celów analizy kompatybilności zmierzyć jedynie znaczące promieniowania uboczne w kierunku maksymalnej *EIRP* w głównej płaszczyźnie polaryzacji.

W strefie dalekiej istnieje dokładny związek pomiędzy *EIRP* a gęstością strumienia mocy w danej odległości.

Natężenie pola elektromagnetycznego jest wielkością stosowaną do określenia poziomów granicznych dla częstotliwości poniżej 1 GHz (CISPR 22, EN 55022). Może być mierzone zarówno w polu dalekim, jak i bliskim. Prosta zależność pomiędzy natężeniem pola elektromagnetycznego a *EIRP* istnieje jedynie w polu dalekim.

Satelitarne stacje naziemne są zazwyczaj wyposażone w anteny reflektorowe. Dla tego typu stacji poziomy graniczne promieniowania ubocznego mogą być mierzone na wejściu anteny jako poziomy mocy promieniowania ubocznego (ang. *spurious power level*). Należy wtedy zwrócić uwagę na następujące zjawiska:

- nie uwzględnia się promieniowania z okablowania oraz przez obudowy,
- pomiary są szybkie i dokładne, jeśli wejście anteny jest współosiowe,
- jeśli wejście anteny stanowi falowód, to pomiary poziomów mocy promieniowania ubocznego przy częstotliwościach dalekich od nominalnej są bardzo trudne (falowody w porównaniu do torów współosiowych mają znacznie węższe pasmo przepustowe),
- jeśli wejście anteny stanowi falowód, to nie można dokonać pomiaru poziomów mocy promieniowania ubocznego przy częstotliwościach poniżej częstotliwości odcięcia falowodu,
- obliczenie *EIRP* na podstawie poziomu mocy na wejściu anteny przy częstotliwościach dalekich od nominalnej jest zwykle niemożliwe, ponieważ nie jest znana charakterystyka promieniowania anteny dla tych częstotliwości,
- w coraz częściej spotykanych tanich stacjach kompaktowych wejście anteny jest zintegrowane z resztą stacji i jest niedostępne dla pomiarów,
- moc na wejściu anteny odpowiada *EIRP* zsumowanej po wszystkich kierunkach i dlatego jest dobrą miarą potencjalnego zakłócenia.

Zalecane pasmo pomiarowe zależy od sposobu transmisji wykorzystywanej przez stację zakłócaną. Dla szeregu typów transmisji jest ono zdefiniowane np.:

- 4 kHz dla transmisji FDM/FM,
- 100 kHz dla 64 kb/s przy QPSK z 3/4 – FEC.

Niezależnie od szerokości tego pasma należy zwrócić uwagę na to, że:

- pasmo pomiarowe jest rozumiane jako pasmo szumowe stosowanej aparatury pomiarowej,
- ze względu na typowe szerokości pasma pomiarowego spotykane w aparaturze pomiarowej (typowo sekwencja 1 – 3 – 10), odchylenie pasma aparatury od zalecanego pasma pomiarowego o współczynnik 2 powinno być dozwolone,
- gdy mierzony sygnał jest cyfrowo modulowany lub jego widmo ma charakter szumowy (z pasmem większym niż pasmo pomiarowe), zmierzone wartości powinny być przeliczone na wymagane szerokości pasma,
- jeśli mierzony sygnał ma pasmo stanowiące ułamek użytego pasma pomiarowego (np. pojedyncza linia w widmie), nie ma potrzeby dokonania przeliczenia.

Służby korzystające z zakresu częstotliwości powyżej 1 GHz mają różnorodne kryteria związane z dopuszczalnym poziomem sygnału zakłócającego. Dlatego też

określenie poziomów dopuszczalnych promieniowania ubocznego odbywa się dla określonych podzakresów. W podzakresach tych bierze się pod uwagę najbardziej wrażliwe na zakłócenia służby.

W zależności od konstrukcji stacji nadawczych, promieniowanie uboczne (promieniowanie oscylatora lokalnego, harmoniczne) może występować tylko na specyficznych częstotliwościach. Ze względu na producentów, w wielu normach stawia się bardzo ostre poziomy graniczne z rozluźnianiem ich dla szczególnych pasm lub częstotliwości. Przykładem tu może być zalecenie CCIR 726, § 2 [16] lub norma ETS 300 159, § 4.2.1, p. 3 [32]. Mogą z tego wynikać różnorodne problemy interferencyjne, gdyż promieniowanie uboczne na tych częstotliwościach lub zakresach może zakłócać pasma przyznane innym służbom.

3.2.3. PROMIENIOWANIE W GŁÓWNEJ WIĄZCE ANTENY NAZIEMNEJ STACJI SATELITARNEJ

Stacje satelitarne pracujące w zakresach gigahercowych są zazwyczaj wyposażone w anteny o dużej kierunkowości. Współpraca ze stacją kosmiczną wymaga dość dużych kątów elewacji. Dlatego też nie ma praktycznie możliwości zakłócania innych służb naziemnych przez promieniowanie uboczne głównej wiązki promieniowania anteny.

Komitet Techniczny Satelitarnych Stacji Naziemnych ETSI (TC-SES) zgodził się na wyłączenie kierunku głównej wiązki promieniowania anteny od ograniczeń związanych z dopuszczalną wartością promieniowania ubocznego. Zgodnie z normami ETSI dotyczącymi stacji naziemnych VSAT [31, 32], SNG [64], TVRO-FSS [61] i TVRO-BSS [63], obszar promieniowania pożądanego znajduje się wewnątrz kąta wynoszącego 7° , licząc od osi głównej wiązki promieniowania anteny. Przyjęcie tej wartości jako szerokości obszaru promieniowania pożądanego jest podyktowane następującymi przyczynami:

- naziemne stacje satelitarne pracują zwykle z antenami o kącie elewacji większym niż 7° ; praktycznie niemożliwe jest więc, by zakłócany obiekt znajdował się bliżej niż 7° od osi wiązki głównej,
- w typowych specyfikacjach charakterystyki promieniowania anteny naziemnej stacji satelitarnej wymaga się, aby szczyty listków bocznych miały zysk poniżej wartości 8 dBi, dla kątów liczonych od osi wiązki głównej z zakresu od 7° do $9,2^\circ$ i mniej dla kątów większych.

Oczywiste jest, że inne służby, takie jak służby lotnicze stałe i ruchowe lub systemy satelitarne korzystające z satelitów na niskich orbitach LEO (ang. *Low Earth Orbit*), mogą być zakłócanie przez emisję w głównej wiązce promieniowania. Zakłócenia te będą miały charakter przejściowy związany z poruszaniem się stacji odbiorczej. Dlatego też dalsze badania są konieczne, by określić prawdopodobieństwo wystąpienia tego typu zakłóceń i ocenić czy wyłączenie obszaru głównej wiązki promieniowania spod rozważań jest w odniesieniu do wcześniej wymienionych nowych systemów słuszne.

4. MODELE INTERFERENCYJNE

Praktyczną metodą wyznaczenia odpowiednich poziomów granicznych promieniowania ubocznego i stopnia zagrożenia interferencyjnego jest budowa modelu matematycznego, opartego na pewnych założeniach i warunkach.

Założenia mogą dotyczyć przyjęcia w modelu tzw. najgorszego przypadku lub też być związane z sytuacją typową lub reprezentatywną. W odniesieniu do tego wynik symulacji może zmieniać się od braku zakłóceń w każdym przypadku do prawdopodobieństwa wystąpienia sytuacji konfliktowej poniżej określonej wartości przy reprezentatywnych parametrach charakteryzujących określoną grupę stacji.

Zastosowanie modelu symulacyjnego może pokazać, że z technicznego punktu widzenia niemożliwe jest uzyskanie pełnej kompatybilności w najgorszym przypadku. Wówczas jedynym rozwiązaniem jest kompromis pomiędzy kosztami rozwiązania sytuacji konfliktowej a kosztami związanymi z przyjęciem odpowiednich poziomów granicznych promieniowania ubocznego. Znalezienie tego kompromisu może być najbardziej krytycznym miejscem w drodze do znalezienia odpowiednich poziomów granicznych.

W dalszej części rozdziału przedstawiono model terminalu VSAT jako źródła zakłóceń. Model ten oparto na obowiązujących w Europie standardach ETSI [31, 32]; jest on stosowany do określenia poziomu zagrożenia interferencyjnego.

4.1. PODSTAWOWE PARAMETRY MODELU

4.1.1. CHARAKTERYSTYKA STACJI ZAKŁÓCANEJ

W celu określenia poziomu zagrożenia interferencyjnego stacji należy znać jej podstawowe parametry. Zaliczyć do nich można:

a) parametry anteny umożliwiające wyznaczenie zysku anteny w kierunku, z którego dociera sygnał zakłócający,

b) poziom szumu fluktuacyjnego N na wejściu odbiornika. Wielkość ta jest potrzebna, jeśli maksymalny poziom zakłóceń jest zdefiniowany w odniesieniu do szumu fluktuacyjnego lub wzrostu równoważnego szumu fluktuacyjnego.

Moc szumu fluktuacyjnego N (W) na wejściu odbiornika można wyznaczyć ze wzoru

$$N = kTB, \quad (4.1)$$

w którym:

k – stała Boltzmanna ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K),

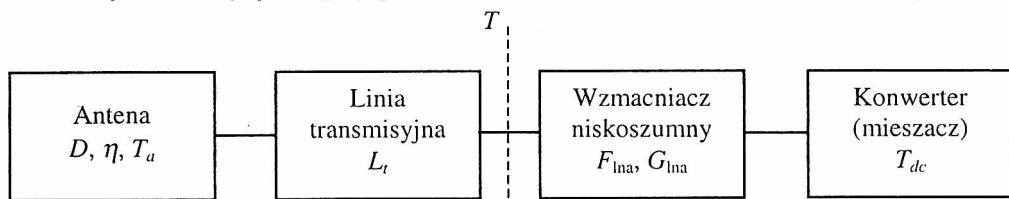
T – równoważna temperatura szumowa systemu odbiorczego, K,

B – równoważna szumowa szerokość pasma odbiornika, Hz.

OKREŚLENIE TEMPERATURY SZUMOWEJ SYSTEMU ODBIORCZEGO

Podczas wyznaczania poziomu szumów własnych systemu odbiorczego najlepiej jest posługiwać się danymi producenta. Zwykle nie ma problemów z określeniem szerokości pasma systemu, często jednak producent nie podaje temperatury szumowej systemu odbiorczego, dostępne są jedynie dane techniczne poszczególnych elementów tego systemu. Należą do nich:

- reflektor o określonej średnicy apertury D i współczynniku wykorzystania apertury η ,
- niskoszumny wzmacniacz o współczynniku szumów F_{lna} lub o równoważnej temperaturze szumowej T_{lna} oraz o wzmacnieniu G_{lna} ,
- konwerter (mieszacz) o temperaturze szumowej T_{dc} ,
- straty transmisji pomiędzy promiennikiem a wzmacniaczem niskoszumnym L_t .



Rys. 4.1. Schemat toru odbiorczego stacji naziemnej do określenia zastępczej temperatury szumowej systemu odbiorczego odniesionej do wejścia wzmacniacza niskoszumnego

Na podstawie wymienionych danych można obliczyć zastępczą temperaturę szumową systemu odbiorczego odniesioną do wejścia wzmacniacza niskoszumnego na podstawie następujących zależności.

Zastępczą temperaturę szumową niskoszumnego wzmacniacza można określić według wzoru

$$T_{\text{lna}} = (10^{\frac{F_{\text{lna}}}{10}} - 1)T_0, \quad (4.2)$$

w którym:

F_{lna} – współczynnik szumów wzmacniacza, dB,

T_0 – temperatura standardowa 290 K.

Dla wzmacniacza o współczynniku szumów 1 dB (bardzo dobry) zastępcza temperatura szumowa wyznaczona ze wzoru (4.2) wynosi 75 K.

Zastępczą temperaturę szumową systemu odbiorczego w warunkach czystej atmosfery można określić ze wzoru

$$T_e = \frac{T_a}{L_t} + \frac{L_t - 1}{L_t} T_0 + T_{\text{lna}} + \frac{T_{dc}}{G_{\text{lna}}}. \quad (4.3)$$

Dla typowych parametrów stacji odbiorczej:

T_{a0} – 60 K (temperatura szumowa anteny w warunkach czystej atmosfery),

L_t – 0,3 dB (1,072),

T_{dc} – 10^4 K,

G_{lna} – 60 dB (10^6),

temperatura ta wynosi 150 K. Jeśli rozchodząca się w atmosferze fala elektromagnetyczna ulega tłumieniu, związanemu np. z opadami atmosferycznymi, to temperatura szumowa anteny wzrasta zgodnie z wzorem

$$T_a = T_f \left(1 - \frac{1}{L_r} \right) + \frac{T_{a0}}{L_r}. \quad (4.4)$$

Temperatura T_f jest temperaturą fizyczną atmosfery. W naszej strefie klimatycznej tłumienie L_r o wartości 5 dB jest przekraczane w 0,02% czasu w roku. Przy takim tłumieniu temperatura szumowa anteny wynosi 206 K (zbliża się do temperatury otoczenia), a zastępcza temperatura szumowa systemu odbiorczego wynosi 286 K. Do celów analizy wrażliwości terminalu VSAT założono zastępczą temperaturę szumową równą 200 K.

Naziemne linie radiowe pracują z bardzo dużym marginesem interferencji. Oznacza to, że przy sprzyjających warunkach atmosferycznych sygnały zakłócające nie powodują istotnego pogorszenia jakości łącza. Wpływ sygnałów zakłócających jest bardziej znaczący wówczas, gdy tego marginesu nie ma lub jest bardzo mały. Dzieje się tak w warunkach silnego tłumienia sygnału przez atmosferę, wtedy rośnie również temperatura szumowa systemu odbiorczego. Dlatego też podczas analizy wrażliwości stacji linii radiowych przyjęto temperaturę 800 K.

4.1.2. CHARAKTERYSTYKA STACJI ZAKŁÓCAJĄCEJ

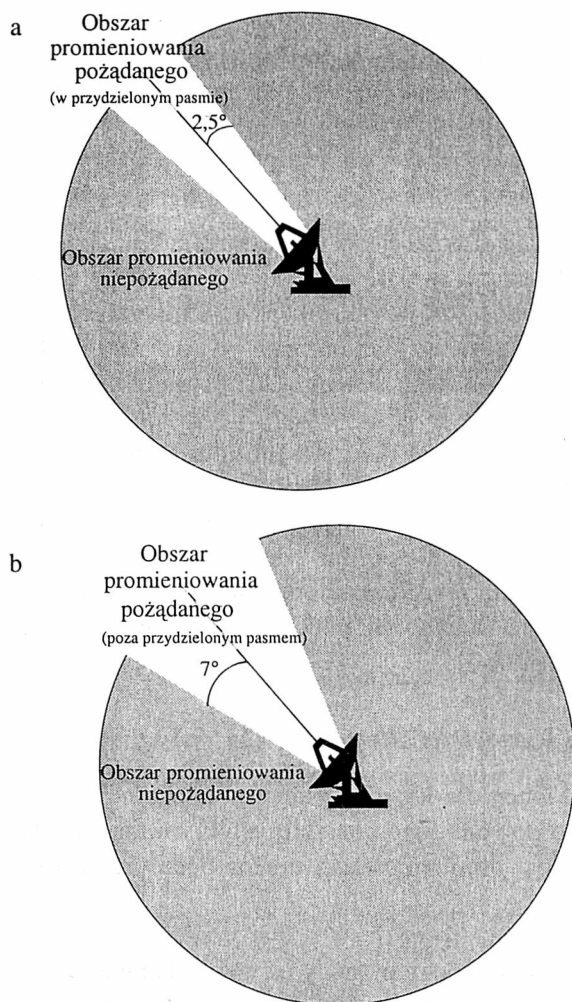
Terminal VSAT stanowi źródło zakłóceń dla innych systemów telekomunikacyjnych naziemnych i satelitarnych. Z tego powodu jego charakterystyki muszą być dokładnie znane i ściśle ograniczone. Poziom promieniowania można podawać w dowolny sposób, jako:

- a) EIRP w kierunku zakłócającej stacji,
- b) charakterystykę promieniowania anteny i poziom mocy na wejściu anteny.

Podczas definiowania odpowiednich poziomów dopuszczalnych należy rozważyć cztery przypadki. Dwa z nich są związane z promieniowaniem ubocznym (promieniowanie poza przydzielonym pasmem), a dwa z promieniowaniem pożądanym (promieniowanie w przydzielonym pasmie).

W przypadku terminali VSAT istnieją zalecenia szczegółowo opisujące te stacje jako źródła zakłóceń. W wystarczający sposób promieniowanie z tych stacji ograniczają normy ETS 300 157 [31], ETS 300 159 [32] oraz prETS 300 327 [64]. Z praktycznego punktu widzenia najsilniejsze zakłócenia interferencyjne wystąpią od nadawczych stacji VSAT i SNG. W dokumentach ETSI stacje te są opisane w podobny sposób.

Promieniowanie uboczne (promieniowanie poza przyznanym pasmem) należy oddzielnie analizować dla obszaru promieniowania pożądanego ograniczonego główną wiązką promieniowania anteny (ang. *on axis*) oraz dla obszaru promieniowania niepożądanego, czyli poza główną wiązką promieniowania anteny (ang. *off axis*) (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Obszar promieniowania pożądanego i niepożądanego terminalu VSAT: a) w przydzielonym pasmie, b) poza przydzielonym pasmem

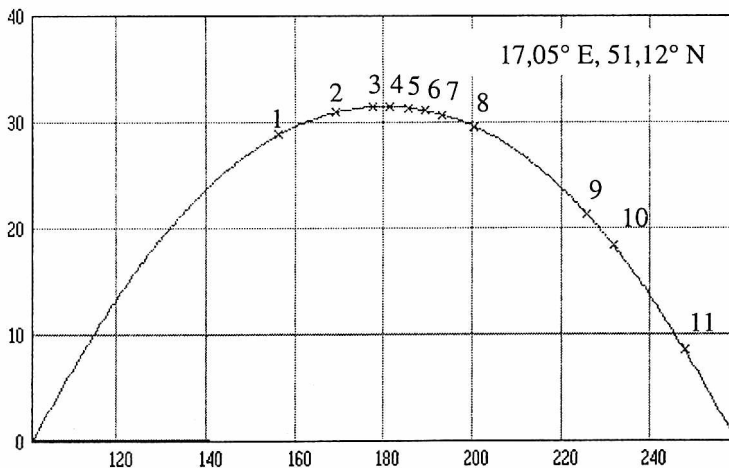
Obszar promieniowania pożądanego naziemnych stacji satelitarnych nie stanowi zagrożenia dla innych służb naziemnych. W obszarze tym definiuje się dopuszczalne poziomy promieniowania w pasmie użytecznym oraz poza tym pasmem (promieniowanie uboczne). Dla naziemnych stacji satelitarnych zlokalizowanych na terytorium Polski i współpracujących z satelitami geostacjonarnymi przeznaczonymi do łączności w systemach VSAT kąt elewacji głównej wiązki promieniowania anteny wyklucza powstanie sytuacji interferencyjnej ze stacją innej służby naziemnej (stacją ziemską) (rys. 4.2 i 4.3) spowodowanej lokalizacją stacji zakłócającej w obszarze promieniowania pożądanego. Efekt związany z rozpraszaniem w troposferze sygnału emitowanego w obszarze promieniowania pożądanego i możliwość zakłócania innych służb naziemnych przez ten sygnał przedstawiono w rozdziale 10. Analiza opiera się na dokumentach ITU i polega na określeniu konturu koordynacyjnego, który jest niezbędny w międzynarodowej koordynacji stacji satelitarnej. Wpływ tego

sygnału może być wyeliminowany za pomocą odpowiedniej koordynacji częstotliwości, jak to przedstawiono w dalszej części pracy (p. 7.5). Obszar promieniowania pożądanego należy uwzględniać podczas analizy interferencji pomiędzy systemami satelitarnymi korzystającymi z tej samej lub zlokalizowanej w tym samym miejscu stacji kosmicznej (tego samego satelity lub satelity umieszczonego na tej samej pozycji). Analizy tego typu nie są przedmiotem tej pracy. Obszar promieniowania pożądanego stanowi również potencjalne zagrożenie dla urządzeń radiokomunikacyjnych, nawigacyjnych i elektroniki znajdujących się na pokładzie statku powietrznego, który wszedł w obszar promieniowania pożądanego. Dokładną analizę tego zagadnienia zaprezentowano w dalszej części pracy.

Obszar promieniowania niepożądanego naziemnych stacji satelitarnych stanowi źródło zakłóceń dla służb naziemnych. Wyróżnia się promieniowanie w przydzielonym pasmie częstotliwości (w przydzielonym kanale lub grupie kanałów) oraz poza pasmem tzw. promieniowanie uboczne.

Tabela 4.1. Azymut i elewacja do satelitów geostacjonarnych z Wrocławia ($17,05^{\circ}$ E, $51,12^{\circ}$ N)

Numer satelity	Nazwa satelity	Pozycja	Azymut	Elewacja
1	Eutelsat II F-5	$36,0^{\circ}$ E	$156,2^{\circ}$	$28,8^{\circ}$
2	Eutelsat I F-1	$25,5^{\circ}$ E	$169,2^{\circ}$	$30,9^{\circ}$
3	Astra	$19,2^{\circ}$ E	$177,2^{\circ}$	$31,4^{\circ}$
4	Eutelsat II F-3	$16,0^{\circ}$ E	$181,3^{\circ}$	$31,5^{\circ}$
5	Eutelsat II F-1	$13,0^{\circ}$ E	$185,2^{\circ}$	$31,4^{\circ}$
6	Eutelsat II F-2	$10,0^{\circ}$ E	$189,0^{\circ}$	$31,1^{\circ}$
7	Eutelsat II F-4	$7,0^{\circ}$ E	$192,8^{\circ}$	$30,7^{\circ}$
8	Eutelsat I F-2	$1,0^{\circ}$ E	$200,3^{\circ}$	$29,5^{\circ}$
9	Intelsat K	$21,5^{\circ}$ W	$225,7^{\circ}$	$21,3^{\circ}$
10	Intelsat VI F-1	$27,5^{\circ}$ W	$231,7^{\circ}$	$18,3^{\circ}$
11	Panamsat	$45,0^{\circ}$ W	$247,6^{\circ}$	$8,5^{\circ}$



Rys. 4.3. Widok na orbitę geostacjonarną z Wrocławia (krzyżykami oznaczono pozycje satelitów)

4.1.2.1. PROMIENIOWANIE W PRZYDZIELONYM PASMIE W OBSZARZE PROMIENIOWANIA NIEPOŻĄDANEGO

Zakłócanie stacji naziemnych przez promieniowanie w przydzielonym pasmie może wystąpić jedynie w przypadku wspólnego użytkowania tego samego pasma częstotliwości. Dla terminali VSAT oraz dla naziemnych stacji satelitarnych służby reporterskiej SNG podane są dopuszczalne poziomy tego promieniowania. Określa je *EIRP* w pasmie 40 kHz w funkcji kąta od osi głównej wiązki promieniowania anteny.

Dla nadawczo-odbiorczych terminali VSAT poziomy te dla polaryzacji zamierzonej są następujące:

$33-25 \log(\varphi) - 10 \log(N)$	dB(W) dla	$2,5^\circ < \varphi \leq 7,0^\circ$,
$12-10 \log(N)$	dB(W) dla	$7,0^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ$,
$36-25 \log(\varphi) - 10 \log(N)$	dB(W) dla	$9,2^\circ < \varphi \leq 48^\circ$,
$-6-10 \log(N)$	dB(W) dla	$\varphi > 48^\circ$,

a dla polaryzacji ortogonalnej:

$23-25 \log(\varphi) - 10 \log(N)$	dB(W) dla	$2,5^\circ < \varphi \leq 7,0^\circ$,
$2-10 \log(N)$	dB(W) dla	$7,0^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ$.

N jest maksymalną liczbą terminali VSAT, które mogą jednocześnie nadawać w tym samym pasmie częstotliwości. Liczba ta musi być określona przez projektanta systemu lub operatora.

Dla naziemnej stacji satelitarnej służby reporterskiej SNG nie ma rozgraniczenia dla polaryzacji zamierzonej i ortogonalnej. Należy przyjmować wartości jak dla stacji VSAT i polaryzacji zamierzonej z wartością $N = 1$.

Dopuszczalne poziomy emisji w pasmie użytecznym i obszarze niepożądanym mają znaczenie jedynie dla służb naziemnych stałych pracujących w zakresie częstotliwości od 12,75 do 13,25 i od 14,3 do 14,8 GHz (RR8-133 i RR8-136) (zakres ten jest wspólnie użytkowany przez służby stałe naziemne i służby stałe satelitarne VSAT i SNG).

W normie ETS 300 159 [32] wymienione zalecenia wprowadzono w celu ochrony innych służb satelitarnych (p. 6.4 normy ETS 300 159). Należy zatem spodziewać się, że inne służby naziemne nie będą zakłócanie (nie pracują w tym pasmie częstotliwości) lub wymienione poziomy nie stanowią dostatecznego zabezpieczenia dla tych służb. Ponieważ *Regulamin radiokomunikacyjny* dopuszcza współużytkowanie zakresu 14 GHz przez oba rodzaje służb, należy zatem dokonać analizy stopnia zagrożenia. Analizę tę przedstawiono w dalszej części pracy (rozdz. 7.).

4.1.2.2. PROMIENIOWANIE UBOCZNE (PROMIENIOWANIE POZA PRZYDZIELONYM PASMEM) W OBSZARZE PROMIENIOWANIA NIEPOŻĄDANEGO

Dla naziemnych stacji satelitarnych nadawczo-odbiorczych z małymi antenami podane są maksymalne poziomy promieniowania ubocznego w głównej wiązce i poza

nią. Dla ochrony innych naziemnych systemów telekomunikacyjnych istotne jest jedynie promieniowanie uboczne poza główną wiązką, tzn. poza kątem 7° , liczonym od osi głównej wiązki anteny. Rozróżnia się dwa stany pracy stacji:

- stan z wyłączoną nośną (ang. *carrier-off case*) – stacja pracuje jako odbiornik,
- stan z włączoną nośną (ang. *carrier-on case*) – stacja pracuje jako nadajnik.

Dla częstotliwości większych niż 960 MHz poziomy promieniowania ubocznego są wyrażone w gęstości widmowej *EIRP*.

Dla terminali VSAT w przypadku pracy z wyłączoną nośną poziom promieniowania ubocznego wyrażony w *EIRP* w pasmie 100 kHz musi być poniżej następujących poziomów granicznych, dla wszystkich kątów liczonych od osi głównej wiązki anteny większych niż 7° :

48 dB(pW) przy częstotliwościach $0,96 \div 10,7$ GHz,

54 dB(pW) przy częstotliwościach $10,7 \div 21,2$ GHz,

60 dB(pW) przy częstotliwościach $21,2 \div 40,0$ GHz.

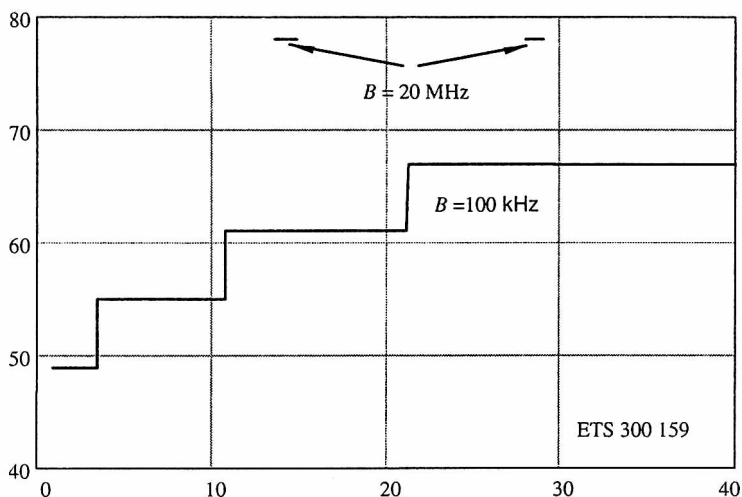
Dla terminalu VSAT w przypadku pracy z włączoną nośną poziom promieniowania ubocznego wyrażony w *EIRP* musi być poniżej następujących poziomów granicznych, dla wszystkich kątów liczonych od osi głównej wiązki anteny większych niż 7° :

49 dB(pW) w pasmie 100 kHz w zakresie częstotliwości $0,96 \div 3,4$ GHz,

55 dB(pW) w pasmie 100 kHz w zakresie częstotliwości $3,4 \div 10,7$ GHz,

61 dB(pW) w pasmie 100 kHz w zakresie częstotliwości $10,7 \div 21,2$ GHz,

67 dB(pW) w pasmie 100 kHz w zakresie częstotliwości $21,2 \div 40,0$ GHz.



Rys. 4.4. Maksymalne dopuszczalne poziomy ((dB(pW)) promieniowania ubocznego wyrażone w gęstości widmowej *EIRP* w pasmie 100 kHz (20 MHz) dla nadawczo-odbiorczego terminalu VSAT pracującego z włączoną nośną w funkcji częstotliwości (GHz) (wg ETS 300 159 [32])

W zakresie częstotliwości od 13,6 do 14,9 GHz, jeśli w pasmie o szerokości 20 MHz jeden lub więcej sygnałów promieniowania ubocznego przekracza wartość graniczną 61 dB(pW), to moc tych sygnałów należy zsumować (w watach) i wypadkowa wartość nie może przekroczyć poziomu 78 dB(pW).

W zakresie częstotliwości od 28,0 do 29 GHz, jeśli w pasmie o szerokości 20 MHz jeden lub więcej sygnałów promieniowania ubocznego przekracza wartość graniczną 67 dB(pW), to moc tych sygnałów należy zsumować (w watach) i wypadkowa wartość nie może przekroczyć poziomu 78 dB(pW).

Dla częstotliwości z zakresu 30÷960 MHz poziom emisyjności terminalu VSAT oraz stacji satelitarnej służby reporterskiej jest ograniczony dopuszczalnymi poziomami natężenia pola elektrycznego. Poziomy dopuszczalne są podane w normie ETS 300 673 [37] i są zgodne z wymaganiami zawartymi w dokumencie CISPR 22 dotyczącym urządzeń techniki informatycznej. Są one następujące:

30 dB(μ V/m) (wartość quasi-szczytowa) dla zakresu 30÷230 MHz,

37 dB(μ V/m) (wartość quasi-szczytowa) dla zakresu 230÷960 MHz.

Dopuszczalne poziomy gęstości *EIRP* odniesione do pasma 100 kHz (20 MHz) dla nadawczo-odbiorczego terminalu VSAT pracującego z włączoną nośną przedstawiono na rysunku 4.4.

Dla odbiorczych terminali VSAT i stacji satelitarnej służby reporterskiej SNG poziomy dopuszczalne promieniowania ubocznego podano odpowiednio w publikacjach [31] i [64].

4.1.3. PROPAGACJA

Propagacja jest trzecim elementem, który wchodzi do modelu interferencyjnego. Od modelu propagacyjnego zależy, jak dobrze środowisko elektromagnetyczne pomiędzy stacją zakłócającą a zakłócaną będzie opisane. Spośród modeli propagacyjnych najprostszy jest model propagacji w wolnej przestrzeni. Stosuje się go z powodzeniem w przypadku tras z bezpośrednią widocznością. W modelu tym uwzględnia się jedynie zjawisko tłumienia sygnału związane z rozproszeniem energii. Efekt ten jest nazywany tłumieniem wolnej przestrzeni. Tłumienność wolnej przestrzeni L można wyznaczyć ze wzoru

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi df}{c} \right) \text{ dB}, \quad (4.5)$$

w którym:

d – odległość pomiędzy stacjami, m,

f – częstotliwość zakłócającego sygnału, Hz,

c – prędkość światła ($3 \cdot 10^8$ m/s).

Stosuje się również bardziej zaawansowane modele propagacyjne, które uwzględniają następujące zjawiska:

- odbicie,
- łamanie,
- tłumienie spowodowane opadami,
- propagację wielodrogową,
- rozpraszanie spowodowane opadami,
- absorpcję przez gazy zawarte w atmosferze itd.

Wiele z tych efektów uwzględnianych jest często z prawdopodobieństwem wystąpienia w czasie.

4.2. MODEL ITU

Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny problem wzajemnych zakłóceń pomiędzy naziemnymi stacjami satelitarnymi i liniami radiowymi rozwiązuje przez określenie obszaru koordynacyjnego. Algorytm obliczeń przedstawiono w dodatku 28 *Regulaminu radiokomunikacyjnego* [67] oraz zaleceniach [51, 52, 53, 54], które przedstawiono w rozdziale 10. Wielkości typowych obszarów koordynacyjnych są rzędu od kilkudziesięciu do kilkuset kilometrów i z tego względu ten tryb postępowania zupełnie nie nadaje się do koordynacji stacji typu VSAT czy SNG.

4.3. MODEL PROBABILISTYCZNY

Model ten zaprezentowała Grupa Robocza CCIR TG 4-2. W celu zbudowania modelu probabilistycznego założono, że:

- stacje zakłócające są rozłożone na danym obszarze losowo (liczba stacji na kilometr kwadratowy) i są zdefiniowane parametry populacji,
- znana jest charakterystyka zysku energetycznego anteny stacji zakłócającej.

Analizowany jest wzrost równoważnej temperatury szumowej na wejściu odbiornika spowodowany zakłóceniami. Dopuszcza się wzrost temperatury o 0,1 dB. Zakładając, że wszystkie stacje mają taki sam poziom promieniowania ubocznego, oblicza się maksymalną wartość *EIRP* promieniowania ubocznego dla stacji.

4.3.1. OKREŚLENIE DOPUSZCZALNEGO POZIOMU ZAKŁÓCEŃ

Model probabilistyczny zakłada dopuszczalną wartość pogorszenia stosunku C/N na skutek zakłócania stacji odbiorczej przez promieniowanie uboczne. Poziom szumów zakłócającej stacji jest wyznaczany ze wzoru

$$N_r = k T_r B_r, \quad (4.6)$$

w którym:

N_r – poziom szumów zakłócanej stacji odbiorczej,

k – stała Boltzmanna,

T_r – temperatura szumowa zakłócanej stacji,

B_r – zastępcza szumowa szerokość pasma odbiornika.

Poziom wypadkowy zakłócenia I na wejściu odbiornika zakłócanej stacji określają wyrażenia:

$$I(n) = EIRP(n)_i + G_r + 20 \log(\lambda_n) - 20 \log(4\pi) - 20 \log(d_n), \quad (4.7)$$

$$I(n) = EIRP(n) + G_r - 32,442 - 20 \log(f_n) - 20 \log(d_n),$$

w których:

$I(n)$ – wypadkowy poziom zakłócenia od n -tej stacji,

$EIRP(n)$ – zastępcza moc promieniowana izotropowo stacji zakłócającej w kierunku stacji zakłócanej,

G_r – zysk anteny odbiorczej w kierunku stacji zakłócającej,

λ_n – długość fali stacji zakłócającej,

d_n – odległość od n -tej stacji zakłócającej,

f_n – częstotliwość sygnału zakłócającego.

Parametr $I(n)$ jest wyznaczany dla danej liczby i gęstości stacji zakłócających przy zmieniającym się kącie elewacji anteny stacji zakłócających lub dla danego kąta elewacji stacji zakłócającej przy zmieniającej się gęstości stacji zakłócających.

Na podstawie podanych wyrażeń można wyznaczyć maksymalny poziom $EIRP$ promieniowania ubocznego dla każdej stacji zakłócającej.

Biorąc pod uwagę typowe parametry systemu VSAT:

- stosunek $C/N = 10$ dB,
- dopuszczalne pogorszenie stosunku C/N : 0,1 dB,
- stosunek $C/I = 17$ dB,
- zastępcza temperatura szumowa $T_r = 600$ K,
- równoważna szumowa szerokość pasma $B_r = 50$ kHz,

uzyskamy wartość maksymalnego wypadkowego poziomu zakłóceń $I_{\max} = -171$ dB(W) w pasmie 50 kHz.

Zakładając, że odległość pomiędzy stacją zakłócaną i zakłócającą jest z przedziału 200÷2000 m, uzyskamy gęstość lokalizacji stacji zakłócających z zakresu od 8 do 25 stacji na 1 km². Przyjmując do analizy charakterystykę promieniowania anteny zakłócaniej

$$G(\varphi) = 35 - 25 \log \varphi \text{ dBi dla } 9,2^\circ < \varphi < 48^\circ, \quad (4.8)$$

$$G(\varphi) = -10 \text{ dBi dla } \varphi > 48^\circ,$$

uzyskamy wzór określający średnią wartość wypadkowego poziomu zakłócenia $I(n)$ w postaci

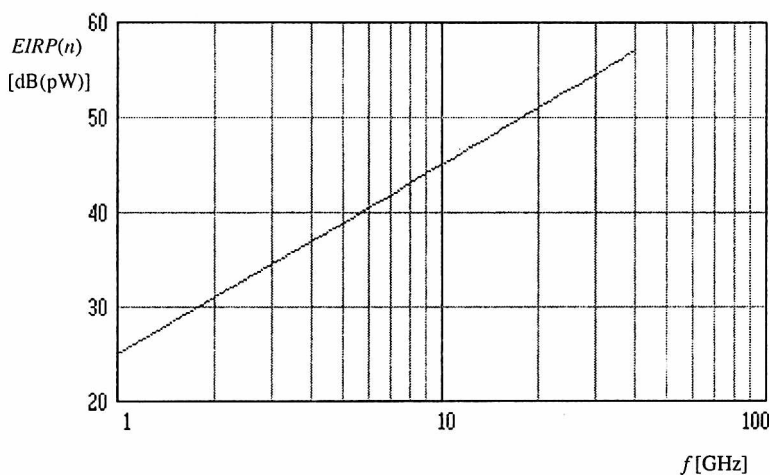
$$I(n) = EIRP(n) - 75,4 - 20 \log(f_{\text{GHz}}) \text{ dBW}. \quad (4.9)$$

Przy tych założeniach maksymalny poziom $EIRP$ dla promieniowania ubocznego można wyznaczyć ze wzoru

$$EIRP(n) = -95 + 20 \log(f_{\text{GHz}}) \text{ dBW}, \quad (4.10)$$

$$EIRP(n) = 25 + 20 \log(f_{\text{GHz}}) \text{ dBpW}.$$

Poziom ten w funkcji częstotliwości przedstawiono na rysunku 4.5.

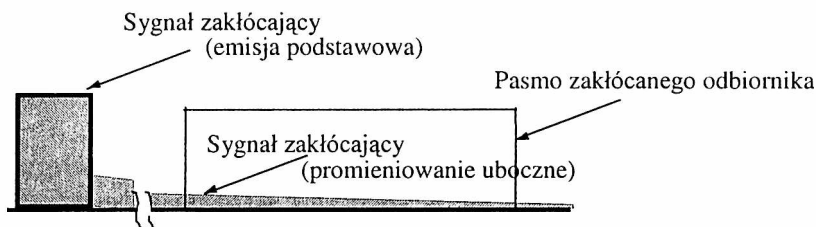


Rys. 4.5. Maksymalny poziom promieniowania ubocznego $EIRP(n)$ w dB(pW) w funkcji częstotliwości f (GHz)

4.4. MODEL DETERMINISTYCZNY

W tym modelu zakłada się, że jedna stacja zakłócająca zakłóca jedną stację odbiorczą. Obie stacje mogą pracować w tej samej służbie, ale w innych pasmach częstotliwości. Ponadto zakłada się, że pomiędzy stacjami nie ma żadnych przeszkód. Pozwala to na wykorzystanie modelu propagacji w wolnej przestrzeni.

Zakłada się również, że częstotliwości promieniowania ubocznego stacji zakłócającej znajdują się w pasmie odbiorczym stacji zakłócannej (rys. 4.6). Szerokość pasma sygnału zakłócającego jest ograniczona pasmem odbiornika. Moc promieniowania ubocznego jest podana jako $EIRP$ w kierunku zakłócannej stacji.



Rys. 4.6. Zakłócanie przez terminal VSAT innej stacji naziemnej w wyniku promieniowania ubocznego

Stację odbiorczą charakteryzują dwa parametry:

- zysk anteny odbiorczej w kierunku stacji zakłócającej,
- maksymalny dopuszczalny poziom zakłóceń na wejściu odbiornika.

Model ten nie uwzględnia możliwości zakłócania jednej stacji odbiorczej przez więcej niż jedną stację zakłócającą, gdyż prawdopodobieństwo takiego zdarzenia jest mniejsze.

4.4.1. MECHANIZM INTERFERENCJI

Rozważa się przypadek, kiedy emisja promieniowania ubocznego, spowodowana promieniowaniem oscylatora lokalnego lub niepożądanymi emisjami nadajnika, wpada w pasmo zakłócanej stacji odbiorczej. W przypadku promieniowania generatora lokalnego lub innego sygnału sinusoidalnego szerokość pasma pomiarowego dla stacji zakłócającej jest nieistotna. Natomiast dla promieniowanych sygnałów modulowanych zakłada się, że szerokość pasma sygnału zakłócającego jest taka sama jak szerokość pasma odbiornika stacji zakłócanej. Zakłada się ponadto, że poziom dopuszczalnych zakłóceń zależy jedynie od poziomu sygnału zakłócającego. Gdy zakłócająca stacja pracuje z dostępem z podziałem czasu (TDMA), przyjmowany jest poziom zakłócający występujący podczas nadawania. Nie uwzględnia się średniego poziomu wynikającego ze współczynnika wypełnienia zależnego od przepustowości łącza oraz wielkości strumienia danych, które przez to łącze należy przestać.

4.4.2. STACJA ZAKŁÓCAJĄCA

Przyjęto, że stacją zakłócającą jest typowy nadawczo-odbiorczy terminal VSAT. Prezentowany model można jednak stosować również do innych systemów, np. linii radiowych. W modelu tym określa się poziom promieniowania ubocznego jako *EIRP* w kierunku do zakłócanej stacji.

4.4.3. STACJA ZAKŁÓCANA

Zakłada się, że stacją zakłócaną jest odbiorczy terminal VSAT o szerokości pasma odbiornika B_r równej 64 kHz (64 kB/s z modulacją QPSK i korekcją 1/2 FEC). Zało-

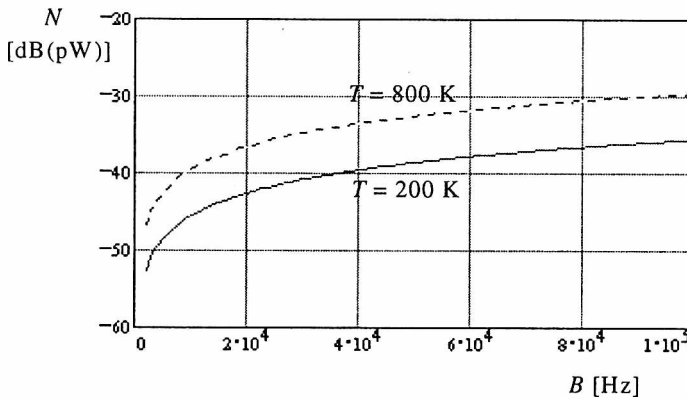
żono ponadto, że zastępcza temperatura szumowa T wynosi 200 K (jest to temperatura szumowa systemu odbiorczego w warunkach czystego nieba).

Biorąc pod uwagę te założenia, równoważny poziom szumów fluktuacyjnych na wejściu wzmacniacza niskoszumnego, można wyznaczyć ze wzoru (4.1)

$$N = kTB.$$

Kolejną ważną wielkością jest zysk anteny odbiorczej G_r stacji zakłócanej w kierunku stacji zakłócającej. Można tu wykorzystać charakterystykę zysku anteny odbiorczej dla terminalu VSAT podaną w normie ETS 300 159 [32]. Zysk anteny, wyrażony w decybelach w stosunku do anteny izotropowej, określają zależności:

$$\begin{aligned} G_r &= 29 - 25 \log(\varphi) \quad \text{dla } 2,8^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ, \\ G_r &= 8 \quad \text{dla } 7^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ, \\ G_r &= 32 - 25 \log(\varphi) \quad \text{dla } 9,2^\circ < \varphi \leq 48^\circ, \\ G_r &= -10 \quad \text{dla } \varphi > 48^\circ. \end{aligned} \quad (4.11)$$

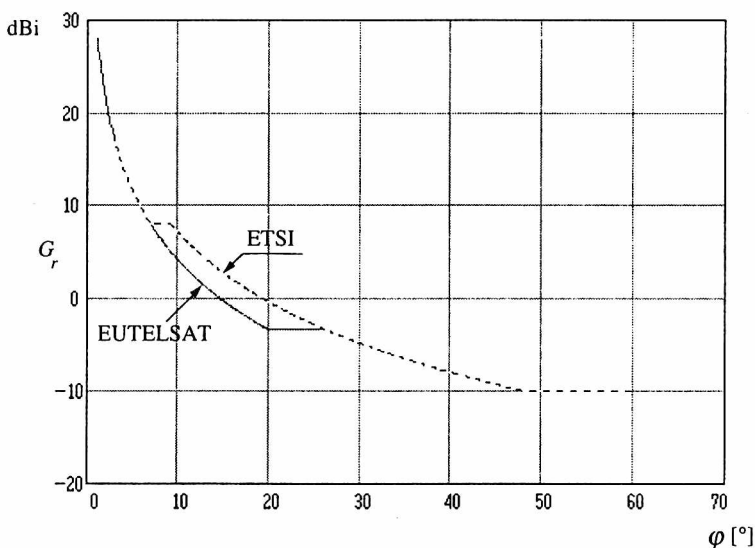


Rys. 4.7. Równoważna moc szumów fluktuacyjnych N na wejściu wzmacniacza niskoszumnego w funkcji szerokości pasma odbiorczego dla $T = 200$ i 800 K

Analizę można przeprowadzić, przyjmując wymagania organizacji EUTELSAT stawiane dla anteny terminalu VSAT [41]. Pokrywają się one z zaleceniem 391-6 CCIR. Określają je wzory:

$$\begin{aligned} G_r &= 29 - 25 \log(\varphi) \quad \text{dla } 1^\circ \leq \varphi \leq 20^\circ, \\ G_r &= -3,5 \quad \text{dla } 20^\circ \leq \varphi \leq 26,3^\circ, \\ G_r &= 32 - 25 \log(\varphi) \quad \text{dla } 26,3^\circ < \varphi \leq 48^\circ, \\ G_r &= -10 \quad \text{dla } \varphi > 48^\circ. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Porównanie wymagań ETSI i EUTELSAT przedstawiono na rysunku 4.8.



Rys. 4.8. Porównanie wymagań EUTELSAT i ETSI na zysk energetyczny anteny poza główną wiązką dla terminali VSAT

Dla modelu ETSI, jeśli antena zakłócającej odbiorczej stacji satelitarnej odbiera sygnały z satelity widzianego pod kątem elewacji 7° , a stacja zakłócająca znajduje się na jej azymucie pod kątem elewacji 0° , to zysk typowej anteny będzie wynosił około $+8$ dBi. Jeśli stacja zakłócająca znajduje się poza kątem 48° , liczonym od osi głównej anteny odbiorczej, to zysk anteny odbiorczej na tym kierunku może wynosić -10 dBi lub mniej. Kąt φ w modelu jest parametrem, który można zmieniać w zależności od potrzeb.

4.4.4. POZIOM ZAKŁÓCEŃ NA WEJŚCIU NISKOSZUMNEGO WZMACNIACZA

Biorąc pod uwagę wymienione założenia, poziom sygnału zakłócającego na wejściu wzmacniacza niskoszumnego można wyznaczyć ze wzoru

$$I = EIRP - L + G_r \quad \text{dB}, \quad (4.13)$$

w którym:

$EIRP$ – zastępcza moc promieniowana izotropowo dla promieniowania ubocznego stacji zakłócającej,

L – tłumienie wolnej przestrzeni (wzór (4.5)),

G_r – zysk energetyczny anteny stacji odbiorczej w kierunku stacji zakłócającej (G_r jest wyznaczany ze wzoru (4.11) dla zadanej wartości kąta φ).

Uwaga: nie uwzględnia się efektów związanych z polem bliskim.

Za pomocą opisanego modelu można określić minimalną odległość, dla której poziom zakłóceń będzie dopuszczalny.

Opracowano również arkusz kalkulacyjny umożliwiający dokonywanie symulacji.

4.4.5. PRZYKŁADOWE WYNIKI SYMULACJI UZYSKANE ZA POMOCĄ MODELU DETERMINISTYCZNEGO

Przeprowadzono symulację sytuacji interferencyjnej, w której źródłem zakłóceń jest nadawczo-odbiorczy terminal VSAT, a stacją zakłócaną jest odbiorczy terminal VSAT. Moc promieniowania ubocznego emitowanego przez stację zakłócającą przyjęto zgodnie z ETS 300 159 (p. 4.2.1–4.2.3) [32]. Dla stacji zakłócanej przyjęto charakterystykę zysku anteny odbiorczej zgodną z ETS 300 159 [32].

Model umożliwia analizę odległości koordynacyjnej w funkcji kąta nadejścia sygnału zakłócającego względem osi głównej wiązki promieniowania anteny odbiorczej stacji zakłócanej. Do celów porównawczych wybrano kąt od osi głównej wiązki wynoszący 20° . Zysk energetyczny anteny dla tego kąta wynosi $-0,5$ dBi. Analizy dokonano dla systemu o temperaturze szumowej równej 200 K. Wartość ta wynika z oszacowania tej temperatury dla systemu odbiorczego charakteryzującego się bardzo dobrymi parametrami (p. 4.1.1). Przyjęto szerokość pasma odbiornika 64 kHz. W praktycznie wykorzystywanych sieciach VSAT stosuje się metody kompresji widma i uzyskuje iloczyn $BT_b < 1$ (iloczyn szerokości pasma B i czasu trwania transmisji jednego bitu T_b). Ze względu na przyjęty sposób określenia dopuszczalnego poziomu sygnału zakłócającego oraz taką samą zależność mocy sygnału zakłócającego i poziomu szumów własnych systemu odbiorczego od szerokości pasma tego systemu, końcowe wyniki uzyskane za pomocą prezentowanego modelu nie są od tej szerokości pasma zależne. Przyjęcie szerokości pasma równej 64 kHz pozwala na porównywanie otrzymanych wyników pośrednich z wynikami uzyskanymi przez innych autorów, którzy na ogół przyjmują do obliczeń pasmo o szerokości 64 kHz.

Odległość koordynacyjną wyznaczono dla dopuszczalnego zakłócenia o poziomie 10 i 16 dB poniżej szumów własnych odbiornika. Dla systemu VSAT znaczenie mają jedynie wartości obliczone dla zakresu częstotliwości 12 GHz. Wartości dla innych częstotliwości podano w celu orientacyjnym. Można korzystać z nich do oszacowania odległości koordynacyjnej dla linii radiowych o podobnych parametrach stacji odbiorczej.

Dla zakłócenia 10 dB poniżej poziomu szumów własnych odbiornika ($M_S = 10$ dB) pogorszenie stosunku C/N wynosi 0,4 dB, a dla wartości $M_S = 16 - 0,1$ dB.

Tabela 4.2. Odległość koordynacyjna terminalu VSAT pracującego jako stacja odbiorcza od terminalu VSAT pracującego jako stacja nadawcza

f GHz	$EIRP$ dB(pW)	d (m) dla $M_S = 10$ dB	d (m) dla $M_S = 16$ dB
1	2	3	4
0,96	49	1300	2500
3,4	55	710	1400
10,7	61	450	890
12,6	61	380	760

1	2	3	4
13,6	78*	180	350
14,7	61	330	650
21,2	67	450	900
28,0	78*	80	170
29,0	67	330	660

* Dotyczy pasma 20 MHz.

Z tabeli 4.2 wynika, że dla systemu VSAT odległość koordynacyjna wynosi kilkadziesiąt metrów. Analizie poddano tzw. najgorszy przypadek, tzn. zakłócający terminal VSAT emitował maksymalny dopuszczalny poziom promieniowania ubocznego. W praktyce należy się spodziewać znacznie mniejszych odległości koordynacyjnych. Z rozmów ze specjalistami praktykami z Europy Zachodniej wynika, że w wielu przypadkach dwie stacje satelitarne VSAT umieszczone na dachu jednego budynku też mogą pracować w sposób zadowalający, nie zakłócając się wzajemnie.

Zaprezentowany model deterministyczny można stosować w sposób umożliwiający wyznaczenie poziomu zakłócenia na wejściu stacji satelitarnej z małą anteną lub stacji linii radiowej. W drugim przypadku należy uwzględnić zysk energetyczny anteny linii radiowej w kierunku stacji zakłócającej. Zysk ten nie jest jednak tak precyzyjnie zdefiniowany jak dla systemów z małymi antenami. Dlatego też należy stosować jeden z modeli przybliżonych dla anten kierunkowych lub też model oparty na wynikach pomiarów.

4.4.6. ZAKŁÓCANIE STACJI LINII RADIOWYCH

Omawiany wcześniej model deterministyczny umożliwiający określenie zakłócenia i odległości koordynacyjnej pomiędzy terminalami VSAT może być zastosowany również do analizy sytuacji, gdy zakłócająca stacja VSAT znajduje się w głównej wiązce anteny odbiorczej stacji linii radiowych. Jest to przypadek, z którym można się spotkać w praktyce. Mechanizm interferencji jest taki sam, jak przedstawiono w p. 4.4.1, a stacją zakłócającą jest (tak jak w p. 4.4.5) nadawcza stacja VSAT. Do analizy wykorzystano model propagacji w swobodnej przestrzeni (p. 4.1.3).

Zakłócaną stację odbiorczą linii radiowych określają trzy parametry:

- zastępcza szumowa temperatura systemu odbiorczego T ,
- zysk energetyczny G_r anteny odbiorczej w kierunku zakłócającej stacji VSAT,
- stosunek mocy szumów własnych na wejściu odbiornika do mocy zakłócenia.

Szerokość pasma systemu odbiorczego nie ma wpływu na odległość koordynacyjną. Zarówno moc zakłócenia na wejściu odbiornika, jak i poziom szumów własnych systemu odbiorczego, są proporcjonalne do szerokości pasma. Dlatego też stosunek sygnał-szum pozostaje niezmienny, jeśli dopuszczalny poziom zakłócenia jest określany w stosunku do szumów własnych systemu odbiorczego.

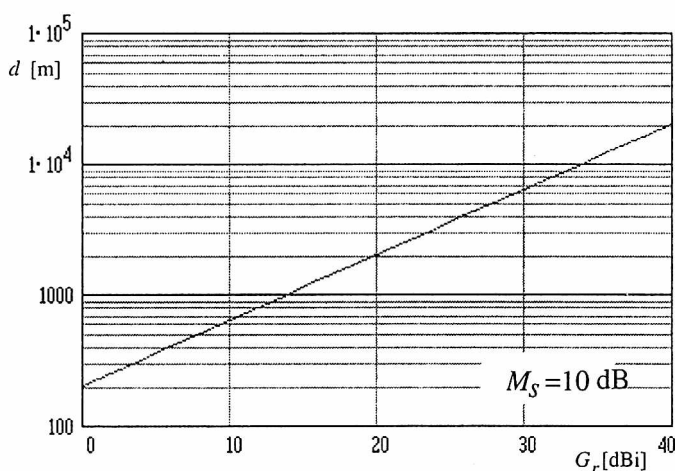
Do obliczeń przyjęto temperaturę szumową $T = 800$ K. Analizę wykonano dla zysku G_r równego 20, 30 i 40 dBi. Założono trzy wartości marginesu interferencji $M_S = 0$, 10 i 16 dB. Obliczeń dokonano przy użyciu specjalnie opracowanego arkusza kalkulacyjnego.

Wyniki analizy zaprezentowano w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Odległość koordynacyjna (m) do stacji linii radiowych

Margines interferencji Zysk energetyczny	$M_S = 0$ dB	$M_S = 10$ dB	$M_S = 16$ dB
$G_r = 20$ dBi	640	2000	4000
$G_r = 30$ dBi	2000	6400	13000
$G_r = 40$ dBi	6400	20000	40000

Wyniki analizy wskazują na dużo większy stopień zagrożenia interferencyjnego niż w p. 4.4.5. Należy zauważyć, że w praktyce można w dość istotny sposób obniżyć poziom zakłócenia przez zastosowanie skutecznego ekranu dla stacji VSAT na kierunku do stacji linii radiowych. Wpływ ekranu można uwzględnić przez wprowadzenie dodatkowego tłumienia w modelu propagacyjnym lub przez przyjęcie do obliczeń zysku anteny odbiorczej pomniejszonego o tłumienie ekranu. Ponadto należy pamiętać, że analizowany jest tzw. najgorszy przypadek. Wykres odległości koordynacyjnej dla innych wartości zysku energetycznego odbiorczej anteny stacji linii radiowych przedstawiono na rysunku 4.9.



Rys. 4.9. Odległość koordynacyjna d (m) w funkcji zysku energetycznego anteny G_r (dBi) dla marginesu interferencji $M_S = 10$ dB

4.5. WPŁYW WIELU STACJI ZAKŁÓCAJĄCYCH NA NAZIEMNĄ STACJĘ ZAKŁÓCAJĄCĄ Z MAŁĄ ANTENĄ VSAT

W modelu tym zakłada się, że wiele stacji zakłócających zakłóca jedną stację odbiorczą. Stacja zakłócana i stacje zakłócające mogą pracować w tej samej służbie, ale w innych pasmach częstotliwości. Ponadto zakłada się, że pomiędzy stacjami nie ma żadnych przeszkód. Umożliwia to stosowanie modelu propagacji w wolnej przestrzeni.

Zakłada się również, że częstotliwości promieniowania ubocznego stacji zakłócających znajdują się w pasmie odbiorczym zakłócanej stacji (rys. 4.6). Szerokość pasma sygnału zakłócającego jest ograniczona pasmem odbiornika. Moc promieniowania ubocznego jest podana jako *EIRP* w kierunku stacji zakłócanej.

Zakłócaną stację odbiorczą (tak jak dla modelu deterministycznego) charakteryzują dwa parametry:

- zysk anteny odbiorczej w kierunku stacji zakłócającej,
- maksymalny dopuszczalny poziom zakłóceń na wejściu odbiornika.

4.5.1. MECHANIZM INTERFERENCJI

Rozważa się sytuację, kiedy emisja promieniowania ubocznego spowodowana promieniowaniem oscylatora lokalnego lub niepożądanymi emisjami nadajnika wpada w pasmo zakłócanej stacji odbiorczej. W przypadku promieniowania generatora lokalnego lub innego sygnału sinusoidalnego szerokość pasma pomiarowego dla stacji zakłócającej jest nieistotna. W przypadku promieniowania sygnałów zmodulowanych zakłada się, że szerokość pasma sygnałów zakłócających jest ograniczana szerokością pasma odbiornika stacji zakłócanej.

Gdy zakłócająca stacja pracuje z dostępem z podziałem czasu (TDMA), do analizy przyjmuje się poziom zakłócający występujący przy nadawaniu, a nie średni poziom wynikający ze współczynnika wypełnienia zależnego od przepustowości łącza oraz wielkości strumienia danych, które przez to łącze należy przesłać. Zakłada się, że sygnały zakłócające dochodzące do anteny stacji odbiorczej są nieskorelowane. Umożliwia to wyznaczenie wypadkowego sygnału zakłócającego jako sumy mocy poszczególnych składowych.

4.5.2. STACJE ZAKŁÓCAJĄCE

Przyjęto, że stacje zakłócające są typowymi stacjami satelitarnymi VSAT. Prezentowany model można jednak stosować również do innych systemów, np. linii radiowych. W modelu tym określa się poziom promieniowania ubocznego jako *EIRP* w kierunku do zakłócanej stacji. Poziomy tego promieniowania przyjęto, zgodnie

z normą ETSI [32], tak jak w modelu deterministycznym. Wszystkie stacje współpracują z tym samym satelitą. Założenie to umożliwia określenie zarówno azymutu, jak i kąta elewacji głównej wiązki dla wszystkich analizowanych anten. W odniesieniu do stacji zakłócających informacja ta, wraz z danymi o położeniu stacji zakłócającej względem stacji zakłócanej, pozwala określić kąt między główną osią anteny a kierunkiem do stacji zakłócanej. Informacja ta jest niezbędna, by wykryć przypadki, gdy stacja zakłócana znajduje się w obszarze promieniowania pożądanego. Dla tych przypadków analiza nie jest prowadzona. W celu określenia kąta δ_n od osi głównej wiązki anteny stacji zakłócającej do prostej łączącej stację zakłócającą z zakłócaną stosuje się zależność

$$\delta_n = a \cos(\cos(\gamma_n) \cos(\beta_n)),$$

$$\beta_n = |\varphi_{ns} - \varphi_{nr}|,$$
(4.14)

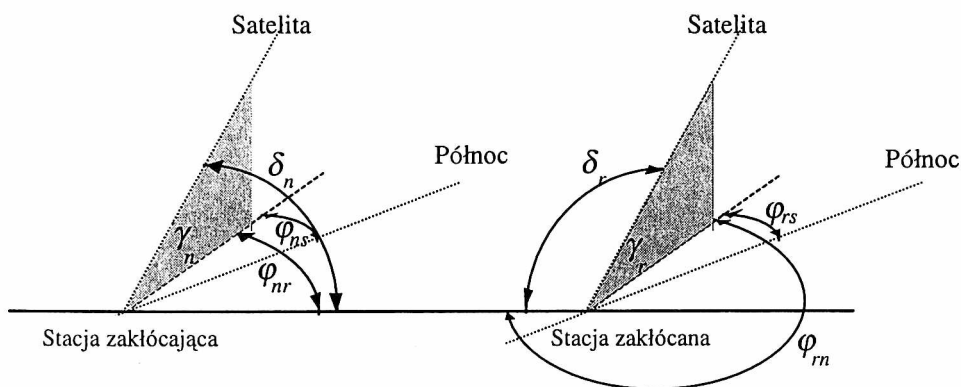
w której:

γ_n – kąt elewacji anteny zakłócającej,

φ_{ns} – azymut od stacji zakłócającej w kierunku satelity,

φ_{nr} – azymut od stacji zakłócającej w kierunku stacji zakłócanej.

Odpowiednie kąty pokazano na rysunku 4.10.



Rys. 4.10. Definicje kątów

Dla uproszczenia analizy zakłada się, że kąt elewacji wszystkich anten, jak również azymut satelity, jest taki sam. Ze względu na niewielki obszar powierzchni, który w skrajnym przypadku nie ma rozmiaru większego niż kilkanaście kilometrów, założenia te są w pełni uzasadnione.

4.5.3. STACJA ZAKŁÓCANA

W celu uzyskania przykładowych wyników zakłada się, że stacją zakłócaną jest odbiorcza stacja satelitarna VSAT o szerokości pasma odbiornika B , równej 64 kHz.

Do oszacowania mocy zakłócenia w pasmie odbiornika innym niż 64 kHz należy dodać do wyników podanych w tabelach 4.6–4.9 dotyczących mocy sygnału zakłócającego współczynnik δP (dB) obliczony ze wzoru

$$\delta P = 10 \log \left(\frac{B_r}{64} \right), \quad (4.15)$$

w którym B_r (kHz) jest szerokością pasma systemu odbiorczej stacji VSAT.

Kąt elewacji i azymut satelity anteny tej stacji jest taki sam, jak dla wszystkich stacji zakłócających. W celu określenia składowych wypadkowego sygnału zakłócającego pochodzących od kolejnych stacji zakłócających należy znać kąt nadejścia tych sygnałów w stosunku do osi głównej wiązki anteny stacji zakłócanej. Kąt ten można określić ze wzoru

$$\delta_r = a \cos (\cos (\gamma_r) \cos (\beta_r)),$$

$$\beta_r = |\varphi_{rs} - \varphi_m|, \quad (4.16)$$

w którym:

γ_r – kąt elewacji anteny zakłócanej,

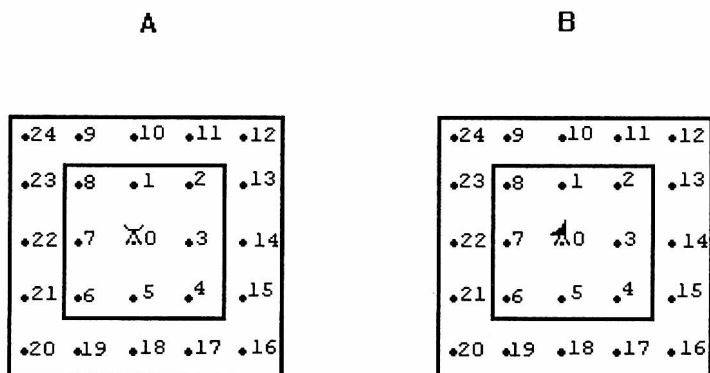
φ_{rs} – azymut od stacji zakłócanej w kierunku satelity,

φ_m – azymut od stacji zakłócanej w kierunku stacji zakłócającej.

Miedzy φ_m i φ_{nr} istnieje zależność: $\varphi_m = \varphi_{nr} + \pi$.

Charakterystykę zysku energetycznego anteny odbiorczej przyjęto taką samą, jak w modelu deterministycznym. Podobnie uwzględniono szerokość pasma zakłócanego odbiornika. Ponadto, tak jak poprzednio, przyjęto model propagacji w wolnej przestrzeni. Odległość między stacją zakłócaną a daną stacją zakłócającą jest określana na podstawie liczby stacji VSAT na 1 km². Przyjęto, że stacje VSAT są rozmieszczone w węzłach regularnej siatki o oczku w kształcie kwadratu. Rozpatrzono dwa warianty rozmieszczenia stacji zakłócanej w stosunku do stacji zakłócających.

W wariantcie A (rys. 4.11) jedna ze stacji zakłócających znajduje się w odległości równej stałej siatki na azymucie stacji zakłócanej.



Rys. 4.11. Dwa warianty geometrii układu

W wariancie B układ stacji zakłócających obrócony został o kąt 45° (lub stacja zakłócana została obrócona o ten sam kąt). Warianty te wybrano w celu zbadania wpływu ustawienia stacji zakłócanej w stosunku do regularnie rozmieszczonych stacji zakłócających na poziom wypadkowego sygnału na wejściu odbiornika.

Opracowano arkusz kalkulacyjny i program komputerowy pozwalający na dokonanie symulacji według przedstawionego modelu.

4.5.4. WYNIKI SYMULACJI

Do analizy modelu przygotowano specjalny program komputerowy, który umożliwia, dla zadanej gęstości rozmieszczenia stacji VSAT, określenie podstawowych parametrów geometrii układu niezbędnych do obliczeń kompatybilnościowych. Regularną sieć stacji zakłócających podzielono na tzw. strefy. Strefa 1. obejmuje 8 najbliższych stacji zakłócających w stosunku do analizowanej stacji zakłócanej, strefa 2. natomiast kolejne 16 nadajników (rys. 4.11 – w celu ułatwienia identyfikacji nadajniki zakłócające zostały ponumerowane).

Analizę prowadzono dla dwóch wariantów (A i B) geometrii układu stacji (rys. 4.11). W każdym z wariantów wybrano dwa kąty elewacji anteny stacji zakłócanej γ równe 20° i 30° . W tabeli 4.4 przedstawiono wyniki analizy dla stacji należących do pierwszej strefy. Wyznaczone kąty nie zależą od wielkości stałej siatki (minimalnej odległości pomiędzy stacjami).

Dla trzech gęstości N rozmieszczenia stacji VSAT równych 1, 10 i 100 stacji VSAT na 1 km^2 określono odległości stacji zakłócających w stosunku do stacji zakłócanej. W tabeli 4.5 przedstawiono wyniki tych obliczeń. Podano jedynie odległości minimalną i maksymalną dla danej strefy.

Ze względu na przyjęcie stref o kształcie kwadratowym, maksymalna odległość stacji zakłócającej w strefie 3. jest większa niż minimalna odległość stacji zakłócającej w strefie 4. Powtarza się to dla stref o wyższych numerach. Problem ten nie występuje dla stref 1. i 2., z których pochodzi najwięcej zakłóceń.

Tabela 4.4. Kąt γ_r pomiędzy osią głównej wiązki anteny stacji zakłócanej a kierunkiem do danej stacji zakłócającej leżącej w pierwszej strefie

Wariant Numer stacji	A		B	
	$\gamma = 20^\circ$	$\gamma = 30^\circ$	$\gamma = 20^\circ$	$\gamma = 30^\circ$
	δ_r	δ_r	δ_r	δ_r
1	20	30	48,36	52,24
2	48,36	52,24	90	90
3	90	90	131,64	127,76
4	131,6	127,76	160	150
5	160	150	131,64	127,76
6	131,6	127,76	90	90
7	90	90	48,36	52,24
8	48,36	52,24	20	30

Tabela 4.5. Minimalna i maksymalna odległość (km) stacji zakłócającej w zależności od strefy

Numer strefy	$N = 1$		$N = 10$		$N = 100$	
	$d_{\min}$	$d_{\max}$	$d_{\min}$	$d_{\max}$	$d_{\min}$	$d_{\max}$
1	1	1,414	0,316	0,447	0,1	0,141
2	2	2,828	0,632	0,894	0,2	0,282
3	3	4,243	0,949	1,342	0,3	0,424
4	4	5,657	1,265	1,789	0,4	0,566
5	5	7,071	1,581	2,236	0,5	0,707

Zastosowany program komputerowy umożliwił określenie poziomu zakłócenia od dowolnej stacji zakłócającej znajdującej się w węźle regularnej siatki. Ponadto możliwe jest określenie sumarycznego poziomu zakłóceń pochodzących od danej strefy, jak również od kilku stref. W pracy zaprezentowano jedynie wybrany fragment uzyskanych rezultatów, umożliwiającą ocenę i określenie stopnia zagrożenia. Analizę i wyniki przedstawiono dla dwóch wariantów (A i B) geometrii sieci oraz trzech gęstości rozmieszczenia stacji zakłócających N równych 1, 10 i 100 stacji VSAT na 1 km^2 . Do prezentacji wybrano wyniki analizy dla kąta elewacji anteny stacji zakłócanej i wszystkich stacji zakłócających $\gamma_r = \gamma_n = 20^\circ$. Przypadek ten jest bardziej krytyczny w stosunku do sytuacji, gdy kąt elewacji wynosi 30° , która najczęściej występuje na terenie Polski (ze względu na lokalizację wykorzystywanych do transmisji w sieciach VSAT satelitów Eutelsat).

W tabelach 4.6 i 4.7 przedstawiono wyniki analizy poziomu sygnału zakłócającego pochodzącego od kolejnych nadajników zlokalizowanych w pierwszej strefie.

Tabela 4.6. Poziom zakłóceń (dB(pW)) od stacji leżących w pierwszej strefie
przypadek A: $\gamma = 20^\circ$, $f_{\text{odb}} = 12,5 \text{ GHz}$, $B = 64 \text{ kHz}$

N Numer stacji	1	10	100
1	-53,91	-43,91	-33,91
2	-66,39	-56,39	-46,39
3	-63,38	-53,38	-43,38
4	-66,39	-56,39	-46,39
5	-63,38	-53,38	-43,38
6	-66,39	-56,39	-46,39
7	-63,38	-53,38	-43,38
8	-66,39	-56,39	-46,39
Σ	-51,96	-41,96	-31,96

W tabelach 4.6 i 4.7 w ostatnim wierszu podano sumaryczny poziom sygnału zakłócającego pochodzącego od stacji satelitarnych zlokalizowanych w pierwszej strefie. Warto zauważyć, że poziom wypadkowego sygnału zakłócającego wzrasta o 10 dB (dziesięć razy wzrasta moc sygnału zakłócającego) przy dziesięciokrotnym wzroście

gęstości lokalizacji stacji. Kolejna uwaga odnosi się do proporcji poziomów zakłócających pochodzących od najsilniej zakłócającej stacji pierwszej strefy do sumarycznej mocy zakłóceń pochodzących z pierwszej strefy. W wariancie A stosunek ten wynosi $-1,95$ dB, a w wariancie B jest równy $-3,51$ dB. Dowodzi to poprawności tezy przyjętej przy tworzeniu modelu deterministycznego, że o poziomie zakłócenia decyduje jedna najsilniej zakłócająca stacja. Konfiguracja w wariancie A odpowiada właśnie sytuacji, w której dominuje jeden nadajnik zakłócający. W wariancie B sytuacja jest nieco odmienna. Oprócz dominującej stacji zakłócającej nr 8 są również dwie inne dość silnie zakłócające stacje nr 1 i 7. Dlatego też odpowiedni stosunek mocy sygnałów dla tego wariantu jest mniejszy.

Tabela 4.7. Poziom zakłóceń (dB(pW)) od stacji leżących w pierwszej strefie
przypadek B: $\gamma = 20^\circ$, $f_{\text{odb}} = 12,5$ GHz, $B = 64$ kHz

N Numer stacji	1	10	100
1	-63,38	-53,38	-43,38
2	-66,39	-56,39	-46,39
3	-63,38	-53,38	-43,38
4	-66,39	-56,39	-46,39
5	-63,38	-53,38	-43,38
6	-66,39	-56,39	-46,39
7	-63,38	-53,38	-43,38
8	-56,92	-46,92	-36,92
Σ	-53,41	-43,41	-33,41

Dokonano również analizy udziału poszczególnych stref w sumarycznym sygnale zakłócającym. Wyniki tej analizy zilustrowano w tabelach 4.8 i 4.9.

Tabela 4.8. Poziom zakłóceń (dB(pW)) od poszczególnych stref
przypadek A: $\gamma = 20^\circ$, $f_{\text{odb}} = 12,5$ GHz, $B = 64$ kHz

N Numer strefy		1	10	100	%
1	Σ	-51,96	-41,96	-31,96	49,1
	max	-53,91	-43,91	-33,91	
2	Σ	-55,83	-45,83	-35,83	20,1
	max	-59,93	-49,93	-39,93	
3	Σ	-57,69	-47,69	-37,69	13,1
	max	-63,45	-53,45	-43,45	
4	Σ	-58,95	-48,95	-38,95	9,8
	max	-65,95	-55,95	-45,95	
5	Σ	-59,91	-49,91	-39,91	7,9
	max	-67,89	-57,89	-47,89	
1...5	Σ	-48,87	-38,87	-28,87	100,0

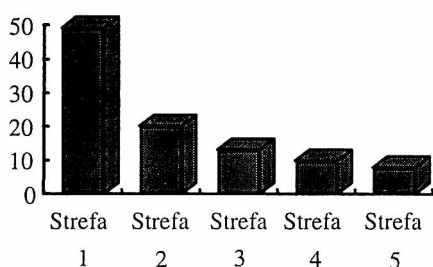
Tabela 4.9. Poziom zakłóceń (dB(pW)) od poszczególnych stref

przypadek B: $\gamma = 20^\circ$, $f_{\text{odb}} = 12,5 \text{ GHz}$, $B = 64 \text{ kHz}$

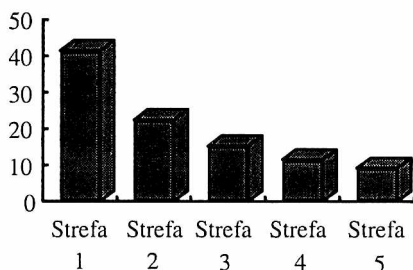
Numer strefy \ N		1	10	100	%
1	Σ	-53,41	-43,41	-33,41	41,5
	max	-56,92	-46,92	-36,92	
2	Σ	-56,08	-46,08	-36,08	22,4
	max	-62,94	-52,94	-42,94	
3	Σ	-57,75	-47,75	-37,75	15,3
	max	-66,46	-56,46	-46,46	
4	Σ	-58,97	-48,97	-38,97	11,5
	max	-68,68	-58,68	-48,68	
5	Σ	-59,93	-49,93	-39,93	9,2
	max	-70,53	-60,53	-50,53	
1...5	Σ	-49,59	-39,59	-29,59	100,0

W tabelach 4.8 i 4.9 przedstawiono, oprócz sumarycznego poziomu zakłócenia od danej strefy (Σ), również poziom zakłócenia od najsilniej zakłócającej stacji w danej strefie (max). W ostatniej kolumnie podano procentowy udział mocy sumarycznego sygnału od danej strefy w wypadkowym sygnale od pięciu analizowanych stref. Poziom wypadkowego sygnału tych stref przedstawiono w ostatnim wierszu tabel. Procentowy udział poszczególnych stref w wypadkowym sygnale zakłócającym pokazano również na rysunku 4.12. Jak widać, niezależnie od wariantu, około połowa mocy sygnału zakłócającego pochodzi z pierwszej strefy.

Procent zakłóceń od stref 1–5, wariant A



Procent zakłóceń od stref 1–5, wariant B



Rys. 4.12. Procentowy udział sumarycznego zakłócenia z danej strefy w wypadkowym sygnale zakłócającym (suma sygnałów z 5 stref): a) dla wariantu A, b) dla wariantu B

4.5.5. EFEKT ODDZIAŁYWANIA SYGNAŁÓW ZAKŁÓCAJĄCYCH Z WIELU STACJI VSAT

Na podstawie analizy wyników symulacji można stwierdzić, że w przypadku równomiernego rozłożenia stacji zakłócających należy się spodziewać, że o poziomie zakłóceń decydować będą stacje najbliższe (strefa 1.). W strefie pierwszej o poziomie

zakłócenia decyduje jedna dominująca stacja zakłócająca. Wydaje się, że przy spełnieniu założeń stosowanego modelu (stacje zakłócające rozmieszczone są równomiernie na pewnym obszarze) poziom wypadkowego zakłócenia docierającego do odbiornika zakłócanej stacji można oszacować na podstawie poziomu zakłócenia pochodzącego od najsilniej zakłócającej stacji oraz współczynnika korekcyjnego Δ , uwzględniającego geometrię układu stacji zakłócających i elewację anteny

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{dom}} + \Delta, \quad (4.18)$$

przy czym:

P_{tot} – wypadkowa moc sygnału zakłócającego na wejściu odbiornika,

P_{dom} – moc zakłóceń od najsilniej zakłócającej stacji,

Δ – współczynnik korekcyjny.

Współczynnik ten dla obu wariantów i dwóch kątów elewacji przedstawiono w tabeli 4.10.

Tabela 4.10. Współczynniki korekcyjne Δ

Wariant	Kąt elewacji, °	Współczynnik korekcyjny Δ , dB
A	20	5
A	30	8
B	20	7
B	30	10

4.6. PORÓWNANIE MODELI DLA PROMIENIOWANIA UBOCZNEGO

Typową sytuację zakłóceniową tworzą: stacja zakłócająca oraz stacja zakłócana odległe od siebie o kilkaset do kilku tysięcy metrów. Przy takich odległościach wpływ efektów związanych z atmosferą ziemską na propagację może być pominięty. Z tego też powodu model ITU jest nieodpowiedni do analizy promieniowania ubocznego i określenia poziomów granicznych.

Modele probabilistyczny i deterministyczny można stosować do analizy tego typu sytuacji interferencyjnej.

Model probabilistyczny i model dla wielu stacji zakłócających zakłada tę samą moc zakłóceń promieniowaną przez antenę dla każdej stacji zakłócającej. Model deterministyczny zakłada pojedyncze źródło zakłóceń.

W konkretnej sytuacji interferencyjnej można wykorzystać do analizy model wielu źródeł zakłócających. Geometria rzeczywistego rozlokowania stacji satelitarnych VSAT może jednak znacznie odbiegać od regularnej siatki (w tym o kwadratowym oczku). Aby uzyskać dokładniejsze wyniki, należy wykorzystać model deterministyczny dla kolejnych stacji zakłócających. Ze względu na swoją prostotę i uwzględnienie tzw. najgorszego przypadku preferuje się stosowanie modelu deterministycznego.

5. PARAMETRY ELEKTRYCZNE STACJI SATELITARNEJ (TERMINALU) VSAT

5.1. PRZYKŁADY PARAMETRÓW STACJI SATELITARNYCH VSAT

Z punktu widzenia analizy sytuacji interferencyjnej dla terminali satelitarnych VSAT istotnymi parametrami elektrycznymi są: temperatura szumowa systemu oraz charakterystyka promieniowania anteny. Dla małych anten stosowanych w terminalach satelitarnych występuje efekt przelewania się energii (ang. *spill over*). Dla zakresu kątów $\pm 120^\circ$ poziom w ten sposób promieniowanej energii przewyższa o ok. 10 dB poziom -10 dBi, który jest uwzględniany przy modelowaniu tego typu zakłóceń. Typowe wartości parametrów elektrycznych dla stacji VSAT przedstawiono w tabeli 5.1.

Dla typowej stacji naziemnej VSAT stosowanej jedynie do odbioru parametry są następujące:

- temperatura szumowa systemu: 150÷200 K (w warunkach czystego nieba),
 - szerokość pasma odbiornika: 64 kHz,
 - poziom sygnału na wejściu odbiornika: -20 dB(pW) dla $BER = 10^{-3}$,
 - maksymalny poziom listków bocznych: według ETS 300 157,
 - średni zysk listków bocznych $+10 \div -20$ dBi dla kątów $1 \div 20^\circ$
- (dane z pomiarów typowej anteny o średnicy 1,8 m): -20 dBi dla kątów $20 \div 120^\circ$
 -10 dBi dla kątów $120 \div 170^\circ$ (przelewanie energii)
- dopuszczalne promieniowanie uboczne ETS 300 157, CCIR Rec. 726.

Tabela 5.1. Typowe wartości podstawowych parametrów stacji naziemnych

Typ stacji	Temperatura szumowa systemu na wejściu niskoszumnego wzmacniacza K	Poziom sygnału na wejściu niskoszumnego wzmacniacza zapewniający $BER = 10^{-3}$ dBm	Typ i rozmiar anteny	Graniczne wartości promieniowania ubocznego określono w
1	2	3	4	5
VSAT odbiorczy	150÷200	-110	Antena podświetlona 55 cm, Antena symetryczna 95 cm	ETS 300 157
VSAT nadawczo-odbiorczy	180÷260	-110	Antena podświetlona 1,8 m	ETS 300 159

1	2	3	4	5
TVRO (stacja czołowa telewizji kablowej)	150÷200	-100	Antena podświetlona 55 cm	ETS 300 249 ETS 300 158
Linia radiowa	600÷1000	-94 dla 2 Mb/s	Typowa antena dla łącza radiowego standardowego i o podwyższonej jakości	—

Dla typowej nadawczo-odbiorczej stacji VSAT parametry są następujące:

- temperatura szumowa systemu ≥ 200 K, (w warunkach czystego nieba),
ok. 450 K (przy zanikach spowodowanych opadami),
- szerokość pasma odbiornika 64 kHz,
- poziom na wejściu odbiornika -20 dB(pW) dla $BER = 10^{-3}$,
- maksymalny poziom listków bocznych według ETS 300 159,
- średni zysk listków bocznych tak jak dla VSAT-ów odbiorczych,
- dopuszczalne promieniowanie uboczne ETS 300 159, CCIR Rec. 726.

Dla porównania przedstawiono również parametry typowej cyfrowej stacji linii radiowych, które są następujące:

- temperatura szumowa systemu 600÷1000 K,
- szerokość pasma odbiornika kilka MHz dla systemu 2 Mb/s,
- poziom sygnału na wejściu odbiornika -4 dB(pW) dla 2 Mb/s,
(zgodnie z prETS 300 198),
 $+12$ dBi dla kątów $10\div 20^\circ$,
 $+12\div -7$ dBi dla kątów $20\div 100^\circ$,
 $-7\div -10$ dBi dla kątów $100\div 180^\circ$;
- dopuszczalne promieniowanie uboczne (zgodnie z prETS 300 198),
(poziom na wyjściu anteny) 30 dB(pW) dla $f = 1\div 21,2$ GHz,
 60 dB(pW) dla $f = 21,2\div 55$ GHz.

5.2. PODSTAWOWE PARAMETRY STACJI VSAT STOSOWANE W ANALIZIE KOMPATYBILNOŚCI

Przy określeniu podstawowych parametrów niezbędnych do analizy kompatybilności stacji VSAT należy rozgraniczyć dwa przypadki:

- stacja VSAT spełnia odpowiednie normy ETSI,
- brak jest danych o zgodności parametrów stacji VSAT z normami ETSI.

W pierwszym przypadku liczba dodatkowych danych niezbędnych do prowadzenia obliczeń kompatybilności stacji jest niewielka, w drugim natomiast dużo większa

i musi być wystarczająca do określenia właściwości stacji, które są przedmiotem odpowiednich norm ETSI.

5.2.1. PARAMETRY STACJI VSAT SPEŁNIAJĄCEJ NORMY ETSI

Dla tego typu stacji VSAT analiza kompatybilności opiera się głównie na podanych w odpowiednich normach ETSI dopuszczalnych wartościach. Dodatkowo należy dysponować następującymi danymi:

- współrzędne geograficzne stacji,
- pozycja satelity, z którym stacja współpracuje,
- liczba stacji VSAT, które jednocześnie mogą pracować w systemie (dotyczy jedynie stacji nadawczo-odbiorczych),
- częstotliwość łącza Ziemia-satelita (tylko stacje nadawcze) i satelita-Ziemia,
- szybkość transmisji w łączu Ziemia-satelita i rodzaj modulacji (BPSK lub QPSK) oraz stosowana metoda korekcji błędów (lub niezbędna szerokość pasma).

Z uwagi na konieczność określenia wrażliwości stacji odbiorczej VSAT na zakłócenia należy znać następujące parametry:

- szybkość transmisji w łączu satelita-Ziemia i stosowane metody modulacji oraz korekcji błędów (lub niezbędną szerokość pasma),
- jakość transmisji w kanale (C/N , BER lub E_b/N_0),
- temperatura szumowa systemu odbiorczego T_r (lub elementów systemu p. 4.1).

Ze względu na ochronę personelu i osób postronnych należy również znać:

- moc nadajnika (dotyczy stacji nadawczych VSAT),
- 3 dB szerokość głównej wiązki anteny przy nadawaniu (lub jej zysk energetyczny),
- średnicę apertury anteny D .

Do opracowania w przyszłości bardziej szczegółowych metod analizy kompatybilności stacji VSAT, uwzględniających specyficzne dla tego typu systemów właściwości, należy starać się o zbieranie danych dotyczących typów protokołów transmisji wykorzystywanych przez stacje VSAT, średnich czasów pracy terminali nadawczych w ciągu doby itp.

5.2.2. PARAMETRY STACJI VSAT NIE BADANEJ NA ZGODNOŚĆ Z NORMĄ ETSI

Dla tego typu stacji niezbędna jest znajomość danych wymienionych w p. 5.2.1 oraz, dodatkowo, danych istotnych w analizie kompatybilności. Stacja tego typu musi spełniać wymagania operatora (np. Eutelsata [41], Intelsata [45]), który jest właścicielem satelity. Wymagania te są zwykle wystarczające do należytej ochrony wykorzystywanego łącza satelitarnego przed zakłóceniami. Chronią one również inne łącza satelitarne na tym samym i sąsiednich satelitach. Nie zabezpieczają jednak należycie

innych naziemnych służb. Dlatego niezbędne jest dysponowanie dla tego typu stacji następującymi danymi:

- poziomy promieniowania:
- w zakresie częstotliwości 30÷1000 MHz (CISPR 22, EN 55022 lub ETS 300 673),
- w obszarze promieniowania niepożądanego (stacje nadawcze – dla kątów $\varphi > 2,5^\circ$, stacje odbiorcze – dla kątów $\varphi > 2,8^\circ$, φ jest kątem od osi głównej wiązki anteny), przy pracy z wyłączoną nośną w zakresie częstotliwości od 1000 MHz do 40 GHz,
- w obszarze promieniowania niepożądanego (dla kątów $\varphi > 2,5^\circ$, φ jest kątem od osi głównej wiązki anteny), przy pracy z włączoną nośną w zakresie częstotliwości od 1000 MHz do 40 GHz,
- poziomy odporności stacji.

Ze względu na integrację w przyszłości norm obowiązujących w Polsce z normami europejskimi, należy dążyć do przyjęcia europejskich norm dotyczących stacji satelitarnych VSAT, a także zadbać, by instalowane w Polsce naziemne stacje satelitarne VSAT spełniały normy ETSI.

6. DOPUSZCZALNE POZIOMY PROMIENIOWANIA UBOCZNEGO W FUNKCJI ODLEGŁOŚCI

Za pomocą wcześniej przedstawionego modelu deterministycznego sytuacji interferencyjnej można we względnie prosty sposób obliczyć dopuszczalny poziom promieniowania ubocznego stacji zakłócającej w funkcji odległości pomiędzy tą stacją a zakłócaną stacją odbiorczą.

Maksymalny poziom promieniowania ubocznego $EIRP_{i \max}$ można wyznaczyć z zależności

$$EIRP_{i \max} = I_{r \max} - G_r + L, \quad (6.1)$$

w której:

$I_{r \max}$ – maksymalny dopuszczalny poziom zakłócenia na wejściu odbiornika,

G_r – zysk anteny odbiorczej w kierunku stacji zakłócającej,

L – tłumienie wolnej przestrzeni.

Dwa typowe przykłady przedstawiono dalej. Należy zauważyć, że wartości uzyskane dla odległości 10÷100 m mogą być obarczone dużym błędem, gdyż nie uwzględniono w nich efektów związanych z polem bliskim.

Podstawowe założenie modelu deterministycznego, przyjmujące, że znaczący poziom promieniowania ubocznego jest transmitowany wewnątrz pasma częstotliwości zakłócanego odbiornika, jest raczej mało prawdopodobne. Przy wzrastającej liczbie stacji VSAT takie założenie należy jednak brać pod uwagę.

W pierwszym przykładzie rozważono typową sytuację dla stacji zakłócanej będącej stacją VSAT nadawczo-odbiorczą lub tylko odbiorczą. Założono, że temperatura szumowa systemu uwzględnia zaniki spowodowane opadami i system pracuje z bardzo małym marginesem bezpieczeństwa. Argument, że w takiej sytuacji również sygnał zakłócający jest tłumiony, jest tylko częściowo słuszny. Prawdopodobieństwo, że bardzo silny opad (typowo o promieniu kilkuset metrów) jednocześnie w taki sam sposób wpływa na łącze satelitarne i sygnał zakłócający, jest bardzo małe.

Założony dopuszczalny poziom zakłócenia powoduje wzrost wypadkowej temperatury szumowej o 0,4 dB.

Założony zysk anteny odbiorczej może być traktowany w następujący sposób:

0 dBi – najgorszy przypadek dla kąta 20° od osi głównej wiązki anteny,

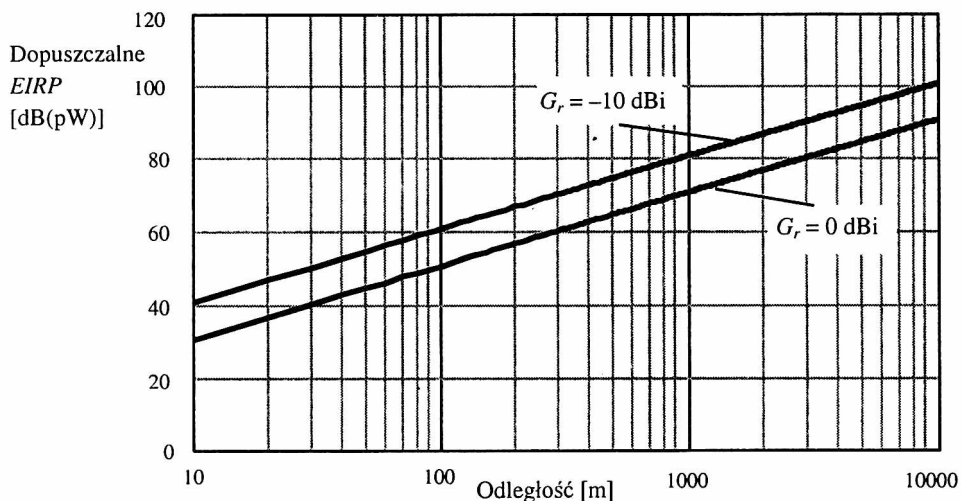
–10 dBi – średni zysk w obszarze przelewania energii (120÷170° od osi głównej wiązki anteny).

Dopuszczalne poziomy $EIRP$ promieniowania ubocznego w kierunku naziemnej stacji satelitarnej VSAT w funkcji odległości przedstawiono na rysunku 6.1.

Do celów symulacji założono:

- częstotliwość: 12,5 GHz,

- pasmo odbiornika: 64 kHz,
- temperaturę szumową systemu: 500 K,
- poziom szumów fluktuacyjnych na wejściu odbiornika: $-33,5 \text{ dB(pW)}$,
- dopuszczalny poziom zakłóceń na wejściu odbiornika: $-43,5 \text{ dB(pW)}$.

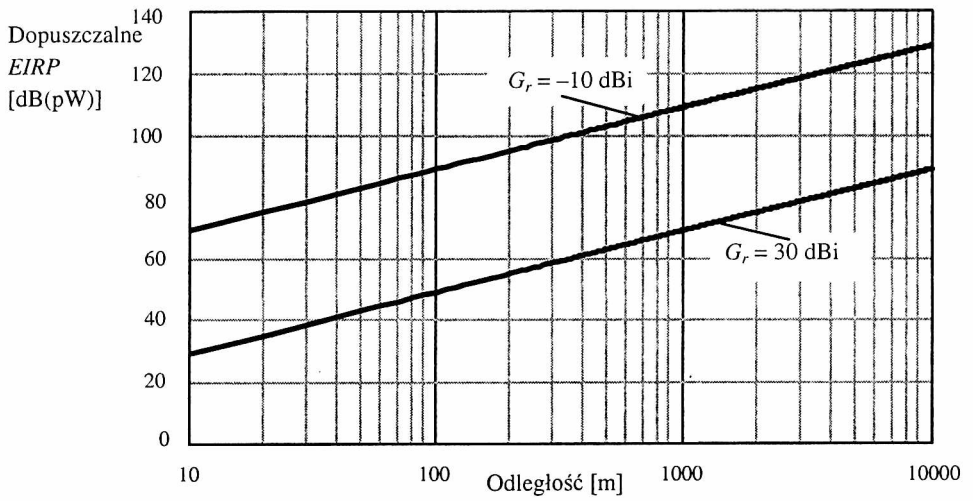


Rys. 6.1. Dopuszczalny poziom EIRP promieniowania ubocznego w kierunku stacji VSAT

Podobną analizę wykonano dla stacji linii radiowych. Wybrano typowy przykład łącza linii radiowej stosowanego do przesyłania sygnału cyfrowego o przepływności 2 Mb/s. Założony dopuszczalny poziom zakłóceń powoduje wzrost temperatury szumowej o 3 dB. Wzięty do obliczeń zysk anteny 30 dBi odnosi się do zakłóceń przenikających do anteny z obszaru głównej wiązki. Zysk -10 dBi odnosi się do zakłóceń dochodzących do anteny pod kątem do osi głównej wiązki większym niż 90° . Przy symulacji założono, że:

- częstotliwość: 14,3 GHz,
- szerokość pasma odbiornika: 2000 kHz,
- temperatura szumowa systemu: 800 K,
- poziom szumów cieplnych na wejściu odbiornika: $-16,6 \text{ dB(pW)}$,
- dopuszczalny poziom zakłóceń na wejściu odbiornika: $-16,6 \text{ dB(pW)}$.

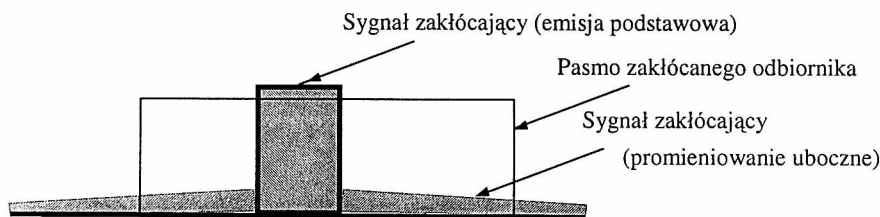
Wyniki symulacji pokazano na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Dopuszczalny poziom *EIRP* promieniowania ubocznego w kierunku stacji linii radiowych

7. OKREŚLENIE ODLEGŁOŚCI KOORDYNACYJNEJ DLA PROMIENIOWANIA W PASMIE UŻYTECZNYM POZA OBSZAREM POŻĄDANYM

W podrozdziale 4.1.2.1 opisano naziemną stację satelitarną z małą anteną jako źródło zakłóceń. Wcześniej zanalizowano promieniowanie uboczne naziemnej stacji satelitarnej VSAT i stopień zagrożenia w stosunku do innych naziemnych stacji satelitarnych VSAT oraz do linii radiowych. Do zanalizowania pozostał przypadek zakłócania przez nadawczo-odbiorczą naziemną stację satelitarną VSAT naziemnej linii radiowej pracującej w tym samym przydzielonym pasmie częstotliwości (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Zakłócanie przez terminal VSAT naziemnej linii radiowej pracującej w tym samym przydzielonym pasmie częstotliwości

7.1. STACJA ZAKŁÓCAJĄCA – MODEL ŹRÓDŁA ZAKŁÓCENIA

Poziom sygnału promieniowany w pasmie użytecznym poza obszarem pożądanym jest ograniczony ze względu na inne służby satelitarne. Wartości dopuszczalne tego promieniowania można również stosować do analizy sytuacji interferencyjnej w stosunku do linii radiowych. Ze względu na rozdzielanie częstotliwości nadawania i odbioru w łączu satelitarnym nie zachodzi potrzeba analizy tego problemu w stosunku do innych naziemnych stacji satelitarnych VSAT oraz stacji satelitarnych służby reporterskiej SNG.

Model naziemnej stacji satelitarnej VSAT jako źródła zakłóceń w pasmie użytecznym i obszarze promieniowania niepożądanego przedstawiono w p. 4.1.2. Model ten stworzono w celu ochrony przed zakłóceniami innych systemów satelitarnych. Nie zapewnia on jednak ochrony przed zakłóceniami innych służb naziemnych. Przyjmując ten model jako model źródła zakłóceń, zanalizowano tzw. najgorszy przypadek.

7.2. MODEL PROPAGACYJNY

Jako model propagacyjny przyjęto model wolnej przestrzeni, tak jak w p. 4.1.3. Ponieważ przy uwzględnieniu tego typu zakłóceń należy spodziewać się znacznie większych odległości koordynacyjnych, dlatego w modelu przewidziano występowanie dodatkowego tłumienia, tzw. tłumienia trasy o wartości A . Model propagacyjny jest zatem określony zależnością

$$L = 20 \log \left(\frac{4 \pi d f}{c} \right) + A, \text{ dB}, \quad (7.1)$$

gdzie:

- d – odległość pomiędzy stacjami, m,
- f – częstotliwość zakłócającego sygnału, Hz,
- c – prędkość światła ($3 \cdot 10^8$ m/s),
- A – dodatkowe tłumienie trasy, dB.

7.3. STACJA ZAKŁÓCANA

Stacją zakłócaną jest stacja linii radiowej. Tak jak w przykładzie dla promieniowania ubocznego (przedstawionego w rozdz. 6.), przyjęto następujące parametry linii radiowej:

- częstotliwość: 14,3 GHz,
- szerokość pasma odbiornika: 2000 kHz,
- temperatura szumowa systemu: 800 K,
- poziom szumów cieplnych
na wejściu odbiornika: -16,6 dB(pW),
- dopuszczalny poziom zakłóceń
na wejściu odbiornika: -16,6 dB(pW).

Należy zauważyć, że przyjęte założenia dopuszczają zakłócenie linii radiowej sygnałem podnoszącym wypadkową temperaturę szumową systemu odbiorczego linii o 3 dB (degradacja C/N o 3 dB). Jest to silny sygnał zakłócający.

Analizowano dwa przypadki:

1. Zakłócająca naziemna stacja satelitarna VSAT znajduje się na azymucie stacji odbiorczej linii radiowej; przyjęto zysk anteny odbiorczej w kierunku stacji zakłócającej równy 30 dBi.
2. Zakłócenie od naziemnej stacji satelitarnej z małą anteną dochodzi do anteny odbiorczej linii radiowej pod kątem do osi głównej wiązki większym niż 90° ; przyjęto zysk anteny odbiorczej równy -10 dBi.

7.4. WYNIKI SYMULACJI

Na podstawie przedstawionych założeń wykonano obliczenia (przy użyciu arkusza kalkulacyjnego) odległości koordynacyjnej d w funkcji kąta wypromieniowania φ sygnału zakłócającego liczonego do osi głównej wiązki promieniowania anteny stacji VSAT

$$d(\varphi) = \left(\frac{1}{4} \frac{e^{\left(-\frac{1}{20} (\ln(10)) (I_{r\max} - EIRP(\varphi) - G_r + A) \right)}}{\pi f} \right)^{1/2} c, \quad (7.2)$$

gdzie:

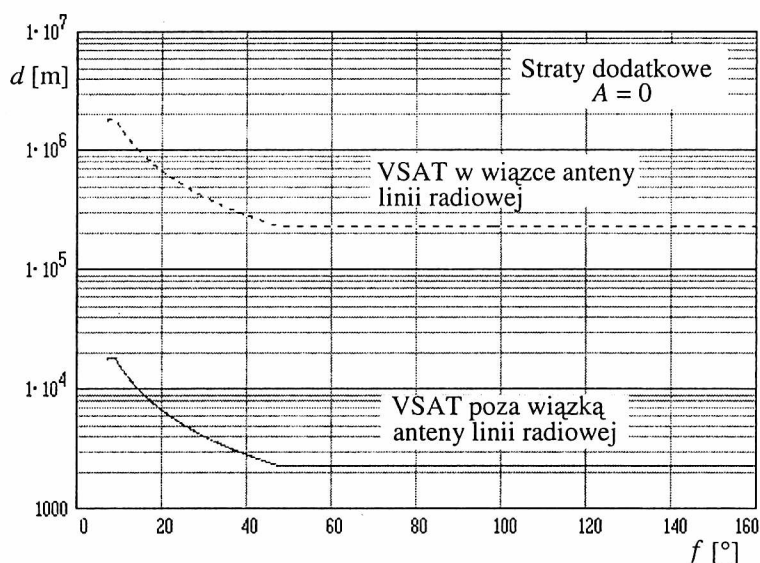
- $I_{r\max}$ – dopuszczalny poziom sygnału zakłócającego na wejściu odbiornika równy poziomowi szumów własnych odbiornika pomniejszonemu o margines interferencji (w rozważanym przypadku margines interferencji wynosi 0 dB),
- $EIRP(\varphi)$ – zastępcza moc promieniowana izotropowo w kierunku stacji linii radiowych od stacji VSAT, dB,
- G_r – zysk anteny odbiorczej stacji linii radiowych w kierunku stacji VSAT, dB,
- A – dodatkowe tłumienie trasy, przyjęto $A = 0$ i 20 dB.

Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 7.2 i 7.3.

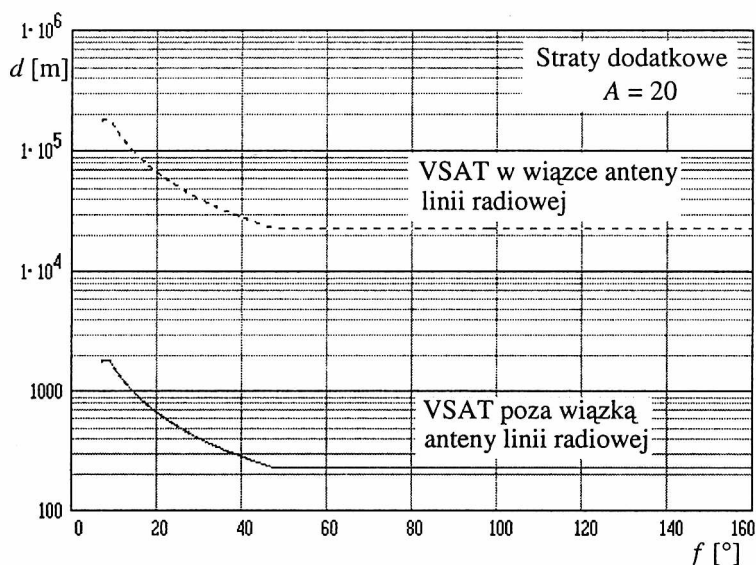
Wyniki analizy pokazują, że w przypadku pracy naziemnej stacji satelitarnej z małą anteną na tej samej częstotliwości, na której pracuje naziemna linia radiowa, niezależnie od ustawienia anteny stacji VSAT, odległość koordynacyjna wynosi co najmniej 2 km ($A = 0$ dB) wówczas, gdy sygnał zakłócający dochodzi do anteny linii radiowej pod kątem powyżej 90° oraz około 200 km, gdy zakłócenie wnika do odbiornika poprzez główną wiązkę anteny. W przypadku mniej korzystnego usytuowania stacji VSAT, np. dla kąta wypromieniowania zakłócenia wynoszącego 20° , odległość koordynacyjna może wzrosnąć odpowiednio do wartości 7 i 700 km. Dlatego też w razie wspólnego użytkowania tej samej częstotliwości procedura koordynacyjna jest konieczna. Jedynym rozwiązaniem jest unikanie tego typu sytuacji przez odpowiednią politykę przydziału częstotliwości.

7.5. DOBÓR ZAKRESÓW CZĘSTOTLIWOŚCI

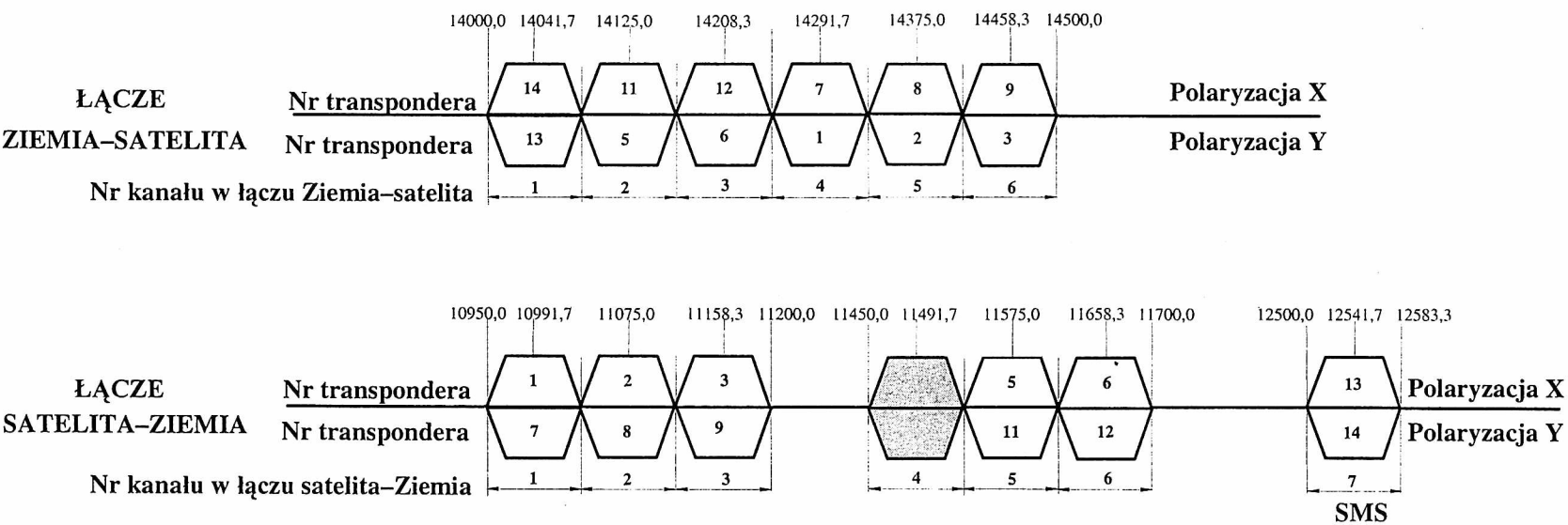
Z analizy sytuacji interferencyjnej przeprowadzonej dla stacji VSAT i stacji linii radiowej pracujących na tych samych częstotliwościach wynika, że uniknięcie procedury koordynacyjnej jest możliwe jedynie wtedy, gdy tego typu sytuacja nie będzie mogła wystąpić ze względu na odpowiedni rozdział częstotliwości. Według regulaminu radiokomunikacyjnego w zakresie 14 GHz mogą pracować w regionie A służby wymienione w tabeli 7.1.



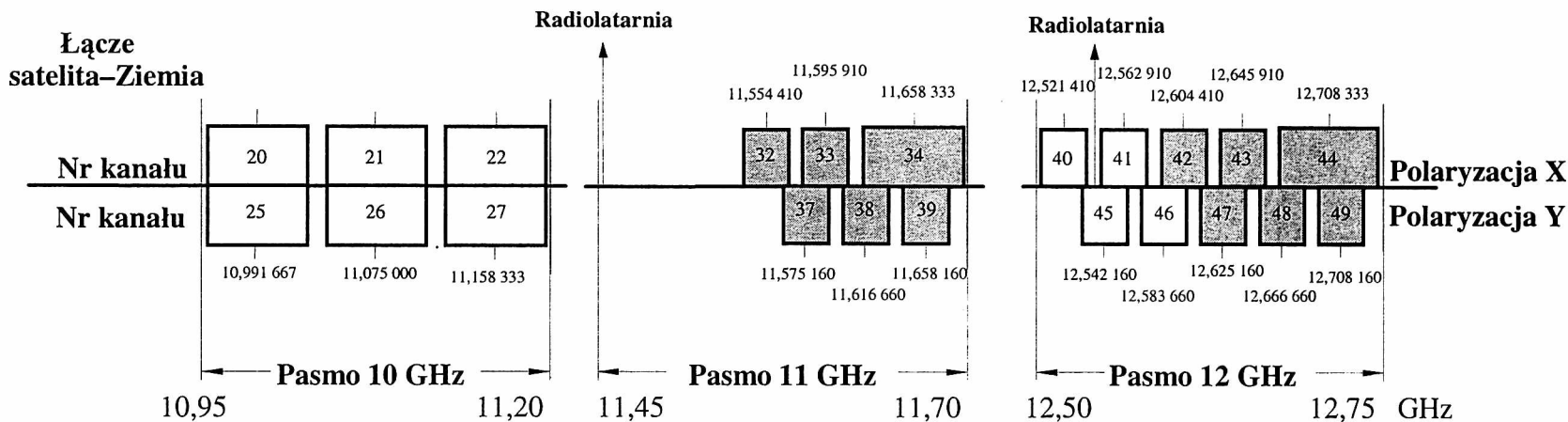
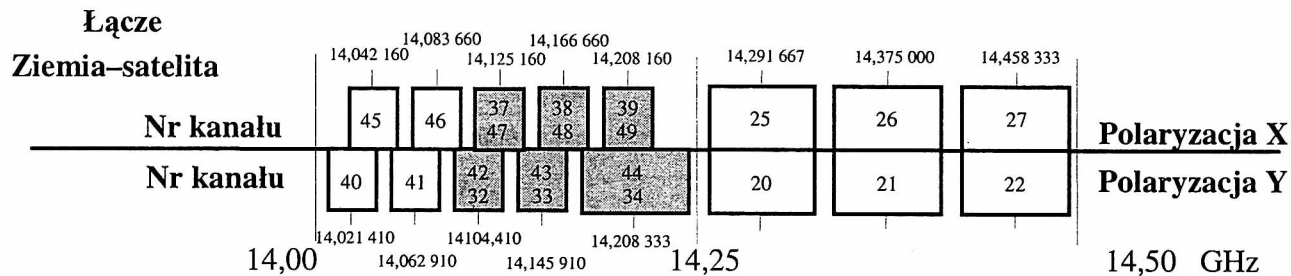
Rys. 7.2. Odległość koordynacyjna: naziemna stacja satelitarna VSAT – stacja linii radiowych (pracujące w tym samym pasmie użytecznym); linia przerywana – stacja VSAT w wiązce anteny linii radiowej ($G_r = 30$ dBi), linia ciągła – stacja VSAT poza wiązką ($G_r = -10$ dBi), tłumienie dodatkowe trasy $A = 0$ dB



Rys. 7.3. Odległość koordynacyjna: naziemna stacja satelitarna VSAT – stacja linii radiowych (pracujące w tym samym pasmie użytecznym); linia przerywana – stacja VSAT w wiązce anteny linii radiowej ($G_r = 30$ dBi), linia ciągła – stacja VSAT poza wiązką ($G_r = -10$ dBi), tłumienie dodatkowe trasy $A = 20$ dB



Rys. 7.4. Plan rozdziału częstotliwości transponderów w systemie SMS (ang. *Satellite Multiservice System*) dla satelitów typu EUTELSAT I [41]



Rys. 7.5. Plan rozdziału częstotliwości transponderów w systemie SMS dla satelitów typu EUTELSAT II [41]

Norma ETS 300 159 dopuszcza nadawanie przez stację VSAT w kierunku satelity w pasmie K_u jedynie w zakresie częstotliwości $14\div 14,5$ GHz.

Jednym z operatorów, który przewidział możliwość zastosowania transponderów na satelicie przez systemy VSAT, jest Eutelsat. Wydzielił on na satelitach typu EUTELSAT I i EUTELSAT II pewną część transponderów do wykorzystania przez wielu użytkowników w trybie jednej nośnej na kanał (SCPC) z dostępem z podziałem częstotliwości (FDMA). Plan przydziału częstotliwości pokazano na rysunkach 7.4 i 7.5.

Z analizy przydziału częstotliwości oraz dostępności transponderów wynika zatem, że nie jest konieczna koordynacja lokalizacji stacji satelitarnej VSAT w stosunku do stacji linii radiowych korzystających z tej samej częstotliwości użytecznej, jeśli naziemne stacje satelitarne z małą anteną nadawać będą w zakresie częstotliwości $14\div 14,25$ GHz.

Tabela 7.1. Przydział częstotliwości według regulaminu radiokomunikacyjnego (RR8-133, RR8-136)

Zakres częstotliwości GHz	Rodzaj służby	Uwagi
$14\div 14,25$	satelitarna stała (Ziemia-satelita), radionawigacja, badanie przestrzeni kosmicznej	–
$14,25\div 14,3$	satelitarna stała (Ziemia-satelita), radionawigacja, badanie przestrzeni kosmicznej	zakres ten przydzielony jest służbie stałej na zasadzie pierwszej ważności w Niemczech (zachodnie Landy), Austrii i innych krajach europejskich nie graniczących z Polską
$14,3\div 14,4$	stała, satelitarna stała (Ziemia-satelita), ruchowa (z wyjątkiem lotniczej), radionawigacja satelitarna	–
$14,4\div 14,47$	stała, satelitarna stała (Ziemia-satelita), ruchowa (z wyjątkiem lotniczej), radioastronomia	–

8. METODYKA POSTĘPOWANIA W RAZIE WYSTĄPIENIA ZAKŁÓCENIA

Zakłócenia wywołane promieniowaniem ubocznym mogą powodować:

- błędną pracę odbiornika przez cały czas,
- czasową błędną pracę odbiornika,
- obniżenie czasu dostępności systemu wywołane zredukowanym marginesem bezpieczeństwa dla tłumienia przez opady.

W razie występowania zakłóceń i wykrycia błędów w działaniu odbiornika lub skrócenia czasu jego dostępności, należy:

- zbadać, czy błędy są wywołane wadliwym działaniem odbiornika, nieodpowiednim zaplanowaniem systemu, czy też przez zakłócenia (uwaga: odbiornik może mieć nieodpowiedni poziom odporności na zakłócenia elektromagnetyczne generowane przez stację pracującą w innym pasmie częstotliwości),

- zlokalizować źródła zakłóceń,
- sprawdzić, czy stacja zakłócająca spełnia obowiązujące wymagania na promieniowanie uboczne:

- jeśli nie spełnia, to powinna zostać natychmiast wyłączona i poddana modyfikacjom,

- jeśli spełnia, to problem powinien być rozwiązany zgodnie z zaleceniami i umowami z agencją radiokomunikacyjną.

Rozwiązanie sytuacji, kiedy jedna stacja jest zakłócana przez drugą, może wymagać:

- zmiany częstotliwości pracy jednej ze stacji,
- zainstalowania dodatkowego ekranu (absorbcyjnego lub odbijającego) na trasie propagacji zakłócenia w pobliżu jednej ze stacji,

- zmiany lokalizacji jednej lub obu stacji w celu uzyskania dodatkowego tłumienia sygnału zakłócającego przez naturalne przeszkody lub budynki,

- indywidualnego poprawienia charakterystyki promieniowania jednej lub wielu stacji zakłócających tak, by spełniały wymagania w zakresie większym niż wymagany,

- wprowadzenie czasowego podziału czasu pracy stacji.

Zastosowanie jednej z wymienionych metod zależy od następujących okoliczności:

- intensywności występowania zakłóceń powyżej akceptowalnego poziomu,
- typu służby, w jakiej pracuje dana stacja (ciągła, czasowa, losowa, okresowa, długie transmisje, krótkie przekazy),

- zależności sygnału zakłócającego od trybu pracy stacji (z włączoną (wyłączoną) nośną),

- rodzaju trasy propagacji zakłócenia (bezpośrednia widoczność, odbicie od budynków, refrakcja, dyfrakcja, rozproszenie),

9. ANALIZA NORM ZWIĄZANYCH Z EMISYJNOŚCIĄ NAZIEMNYCH STACJI SATELITARNYCH VSAT

Poziom promieniowania niepożądanego wytwarzany przez naziemną stację satelitarną VSAT w jej otoczeniu jest ściśle ograniczany nie tylko przez normy europejskie opracowane w ETSI, ale również przez odpowiednie normy międzynarodowe ITU-R, jak również normy krajowe (np. FCC w Stanach Zjednoczonych). Normy te ulegają ciągłym modyfikacjom i zasadniczo różnią się od siebie. Modyfikacjom i daleko idącym zmianom podlegają również metody pomiarowe stosowane do testów na zgodność z normami. Implikują one konieczność weryfikacji sposobów interpretacji norm. Dlatego też duże znaczenie ma analiza i badanie skutków związanych z różnicami występującymi w normach w odniesieniu do modeli matematycznych stacji VSAT i sytuacji interferencyjnej wokół naziemnej stacji satelitarnej.

9.1. NORMY ITU ZWIĄZANE Z OKREŚLENIEM PARAMETRÓW TECHNICZNYCH TERMINALI VSAT

Parametry techniczne terminali VSAT przedstawiono w następujących zaleceniach ITU-R:

- zalecenie 725 *Parametry techniczne terminali VSAT* [15],
- zalecenie 726 *Maksymalne dopuszczalne poziomy promieniowania ubocznego terminali VSAT* [16],
- zalecenie 727 *Dyskryminacja polaryzacji ortogonalnej dla terminali VSAT* [17],
- zalecenie 728 *Maksymalne dopuszczalne poziomy widmowej gęstości zastępczej mocy promieniowanej izotropowo poza wiązką główną* [18],
- zalecenie 729 *Funkcje sterujące i monitorujące terminali VSAT*.

W zaleceniu 725 zdefiniowano terminal VSAT z punktu widzenia jego parametrów technicznych i eksploatacyjnych. Definicja ta jest w pełni zgodna z definicją przedstawioną w p. 1.1. Zalecenie 725 umożliwia rozpoznanie, czy naziemna stacja satelitarna, ze względu na swoje parametry, może być zaliczona do terminali VSAT. Zaliczenie takie zazwyczaj pociąga za sobą różne uregulowania prawne ułatwiające procedury legalizacyjne tego typu stacji.

Zalecenie 726 przedstawia wiele istotnych problemów związanych z pracą terminali VSAT i dotyczących promieniowania ubocznego. Stwierdza się, że należy w odpowiedni sposób chronić inne służby naziemne i satelitarne przed zakłóceniami wytwarzanymi przez terminale VSAT. Przewidywany jest znaczny wzrost liczby stosowanych terminali, jeśli ograniczenia związane z maksymalnymi poziomami dopuszczalnego promie-

niowania wytwarzanego przez terminale VSAT nie będą zbyt rygorystyczne. Zwraca się uwagę na specyfikę pracy nadawczo-odbiorczego terminalu VSAT, podkreślając, że w rzeczywistych warunkach przez większość czasu pracuje on jako terminal odbiorczy. Jedynie w niewielkim procencie czasu terminal nadaje. W większości analiz kompatybilnościowych zakłada się natomiast tzw. najgorszy przypadek, tzn. terminal nadaje przez cały czas, który w rzeczywistych warunkach nie występuje.

W kolejnych punktach zalecenia 726 wymienia się inne elementy mające wpływ na poziom wytwarzanych zakłóceń. Podczas jednoczesnej pracy różnych systemów VSAT na tym samym terenie wykorzystywane są różne częstotliwości nośne, poziomy promieniowania ubocznego wytwarzanego przez terminale tych systemów nie dodają się zatem na tych samych częstotliwościach. Ponadto, podczas pracy terminalu VSAT jako odbiornika (ang. *carrier off-case*) promieniowanie uboczne jest bardzo małe ze względu na umieszczenie przełącznika w stopniu wzmacniacza częstotliwości radiowych nadajnika. Sugeruje się stosowanie do badania terminali VSAT poziomów i metod pomiaru zakłóceń radioelektrycznych wytwarzanych przez urządzenia techniki informatycznej ITE określonych w publikacji 22 CISPR (1985). Uzasadnieniem jest podobieństwo układów cyfrowych przetwarzania sygnałów stosowanych w terminalach VSAT do układów stosowanych w urządzeniach techniki informatycznej.

9.1.1. GRANICZNE POZIOMY ZAKŁÓCEŃ RADIOELEKTRYCZNYCH W PASMIE 30÷1000 MHz

Zgodnie z zaleceniem 726 terminal VSAT powinien spełniać wymagania na graniczne poziomy zakłóceń radioelektrycznych określone w publikacji 22 CISPR (1985) dla sprzętu klasy A w zakresie częstotliwości od 30 do 960 MHz.

W zakresie częstotliwości od 30 do 1000 MHz norma ETS 300 673 w taki sam sposób definiuje graniczne poziomy zakłóceń radioelektrycznych. Norma ETSI traktuje terminal VSAT jako urządzenie klasy A. Wyznacza to odległość pomiarową równą 10 m. W zaleceniu ITU-R 726 terminal VSAT również należy traktować jako urządzenie klasy A (odległość pomiarowa 10 m).

Urządzeniami klasy A według CISPR 22 są urządzenia, których dotyczą ograniczenia co do miejsca ich użytkowania. Nie powinny być one dopuszczone do powszechnego użytku ani do wolnej sprzedaży, nie spełniają bowiem wymagań na klasę B. Urządzeniami klasy B są urządzenia, które ze względu na poziom emitowanych zakłóceń są wolne od ograniczeń w użytkowaniu i sprzedaży.

Zaliczenie wszystkich terminali VSAT do klasy A przez zalecenie 726 jest zbyt rygorystyczne. Obejmuje ono również terminale odbiorcze, które ze względu na swoje właściwości zakłócające nie różnią się od odbiorników telewizji satelitarnej, wolnych od ograniczeń związanych z warunkami sprzedaży i instalacji. Dlatego też wydaje się, że określenie klasy urządzenia przez producenta stosowane w normie ETSI jest bardziej właściwe. Ewentualną konieczność objęcia klasą A terminali VSAT należałoby ograniczyć do terminali nadawczo-odbiorczych.

Uwaga 2. zalecenia 726 łagodzi nieco konieczność zaliczania terminali VSAT do klasy A. Ze względu na restrykcyjną politykę sprzedaży i stosowania urządzeń klasy A w niektórych krajach, można przyjmować warunki pomiaru terminali VSAT odpowiadające urządzeniom klasy B.

Norma CISPR 22 (EN 55022 [22]) definiuje wymagania związane z emisyjnością sprzętu obejmowanego przez normę EN 50081-1 oraz sklasyfikowanego jako urządzenia techniki informatycznej ITE i urządzenia elektronicznego przetwarzania danych EDP. Częstotliwość zegara w tych urządzeniach jest zwykle większa niż 9 kHz. Urządzenia techniki informatycznej (ITE) definiuje się jako urządzenia przeznaczone do:

- otrzymywania danych z zewnętrznego źródła (takiego jak wejściowa linia danych lub klawiatura),
- przetwarzania otrzymanych danych (np. obliczenia, transformacja, zapis, uzupełnianie, sortowanie, przechowywanie lub transmisja danych),
- wyprowadzania danych zarówno do innych urządzeń, jak i tworzenia reprodukcji danych i innych obrazów.

Podczas analizy budowy i przeznaczenia terminalu VSAT można stwierdzić, że jego część domowa w pełni spełnia wymagania pozwalające zaliczyć ją do klasy urządzeń techniki informatycznej. Wątpliwości występują natomiast w przypadku rozważania części zewnętrznej terminalu VSAT, wliczając w nią również przewód łączący obie części.

W zaleceniu ITU-R, jak również w normie ETS 300 159, terminal testuje się jako całość (nie wyodrębnia się części domowej i zewnętrznej). Zalecenie 726 dopuszcza w trakcie pomiaru zastąpienie anteny obciążeniem (uwaga 1.). Biorąc jednak pod uwagę budowę współczesnych terminali VSAT, może się okazać, że terminal nie może nadawać, gdy nie ma połączenia ze stacją centralną. Zastąpienie anteny obciążeniem spowoduje konieczność dołączenia do terminalu symulatora stacji centralnej, zazwyczaj trudno dostępnego.

9.1.2. PROMIENIOWANIE UBOCZNE W OBSZARZE NIEPOŻĄDANYM POZA PASMEM PRACY

Zgodnie z zaleceniem 726, poza pasmem przypisanym satelitarnej służbie stałej (łącze Ziemia – satelita), wewnątrz którego przyznano systemowi VSAT częstotliwość pracy, zastępcza moc promieniowana izotropowo przez terminal VSAT w pasmie 100 kHz nie może przekraczać następujących poziomów dla kątów powyżej 7°:

- podczas pracy terminalu jako odbiornika (ang. *carrier-off case*), (uwzględniane są również terminale odbiorcze):

od 960 MHz do 10,7 GHz 48 dB(pW),
od 10,7 GHz do 21,2 GHz 54 dB(pW),
od 21,2 GHz do 40,0 GHz 60 dB(pW);

- podczas pracy terminalu VSAT jako nadajnika (ang. *carrier-on case*), z wyjątkiem zakresu częstotliwości ± 400 MHz od częstotliwości nośnej:

od 960 MHz do 3,4 GHz 49 dB(pW),
od 3,4 GHz do 10,7 GHz 55 dB(pW),
od 10,7 GHz do 21,2 GHz 61 dB(pW),
od 21,2 GHz do 40 GHz 67 dB(pW).

Poziomy dopuszczalnej zastępczej mocy promieniowanej izotropowo terminali VSAT zdefiniowane przez ITU-R (1992) w zaleceniu 726 porównano z poziomami wymaganymi przez normę ETS 300 159 obowiązującą w Europie.

Dla terminali VSAT pracujących jako odbiorniki poziomy zastępczej mocy promieniowanej izotropowo określono w obu dokumentach w identyczny sposób. Różnice występują przy definicji i wartościach poziomów granicznych zastępczej mocy promieniowanej izotropowo dla terminali pracujących jako nadajniki. W normie ETS 300 159 poziomy te są następujące:

49 dB(pW) w pasmie 100 kHz w zakresie 960;0 MHz do 3,4 GHz,
55 dB(pW) w pasmie 100 kHz w zakresie 3,4 GHz do 10,7 GHz,
61 dB(pW) w pasmie 100 kHz w zakresie 10,7 GHz do 21,2 GHz,
67 dB(pW) w pasmie 100 kHz w zakresie 21,2 GHz do 40,0 GHz,

czyli identyczne jak w zaleceniu 726 ITU-R. Rozbieżności dotyczą dalszych ustaleń w dwóch pasmach. W razie wystąpienia w pasmie od 13,6 do 14,9 GHz jednego lub więcej sygnałów silniejszych niż 61 dB(pW), należy ich moce zsumować w watach i porównać z poziomem dopuszczalnym 78 dB(pW). W razie wystąpienia w pasmie od 28,0 do 29,0 GHz jednego lub więcej sygnałów przekraczających poziom dopuszczalny 67 dB(pW), należy ich moce zsumować w watach i porównać z poziomem dopuszczalnym 78 dB(pW). Pasma pomiarowe w obu tych przypadkach wynosi 20 MHz.

W zaleceniu 726 ITU-R wyłącza się w sposób jednoznaczny obszar częstotliwości ± 400 MHz wokół częstotliwości nośnej nadajnika stacji z obszaru, w którym obowiązują dopuszczalne poziomy *EIRP* promieniowania ubocznego. Norma ETSI nie precyzuje w jednoznaczny sposób zakresu częstotliwości, w którym obowiązują dopuszczalne poziomy *EIRP*. Zakres częstotliwości można jedynie oszacować na podstawie definicji promieniowania ubocznego zawartej w *Regulaminie radiokomunikacyjnym*. Ze względu na konieczność weryfikacji parametrów stacji jednoznaczne określenie zakresu częstotliwości, w którym weryfikację należy przeprowadzić, jest lepszym rozwiązaniem.

9.1.3. PROMIENIOWANIE UBOCZNE W OBSZARZE PROMIENIOWANIA POŻĄDANEGO POZA PASMEM PROMIENIOWANIA POŻĄDANEGO

Zgodnie z zaleceniem 726 ITU-R, *EIRP* promieniowania ubocznego w obszarze promieniowania pożądanego nie może przekraczać wartości 4 dB(W) w pasmie 4 kHz dla częstotliwości z zakresu od 960 MHz do 40 GHz.

W normie ETS 300 159 dopuszczalny poziom *EIRP* promieniowania ubocznego (bez produktów intermodulacji) w obszarze promieniowania pożądanego i poza pa-

smem promieniowania pożądanego jest funkcją liczby stacji N , które mogą jednocześnie nadawać. Liczbę tę określa producent. Poziom dopuszczalny określa wyrażenie

$$4 - 10 \log N \text{ dB(W)}.$$

Szerokość pasma pomiarowego wynosi 100 kHz, a dopuszczalny poziom obowiązuje jedynie w zakresie od 14,0 do 14,5 GHz. Poza tym zakresem częstotliwości obowiązują dopuszczalne poziomy jak dla obszaru promieniowania niepożądanego (poza kątem 7° od osi głównej anteny) z uwzględnieniem zysku anteny w wiązce.

W wyjątkowych przypadkach w pasmie o szerokości równej pięciokrotnej szerokości pasma zajmowanego przez promieniowanie pożydane (ang. *occupied bandwidth* [67, § 146]) ze środkiem wyznaczonym przez częstotliwość nośną, dopuszczalny poziom promieniowania ubocznego (bez produktów intermodulacji) poza pasmem zajmowanym przez promieniowanie pożydane nie może przekroczyć wartości

$$18 - 10 \log N \text{ dB(W)}.$$

Szerokość pasma pomiarowego wynosi 100 kHz.

Jak zatem widać, zarówno definicja, jak i wartości oraz warunki pomiaru *EIRP* w obszarze promieniowania pożydanego różnią się w istotny sposób. Wartość podana w normie ETSI w znacznie większym stopniu ogranicza poziom promieniowania ubocznego. Nawet w przypadku $N = 1$ (jedna stacja może nadawać w danym czasie) pasmo pomiarowe wynoszące 100 kHz powoduje, że ograniczenie to jest bardziej rygorystyczne, niż ograniczenie zawarte w zaleceniu 726.

Uwaga 5. zalecenia 726 ITU-R próbuje zmniejszyć różnicę (w stosunku do normy ETSI) związaną z określeniem dopuszczalnego poziomu *EIRP* promieniowania ubocznego w obszarze promieniowania pożydanego poprzez uwzględnienie liczby jednocześnie pracujących terminali VSAT. Nie zmienia jednak pasma pomiarowego.

9.1.4. DYSKRYMINACJA POLARYZACJI

Zalecenie 727 ITU-R dotyczy dyskryminacji polaryzacji ortogonalnej dla terminali VSAT. Zgodnie z nim stosunek zysku anteny dla polaryzacji zamierzonej do zysku dla polaryzacji ortogonalnej anteny spolaryzowanej liniowo w przypisanym zakresie częstotliwości pracy nie powinien być mniejszy niż:

- 25 dB wewnątrz 0,3 dB konturu wiązki głównej i
- 20 dB poza tym konturem.

W normie ETS 300 159 wymagania dotyczące dyskryminacji polaryzacji zdefiniowano oddzielnie dla anteny nadawczej i odbiorczej.

Dla anteny nadawczej wymagania są następujące:

1. Dyskryminacja polaryzacji w pasmie nadawczym musi przekraczać wartość 28 dB w zakresie kątów, w których spadek zysku anteny jest mniejszy niż 1 dB.
2. Dyskryminacja polaryzacji w pasmie nadawczym musi przekraczać wartość 25 dB w zakresie kątów, w których spadek zysku anteny jest mniejszy niż 10 dB.

3. Dodatkowo, gdy producent tego wymaga, dyskryminacja polaryzacji w pasmie nadawczym musi przekraczać wartość 30 dB w zakresie kątów, w których spadek zysku anteny jest mniejszy niż 1 dB.

Niektórzy operatorzy satelitarni mogą wymagać jeszcze większej dyskryminacji polaryzacji.

Dla anteny odbiorczej wymagania obowiązują tylko wtedy, gdy żąda tego producent. W takim przypadku dyskryminacja polaryzacji w pasmie odbiorczym musi przekraczać wartość 27 dB w zakresie kątów, w których spadek zysku anteny jest mniejszy niż 1 dB. Niektórzy operatorzy satelitarni mogą żądać jeszcze większej dyskryminacji polaryzacji.

Z porównania wymagań wynika, że bardziej restrykcyjne (i lepiej chroniące inne służby przed zakłóceniami) są wymagania ETSI. Odnoszą się one do znacznie szerszego zakresu kątów i narzucają większe wartości dyskryminacji polaryzacji, przez co są trudniejsze do spełnienia przez producenta.

9.1.5. PROMIENIOWANIE POŻĄDANE POZA OBSZAREM PROMIENIOWANIA POŻĄDANEGO

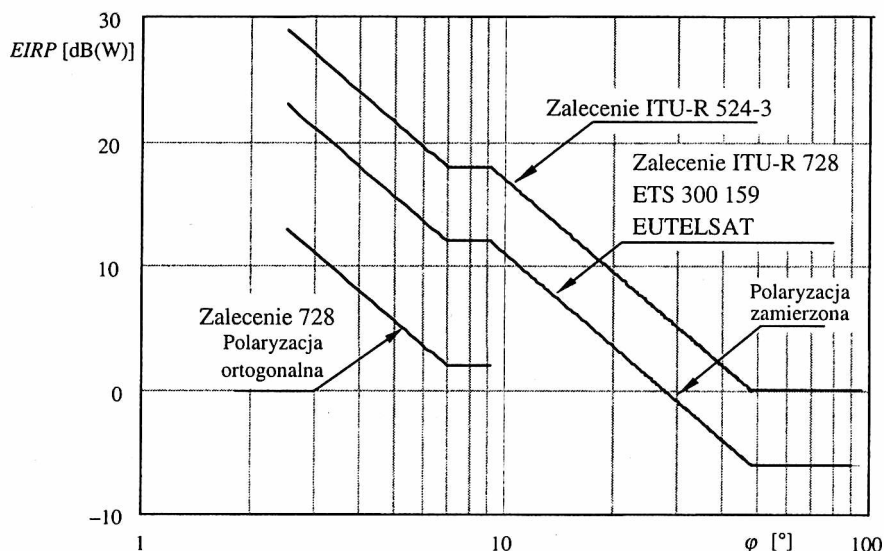
Zalecenie 728 określa dla terminalu VSAT pracującego w pasmie Ku dopuszczalne poziomy widmowej gęstości (podane dla pasma o szerokości 40 kHz) zastępczej mocy promieniowanej izotropowo poza wiązką główną (dla zamierzonej częstotliwości pracy). Ograniczenie $EIRP$ dotyczy tylko obszaru zawierającego się w 3-stopniowym sektorze kątowym wzdłuż orbity geostacjonarnej. Są one następujące:

33–25 log φ dB(W) dla	$2,5^\circ \leq \varphi \leq 7,0^\circ$,
12 dB(W) dla	$7,0^\circ \leq \varphi \leq 9,2^\circ$,
36–25 log φ dB(W) dla	$9,2^\circ \leq \varphi \leq 48,0^\circ$,
–6 dB(W) dla	$\varphi > 48,0^\circ$.

Ponadto składowa o polaryzacji ortogonalnej nie może przekraczać następujących wartości:

23–25 log φ dB(W) dla	$2,5^\circ \leq \varphi \leq 7,0^\circ$,
2 dB(W) dla	$7,0^\circ \leq \varphi \leq 9,2^\circ$.

W dodatkowych uwagach stwierdza się, że w systemach współpracujących z satelitami oddalonymi od siebie o około 2° , dopuszczalne wartości $EIRP$ powinny ulec zmniejszeniu o 8 dB. Dla systemów VSAT, w których terminale mogą nadawać jednocześnie w tych samych 40-kilohercowych pasmach, wartość dopuszczalna $EIRP$ powinna być zmniejszona o współczynnik $10 \log N$ (dB), gdzie N jest liczbą jednocześnie nadających terminali. Systemy tego typu stosują najczęściej kodowy dostęp do satelity tzw. CDMA. Przebieg określonych przez zalecenie 728 dopuszczalnych poziomów $EIRP$ wytwarzanych przez terminal VSAT w zakresie użytecznych częstotliwości (w pasmie 40 kHz) oraz ich porównanie z innymi zaleceniami i normami przedstawiono na rysunku 9.1.



Rys. 9.1. Porównanie dopuszczalnych poziomów EIRP w zakresie częstotliwości pracy terminalu VSAT (w paśmie 40 kHz)

W normie ETS 300 159 dopuszczalne poziomy EIRP dla terminalu VSAT są takie same jak w zaleceniu 728 i określono je dla tych samych warunków pomiarowych. Zalecenie 728 uwzględnia dodatkowo systemy VSAT współpracujące z satelitami odległymi od siebie o 2° łuku orbity geostacjonarnej, jak również systemy VSAT typu kratowego (ang. *mesh configuration* – konfiguracja kraty). Jest to bardzo istotne rozszerzenie z uwagi na coraz większą liczbę satelitów umieszczonych na orbicie geostacjonarnej, które nie spełniają warunku 3-stopniowej separacji kątowej oraz na coraz większe upowszechnianie się systemów stosujących kodowe zwielokrotnienie dostępu do satelity.

Wymagania na dopuszczalny poziom EIRP w zakresie częstotliwości pracy, stawiane terminalom VSAT przez największego europejskiego operatora systemów satelitarnych EUTELSAT, są również zgodne z wartościami podanymi w zaleceniu 728 i normie ETS 300 159. Poziomy te są bardziej rygorystyczne, niż obowiązujące w zaleceniu 524-3 i dotyczące innych systemów pracujących w służbie stałej satelitarnej (rys. 9.1).

9.2. PARAMETRY KOMPATYBILNOŚCIOWE NAZIEMNYCH STACJI SATELITARNYCH VSAT WYMAGANE PRZEZ EUTELSAT

Bardzo ważne jest porównanie parametrów kompatybilnościowych wymaganych przez głównego europejskiego operatora systemów satelitarnych EUTELSAT z normą europejską ETS 300 159. Niezbędne informacje można znaleźć w dokumencie wydanym przez Eutelsat [41]. Wszyscy działający w Polsce operatorzy systemu VSAT

korzystają z transponderów na satelitach Eutelsat. Dlatego też terminale VSAT działające w tych systemach muszą spełniać wymagania Eutelsat.

9.2.1. CHARAKTERYSTYKA PROMIENIOWANIA ANTENY NADAWCZEJ

Eutelsat narzuca ściśle wymagania związane z charakterystyką promieniowania anteny nadawczej terminalu VSAT. Dla kątów większych niż 1° liczonych od osi głównej wiązki anteny wymagane jest, by nie więcej niż 10% listków bocznych przekraczało poziom wyznaczony przez obwiednię daną za pomocą wzorów:

$$G = 32 - 25 \log \varphi \quad \text{dla } 1^\circ < \varphi \leq 48^\circ,$$

$$G = -10 \quad \text{dla } \varphi > 48^\circ,$$

przy czym G jest zyskiem energetycznym anteny nadawczej wyrażonym w decybelach (odniesionym do anteny izotropowej) określonym w kierunku orbity geostacjonarnej wewnątrz sektora kąтового o szerokości $3,5^\circ$ w kierunku północnym i $3,5^\circ$ w kierunku południowym od orbity geostacjonarnej, a φ jest kątem wyrażonym w stopniach pomiędzy osią głównej wiązki anteny i analizowanym kierunkiem.

Norma ETS 300 159 narzuca wymagania na charakterystykę zysku anteny nadawczej terminalu VSAT oraz charakterystykę zysku anteny odbiorczej. Wymagania związane z charakterystyką zysku anteny odbiorczej obowiązują tylko wtedy, gdy wymaga tego producent. Wymagania dla anteny nadawczej są następujące:

1. Średnia wartości zysku anteny G w funkcji kąta φ (wyznaczonego od osi głównej wiązki) dla wiązki głównej i co najmniej 90% listków bocznych dla polaryzacji zamierzonej nie może przekraczać następujących wartości:

$$G = 29 - 25 \log \varphi \quad \text{dla } 2,5^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ,$$

$$G = 8 \quad \text{dla } 7^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ,$$

$$G = 32 - 25 \log \varphi \quad \text{dla } 9,2^\circ < \varphi \leq 48^\circ,$$

$$G = -10 \quad \text{dla } \varphi > 48^\circ,$$

a dla polaryzacji ortogonalnej:

$$G = 19 - 25 \log \varphi \quad \text{dla } 2,5^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ,$$

$$G = -2 \quad \text{dla } 7^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ.$$

2. Maksymalna wartość zysku anteny G w funkcji kąta φ (wyznaczonego od osi głównej wiązki) dla wiązki głównej i listków bocznych dla polaryzacji zamierzonej nie może przekraczać następujących wartości:

$$G = 32 - 25 \log \varphi \quad \text{dla } 2,5^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ,$$

$$G = 11 \quad \text{dla } 7^\circ < \varphi \leq 12^\circ,$$

$$G = 38 - 25 \log \varphi \quad \text{dla } 12^\circ < \varphi \leq 33^\circ,$$

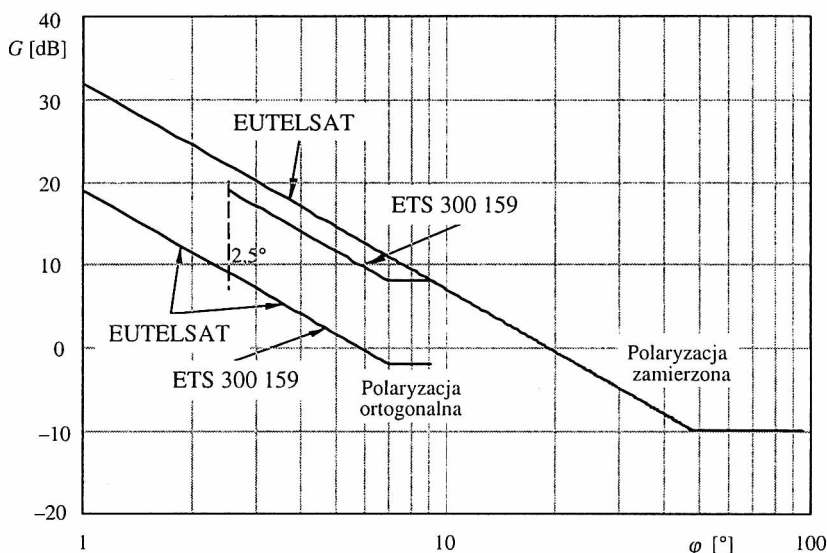
$$G = 0 \quad \text{dla } \varphi > 33^\circ,$$

a dla polaryzacji ortogonalnej:

$$G = 22 - 25 \log \varphi \quad \text{dla } 2,5^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ,$$

$$G = 1 \quad \text{dla } 7^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ.$$

Ze względu na sposób wyznaczenia charakterystyki promieniowania bezpośrednio można porównać jedynie wymagania Eutelsata z wymaganiami ETSI dla wartości średnich. Porównanie obu charakterystyk przedstawiono na rysunku 9.2.



Rys. 9.2. Charakterystyki zysku energetycznego G (dB) dla polaryzacji zamierzonej i ortogonalnej (wartości średnie dla wiązki głównej i 90% listków bocznych)

Jak widać, zalecenie ETS 300 159 wyznacza przebieg zysku energetycznego anteny nadawczej nieco bardziej rygorystycznie; nie obejmuje ono natomiast zakresu kątów od 1 do $2,5^\circ$. Przebiegi zysku energetycznego dla polaryzacji ortogonalnej określono w ETS 300 159 w zakresie kątów od $2,5$ do $9,2^\circ$, a w dokumencie Eutelsat w zakresie od 1 do $9,2^\circ$. Są one takie same w odpowiednich zakresach kątów. Zakres kątów w dokumencie ETS 300 159, dla którego podano zalecane przebiegi charakterystyki anteny dla polaryzacji zamierzonej i ortogonalnej, jest węższy (zaczyna się od kąta $2,5^\circ$). Jest to konsekwencją uwzględniania w dokumencie ETSI jedynie systemów współpracujących z satelitami geostacjonarnymi oddalonymi od siebie o 3° łuku orbity. Z uwagi na coraz częściej występujące tendencje zmierzające do umieszczania satelitów co 2° łuku orbity, definiowanie charakterystyki anteny od 1° jest perspektywiczne.

9.2.2. EIRP PROMIENIOWANIA UBOCZNEGO POZA PASMEM UŻYTECZNYM W OBSZARZE PROMIENIOWANIA POŻĄDANEGO

Eutelsat wymaga, aby zastępcza moc promieniowana izotropowo promieniowania ubocznego poza pasmem użytecznym stacji (w obszarze promieniowania pożądanego)

nie przekraczała 4 dB(W) w pasmie 4 kHz w zakresie częstotliwości 14÷14,5 GHz. W pasmie wykorzystywanym do transmisji (użytecznym), *EIRP* promieniowania ubocznego powinna być 55 dB poniżej *EIRP* nośnej.

Norma ETS 300 159 wymaga, aby poziom *EIRP* promieniowania ubocznego nie przekraczał wartości $4-10 \log N$ dB(W) w pasmie 100 kHz. N jest liczbą stacji, które mogą jednocześnie nadawać. Dla $N = 1$ poziomy podane w obu dokumentach są takie same, różnią się jednak pasmem pomiarowym, ze względu na to bardziej rygorystyczne jest wymaganie ETSI. Ponadto norma ETS 300 159 określa na znacznie niższym poziomie maksymalną wartość *EIRP* promieniowania ubocznego, gdy stacja pracuje z wyłączoną nośną (-21 dB(W)). Norma ETS nie określa natomiast żadnych wymagań na poziom *EIRP* w pasmie użytecznym.

9.2.3. *EIRP* PROMIENIOWANIA UBOCZNEGO POZA PASMEM UŻYTECZNYM W OBSZARZE PROMIENIOWANIA NIEPOŻĄDANEGO

Eutelsat narzuca również warunki związane z maksymalnymi wartościami zastępczej mocy promieniowanej izotropowo promieniowania ubocznego w obszarze promieniowania niepożądanego. Wartości te nie powinny przekraczać w pasmie pomiarowym 40 kHz dla polaryzacji zamierzonej następujących poziomów:

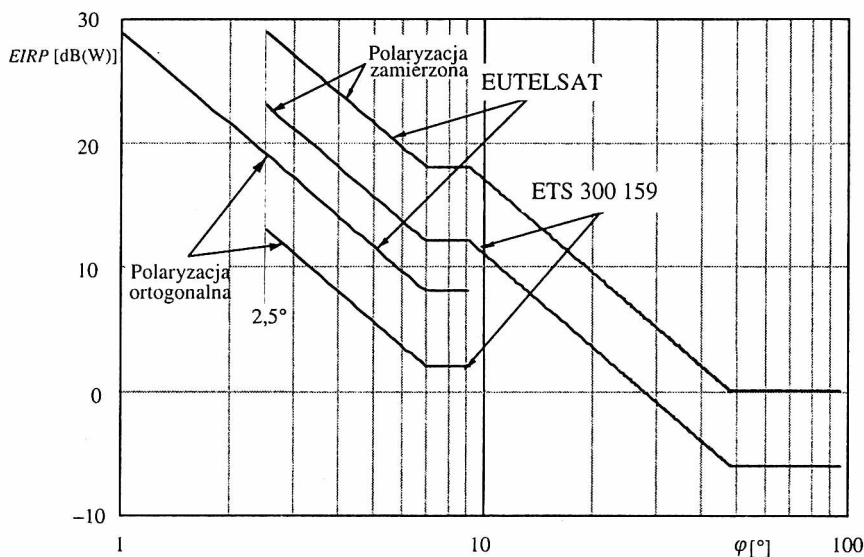
39-25 log φ dB(W) dla	$2,5^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ$,
18 dB(W) dla	$7^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ$,
42-25 log φ dB(W) dla	$9,2^\circ < \varphi \leq 48^\circ$,
0 dB(W) dla	$\varphi > 48^\circ$,

a dla polaryzacji ortogonalnej:

29-25 log φ dB(W) dla	$1^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ$,
8 dB(W) dla	$7^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ$,

φ jest kątem pomiędzy osią głównej wiązki anteny a rozważanym kierunkiem.

Norma ETS 300 159 określa maksymalną zastępczą moc promieniowaną izotropowo promieniowania ubocznego w obszarze promieniowania niepożądanego dla takiego samego pasma pomiarowego i w takich samych podzakresach kątowych dla polaryzacji zamierzonej. Dla polaryzacji ortogonalnej zakres kątów, dla którego *EIRP* jest ograniczone, jest szerszy w dokumencie Eutelsata i zaczyna się od 1° . Maksymalne wartości w zakresach kątów wspólnych dla obu dokumentów są o 6 dB niższe w normie ETSI, przez co norma ta jest bardziej rygorystyczna. Nie definiuje ona jednak maksymalnych wartości *EIRP* dla polaryzacji ortogonalnej w zakresie kątów od 1° do $2,5^\circ$. Oznacza to, że stacje spełniające normę ETSI mogą nie spełniać wymagań Eutelsata, jeśli poziom *EIRP* dla polaryzacji ortogonalnej w zakresie kątów od 1° do $2,5^\circ$ nie spełnia wymagań Eutelsata. Porównanie maksymalnych wartości *EIRP* promieniowania ubocznego w obszarze promieniowania niepożądanego poza pasmem użytecznym w zakresie częstotliwości 14÷14,5 GHz przedstawiono na rysunku 9.3.



Rys. 9.3. Porównanie maksymalnych poziomów $EIRP$ promieniowania ubocznego w obszarze promieniowania niepożądanego poza pasmem użytecznym w zakresie częstotliwości od 14 do 14,5 GHz wymaganych przez Eutelsata i ETSI

9.2.4. DYSKRYMINACJA POLARYZACJI

W dokumencie Eutelsata są również określone wymagania związane z dyskryminacją polaryzacji systemu antenowego w pasmie od 14 do 14,25 GHz. Dyskryminacja polaryzacji powinna być nie gorsza niż 35 dB w obrębie głównej wiązki ograniczonej kątem odpowiadającym 1 dB spadkowi zysku energetycznego anteny. Zaleca się również (nie jest to jednak wymaganie), aby taka sama dyskryminacja była w zakresie częstotliwości od 12,5 do 12,75 GHz, a więc w zakresie odbiorczym.

Antena powinna umożliwiać ustawienie płaszczyzny polaryzacji z błędem nie większym niż $\pm 0,5^\circ$.

Norma ETS 300 159 jest mniej rygorystyczna w odniesieniu do dyskryminacji polaryzacji. Wymaganie dotyczy anteny nadawczej w zakresie częstotliwości od 14 do 14,5 GHz. Dyskryminacja polaryzacji nie powinna być gorsza niż 25 dB w obrębie głównej wiązki ograniczonej kątem odpowiadającym 1 dB spadkowi zysku energetycznego anteny. Jak zatem widać, istnieje aż 10 dB różnica na wymagania dotyczące dyskryminacji polaryzacji w nadawczym zakresie częstotliwości pracy stacji. Norma ETS zaleca ponadto, by dyskryminacja polaryzacji w nadawczym zakresie pracy stacji nie była gorsza niż 30 dB, a w odbiorczym 27 dB. Zakres katowy obowiązywania wymienionych wcześniej wartości jest taki sam jak poprzednio. Z porównania wymagań związanych z dyskryminacją polaryzacji zawartych w dokumencie Eutelsata i normie ETSI widać, że występują znaczne rozbieżności. Stacja satelitarna spełniająca w zakresie dyskryminacji polaryzacji normę ETSI może nie spełniać wymagań Eutelsata.

Norma ETSI wymaga, by antena umożliwiała ustawienie płaszczyzny polaryzacji z błędem nie większym niż 1° . Błąd ten jest dwa razy większy niż wymagany przez Eutelsata. Jak więc widać, Eutelsat bardziej rygorystycznie traktuje wszystkie parametry związane z jakością polaryzacyjną anteny.

Po porównaniu wymagań Eutelsata i ETSI związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną stacji satelitarnej VSAT widać, że część z nich jest bardziej rygorystycznie definiowana w dokumencie Eutelsata, a część w normie ETSI. Wynika stąd wnioski, że stacja satelitarna spełniająca wymagania ETSI nie musi spełniać wymagań Eutelsata i odwrotnie. Ponadto Eutelsat nie definiuje wielu istotnych parametrów ograniczających zakłócający wpływ stacji satelitarnej na inne służby radiokomunikacyjne. Dlatego też ze względów kompatybilnościowych stacja VSAT musi spełniać wymagania zawarte w normie ETS 300 159, a ponadto – jeśli współpracuje z satelitami Eutelsata – musi również spełniać wymagania tej organizacji.

9.3. PARAMETRY KOMPATYBILNOŚCIOWE NAZIEMNYCH STACJI SATELITARNYCH VSAT WYMAGANE PRZEZ FCC

Na terytorium Stanów Zjednoczonych gospodarką widmem oraz kompatybilnością elektromagnetyczną systemów radiokomunikacyjnych zajmuje się Federalna Komisja Łączności FCC. Komisja ta wydaje swoje zalecenia. Rozdział 25, podrozdział C tych zaleceń dotyczy wymagań technicznych, jakie muszą spełniać naziemne stacje satelitarne pracujące w służbie stałej satelitarnej w USA.

Istnieje wiele czynników, z uwagi na które należy zwracać uwagę na wymagania stawiane naziemnym stacjom satelitarnym przez FCC. Czynnikiem tymi są:

- doświadczenie, jakie operatorzy systemów satelitarnych zgromadzili w okresie ich użytkowania; większość obecnie użytkowanych systemów satelitarnych, w tym systemy VSAT, były wprowadzane najwcześniej w USA, dlatego doświadczenia nabyte przez amerykańskich operatorów są największe;

- powszechne stosowanie w USA stacji satelitarnych, w tym terminali VSAT; za instalowane w USA terminale VSAT to około 80% wszystkich terminali zainstalowanych na świecie;

- stosowanie w radiokomunikacji satelitarnej narodowych satelitów rozmieszczanych na orbicie geostacjonarnej co 2° ; wpływa to szczególnie na wymagania stawiane antenom naziemnych stacji satelitarnych; w Europie dopiero obecnie planuje się przejście na 2-stopniowy odstęp pomiędzy satelitami geostacjonarnymi; wpływ, jaki to przejście spowoduje na normy ETSI, będzie w najbliższej przyszłości analizowany przez komitet techniczny TC SES; rezultaty analizy wpłyną na postać norm związanych z systemami VSAT;

- na terenie USA obowiązuje inny niż w Europie rozdział częstotliwości pomiędzy służbami satelitarne i ziemskie; nie należy się spodziewać, że parametry stacji naziem-

nych wpływające na zakłócanie służb ziemskich będą bardziej rygorystyczne w USA niż w Europie, ponieważ rozdział częstotliwości w USA pomiędzy służby satelitarne i ziemskie powoduje mniej konfliktowych sytuacji niż w Europie.

Jednym z podstawowych parametrów, który należy uwzględnić, jest charakterystyka zysku energetycznego anteny naziemnej stacji satelitarnej. Normy amerykańskie określają tę charakterystykę tylko przy nadawaniu.

1. Charakterystyka ta w płaszczyźnie orbity geostacjonarnej powinna leżeć poniżej obwiedni określonej wzorami:

$$\begin{aligned} G &= 29-25 \log \varphi \text{ dBi} & \text{dla } 1^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ, \\ G &= 8 \text{ dBi} & \text{dla } 7^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ, \\ G &= 32-25 \log \varphi \text{ dBi} & \text{dla } 9,2^\circ < \varphi \leq 48^\circ, \\ G &= -10 \text{ dBi} & \text{dla } \varphi > 48^\circ. \end{aligned}$$

W zakresie kątów od 1° do 7° żaden listek boczny nie może przekroczyć obwiedni. Dla kątów większych niż 7° obwiednię może przekraczać nie więcej niż 10% listków bocznych, pod warunkiem, że żaden z nich nie przewyższa obwiedni o więcej niż 3 dB.

Dla pozostałych kierunków zysk anteny powinien być mniejszy od poziomów wyznaczonych przez obwiednię daną wzorami:

$$\begin{aligned} G &= 32-25 \log \varphi \text{ dBi} & \text{dla } 1^\circ \leq \varphi \leq 48^\circ, \\ G &= -10 \text{ dBi} & \text{dla } \varphi > 48^\circ. \end{aligned}$$

Obwiednia może być przekraczana przez nie więcej niż 10% listków bocznych, pod warunkiem, że żaden z nich nie jest większy od niej o więcej niż 6 dB.

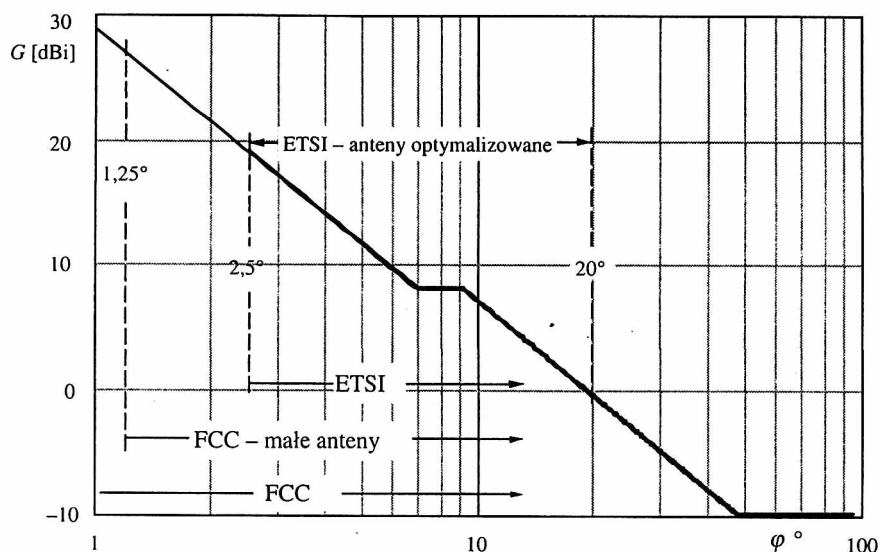
2. Zysk energetyczny anteny dla polaryzacji ortogonalnej podczas nadawania nie powinien przekraczać obwiedni danej wzorami:

$$\begin{aligned} G &= 19-25 \log \varphi \text{ dBi} & \text{dla } 1,8^\circ < \varphi \leq 7^\circ, \\ G &= -2 \text{ dBi} & \text{dla } 7^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ. \end{aligned}$$

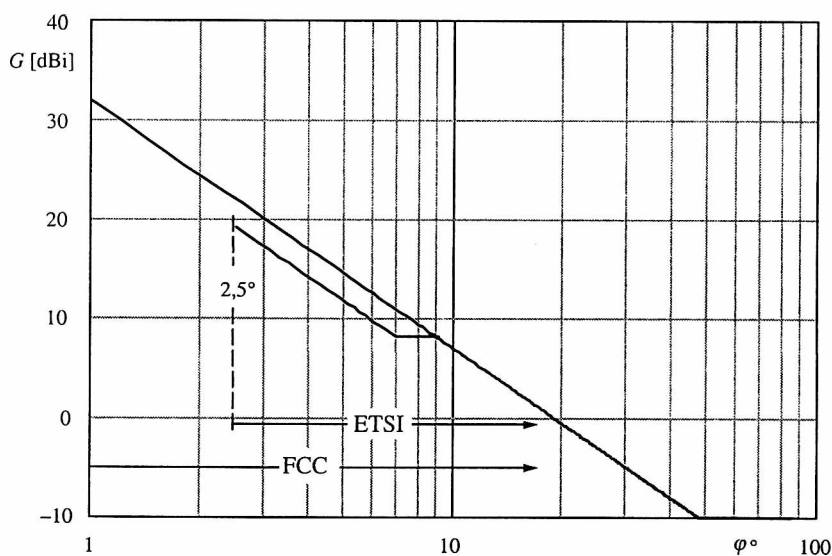
3. Dla anten o średnicy apertury 1,2 m i mniejszych, pracujących w zakresie 12/14 GHz, zysk energetyczny jest określony dla zakresu rozpoczynającego się od kąta $1,25^\circ$, zamiast podanego w punkcie 1. kąta 1° .

Z porównania wymagań FCC z zaleceniami normy ETS 300 159 widać bardzo duże podobieństwa. Zasadnicza różnica występuje w określeniu początku zakresu kątów, w którym obowiązują ograniczenia związane z zyskiem anteny. W normie ETS dolny zakres kątów jest ograniczony dla anteny nadawczej przez $2,5^\circ$, a odbiorczej $2,8^\circ$. Dokument amerykański uwzględnia zakres kątów rozpoczynający się od 1° , a dla małych anten $1,25^\circ$. Wynika to z uwzględnienia przez FCC 2-stopniowego odstępu pomiędzy satelitami geostacjonarnymi. Ponadto w zaleceniu FCC przebieg obwiedni zysku anteny jest taki sam, jak w normie ETSI jedynie w płaszczyźnie orbity geostacjonarnej. Poza tą płaszczyznę wymagania są mniej rygorystyczne. Norma ETSI łądzi jedynie swoje zalecenia związane z zyskiem w odniesieniu do anten o minimalizowanym zysku w kierunku orbity geostacjonarnej. Dla tego typu anten takie same zalecenia mają być spełnione w zakresie kątów od $2,5^\circ$ (odbiorcza $2,8^\circ$) do 20° w ± 3 -stopniowym obszarze orbity geostacjonarnej. Porównanie przebiegów charakte-

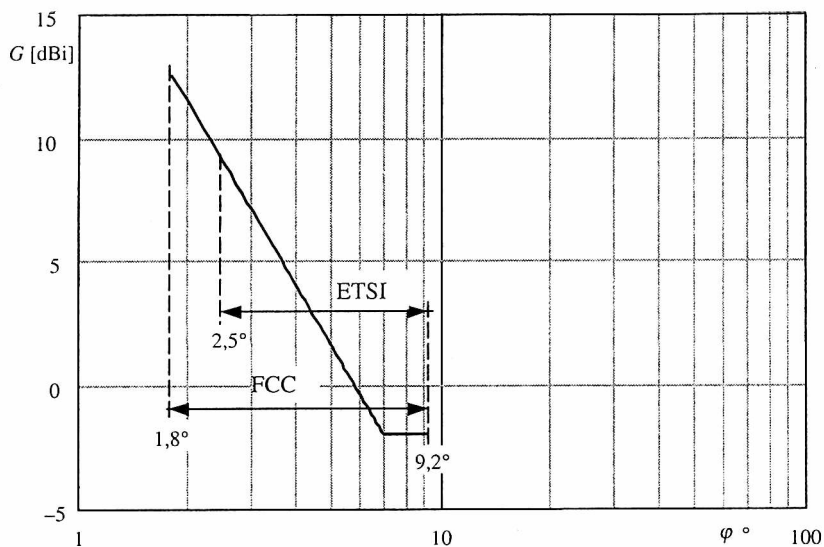
rystryki zysku energetycznego zalecanych przez FCC i ETSI przedstawiono na rysunkach 9.4÷9.6.



Rys. 9.4. Porównanie zaleceń ETSI (wartości średnie) i wymagań FCC dotyczących zysku energetycznego anteny satelitarnej w kierunku orbity geostacjonarnej



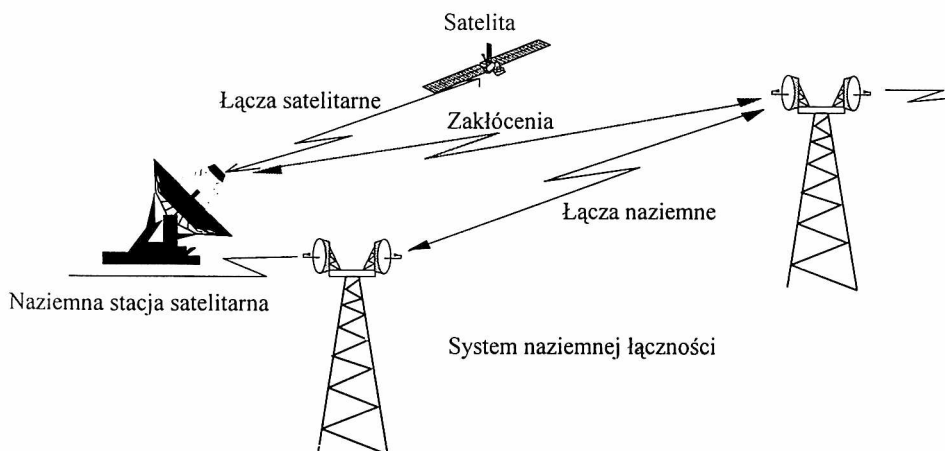
Rys. 9.5. Porównanie zaleceń ETSI (wartości średnie) i wymagań FCC dotyczących zysku energetycznego anteny satelitarnej na kierunkach innych niż do orbity geostacjonarnej



Rys. 9.6. Porównanie zaleceń ETSI (wartości średnie) i wymagań FCC dotyczących zysku energetycznego anteny satelitarnej dla polaryzacji ortogonalnej

10. KOORDYNACJA MIĘDZYNARODOWA

Ze względu na konieczność efektywnego użytkowania widma w wielu przypadkach systemy satelitarne i naziemne pracują w tych samych pasmach częstotliwości. Istnieje wtedy ryzyko, że transmisja z nadajnika naziemnej stacji satelitarnej zakłóci pracę odbiornika systemu naziemnego lub odwrotnie – nadajnik systemu naziemnego zakłóci pracę odbiornika naziemnej stacji satelitarnej. Sytuację tę przedstawiono na rysunku 10.1. Z tego względu częstotliwości pracy naziemnych stacji satelitarnych i nadajników naziemnych systemów łączności, które mogą się wzajemnie zakłócać, muszą być koordynowane. Koordynacja dotyczy obszaru na powierzchni Ziemi w otoczeniu naziemnej stacji satelitarnej, w którym poziom zakłóceń nie może być pominięty. Obszar ten może obejmować terytoria znajdujące się pod kontrolą innej administracji. Stosowane metody koordynacji muszą więc być jednolite. Stosuje się je w uzgodnieniach prowadzonych na szczeblu międzynarodowym. Metody międzynarodowej koordynacji położenia stacji satelitarnych opracowano w ITU. Opisano je w dodatku nr 28 do *Regulaminu radiokomunikacyjnego* [67] oraz w zaleceniach ITU-R o numerach: IS.847-1 [51], IS.848-1 [52], IS.849-1 [53] i IS.850-1 [54]. Dodatek nr 28 do *Regulaminu radiokomunikacyjnego* jest dokumentem obowiązującym wszystkie administracje zrzeszone w ITU. Jego forma jest nie zmieniana od kilkunastu lat. Szybki rozwój systemów satelitarnych powoduje konieczność modyfikacji dodatku 28. Proponowane zmiany zawarte są w zaleceniach IS.848-1 do IS.850-1. Będą one przedmiotem dyskusji podczas kolejnej światowej konferencji radiokomunikacyjnej WRC w roku 2000.



Rys. 10.1. Przenikanie zakłóceń pomiędzy systemami satelitarnymi i naziemnymi

Zalecenie IS.847-1 opisuje procedurę wyznaczenia obszaru koordynacyjnego naziemnej stacji satelitarnej współpracującej z geostacjonarnym satelitą w pasmie wykorzystywanym przez służbę naziemną (ang. *Terrestrial Service*). Większość satelitar-

nych systemów stosuje inne pasma częstotliwości do nadawania w kierunku satelity i inne do odbioru sygnałów z satelity. W tablicy alokacji częstotliwości są jednak pasma, z których systemy satelitarne mogą korzystać dla łączności w obu kierunkach. Wyznaczanie obszaru koordynacyjnego dla tego typu systemów przedstawiono w zaleceniu IS.848-1. Naziemne stacje satelitarne, dla których wyznaczane są obszary koordynacyjne zgodnie z zaleceniami IS.847-1 i IS.848-1, mają jedną bardzo ważną wspólną cechę – współpracują z satelitą geostacjonarnym lub z satelitą quasi-geostacjonarnym, tzn. o okresie obiegu równym okresowi obrotu Ziemi i znajdującym się na orbicie o bardzo małym kącie inklinacji. Azymut i kąt elewacji naziemnej stacji satelitarnej współpracującej z takim satelitą jest stały. Oznacza to również, że promieniowanie poza główną wiązką anteny w kierunku horyzontu jest stałe. Można je wyznaczyć w funkcji azymutu od naziemnej stacji satelitarnej. Inna sytuacja występuje, gdy naziemna stacja satelitarna współpracuje z satelitami znajdującymi się na niskich LEO, średnich MEO/ICO orbitach kołowych lub na silnie eliptycznej orbicie HEO. Warunek utrzymania ciągłej łączności wymaga sterowania anteną w bardzo dużym zakresie kątów. Powoduje to zmiany w czasie poziomu promieniowania w kierunku horyzontu. Należy przypuszczać, że liczba naziemnych stacji satelitarnych współpracujących z satelitami tworzącymi konstelacje LEO, MEO/ICO i HEO będzie wzrastać wraz z rozwojem satelitarnych systemów wolnej transmisji danych tzw. „Little/Small LEO”, satelitarnych systemów świadczących usługi telefoniczne tzw. „Big LEO” oraz multimedialnych szerokopasmowych systemów satelitarnych BSM. Niektóre z tych systemów już pracują, np. Orbcomm, Iridium. Pozostałe rozpoczną działanie w najbliższych latach, np. Leo One, Globalstar, Skybridge. Naziemne stacje satelitarne stanowią integralną część tych systemów. Spełniają one rolę podobną do stacji bazowych (ang. *Gateway*) i zapewniają dostęp do naziemnej infrastruktury telekomunikacyjnej. Metody wyznaczania obszaru koordynacyjnego dla tego typu stacji przedstawiono w IS.849-1. Istnieją również inne potencjalne możliwości wystąpienia zakłóceń pomiędzy naziemnymi stacjami satelitarnymi i systemami naziemnymi, które nie są objęte zaleceniami IS.847-1 i IS.849-1. Dla tych przypadków przygotowano w zaleceniu IS.850 tablicę ze wstępnie ustalonymi promieniami obszaru koordynacyjnego. W zależności od sytuacji promień obszaru koordynacyjnego przyjmuje następujące wartości: 100, 400, 500 lub 1000 km.

10.1. WYZNACZANIE OBSZARU KOORDYNACYJNEGO ZGODNIE Z ZALECENIEM IS.847-1

Opisana w dalszej części metoda wyznaczania obszaru koordynacyjnego jest zawarta w dodatku 28 do *Regulaminu radiokomunikacyjnego* [67] oraz w zaleceniu IS.847-1 [51]. Dotyczy ona tylko naziemnych stacji satelitarnych zainstalowanych na

powierzchni Ziemi. Obszar koordynacyjny wyznacza się na powierzchni Ziemi przez podanie konturu stanowiącego granice tego obszaru. Na zewnątrz obszaru koordynacyjnego zakłócenia pochodzące od analizowanej naziemnej stacji satelitarnej można pominąć. Metoda dotyczy tylko naziemnych stacji satelitarnych spełniających następujące warunki:

- pracujących w zakresie częstotliwości od 1 do 60 GHz,
- stosujących rozdzielne pasma do transmisji sygnału do satelity i odbioru sygnału z satelity,
- pracujących w zakresach częstotliwości stosowanych również przez służby naziemne.

Poziom zakłóceń w odbiorniku zależy od charakterystyki źródła zakłóceń oraz strat propagacyjnych. Straty propagacyjne są funkcją długości i geometrii trasy propagacji uwzględniającej, np. lokalne przesłony terenowe, kierunkowość anteny, warunki klimatyczne i procent czasu, podczas którego straty propagacyjne mają być większe od zadanej wartości. Na wszystkich azymutach od nadawczej lub odbiorczej naziemnej stacji satelitarnej wyznaczane są odległości, w których straty propagacyjne przekraczają zadaną wartość dla określonego procentu czasu. Tak wyznaczona odległość jest nazywana odległością koordynacyjną. Punkty końcowe odległości koordynacyjnej wyznaczone dla wszystkich azymutów tworzą kontur koordynacyjny wokół naziemnej stacji satelitarnej. Wewnątrz tego konturu znajduje się obszar koordynacyjny. Dla stacji pracujących w systemach naziemnej łączności (w służbie naziemnej) i położonych na zewnątrz obszaru koordynacyjnego prawdopodobieństwo powodowania zakłóceń lub bycia zakłócanym jest pomijalne. Oznacza to, że obecność infrastruktury łączności naziemnej w obszarze koordynacyjnym może spowodować zakłócenia. Należy podkreślić, że przyjęcie założeń, które z ograniczoną dokładnością opisują rzeczywistą sytuację i rzeczywiste systemy, powoduje, że zakłócenia pomiędzy naziemną stacją satelitarną i stacjami naziemnej łączności, położonymi w obszarze koordynacyjnym, mogą nie wystąpić i systemy mogą pracować jednocześnie z zadowalającą jakością. Jeśli stacja systemu naziemnego została skoordynowana w obszarze koordynacyjnym naziemnej stacji satelitarnej, to stacje te nie zakłócają się. Dlatego też nie wymaga się od administracji unikania instalacji nowych systemów łączności naziemnej w obszarze koordynacyjnym.

Podczas określania obszaru koordynacyjnego należy rozpatrzyć dwa przypadki:

- naziemna stacja satelitarna pracuje jako stacja nadawcza, a więc powoduje zakłócenia w stosunku do stacji łączności naziemnej (np. linii radiowych),
- naziemna stacja satelitarna pracuje jako stacja odbiorcza, a więc jest narażona na zakłócenia ze strony stacji łączności naziemnej.

Naziemna stacja satelitarna podczas nadawania lub odbioru może stosować różne klasy emisji. Do określenia obszaru koordynacyjnego należy wybierać zawsze takie wartości parametrów, które prowadzą do otrzymania największej odległości koordynacyjnej. Analizować należy wszystkie wiązki antenowe i wszystkie pasma wspólnie użytkowane ze służbami naziemnymi.

Wraz z konturem koordynacyjnym powinno się wyznaczyć kontury pomocnicze odpowiadające mniej krytycznym założeniom. Mogą one być użyte do eliminacji z dalszych rozważań niektórych istniejących lub planowanych stacji znajdujących się w obszarze koordynacyjnym bez konieczności prowadzenia dokładniejszych obliczeń. Powinno się również wykreślić kontury pomocnicze w sytuacji, gdy na podstawie bardziej szczegółowych danych dotyczących konkretnych stacji łączności naziemnej i satelitarnej, wyznaczone kontury obejmują mniejszy obszar niż kontur koordynacyjny.

Jeśli naziemna stacja satelitarna współpracuje z satelitą znajdującym się na kołowej orbicie geosynchronicznej o małym kącie inklinacji, to obszar koordynacyjny powinien być wyznaczony dla minimalnego kąta elewacji anteny i odpowiadającego temu kątowni azymutu.

10.1.1. WSTĘPNE ZAŁOŻENIA

Podstawę do obliczenia odległości koordynacyjnej stanowi założenie, że tłumienie sygnału niepożądanego (zakłócającego) jest monotonicznie rosnącą funkcją odległości. Wymagana wartość tłumienia między zakłócającym nadajnikiem i zakłócanym odbiornikiem jest określona przez „minimalną dopuszczalną tłumienność trasy (w dB) w ciągu p procent czasu” (rzeczywista tłumienność trasy może być mniejsza od tej wartości co najwyżej w ciągu 100- p procent czasu)⁽¹⁾.

$$L(p) = P_t' - P_r(p) \quad \text{dB}, \quad (10.1)$$

przy czym:

$P_t'^{(2)}$ – maksymalna moc dysponowana (dB(W)) w pasmie odniesienia na zaciskach wejściowych anteny stacji zakłócającej,

$P_r(p)$ – dopuszczalna moc zakłóceń interferencyjnych (dB(W)) w pasmie odniesienia przekraczana w ciągu nie więcej niż p procent czasu na zaciskach wejściowych odbiornika stacji zakłócanej (zakłócenia pochodzą od jednego źródła).

Zależność (10.1) jest słuszna tylko wtedy, gdy moce P_t' i $P_r(p)$ są określone w tym samym pasmie częstotliwości (pasmie odniesienia) oraz tłumienie trasy $L(p)$ i moc zakłóceń $P_r(p)$ są określone dla tego samego procentu czasu.

Dla małych procentów czasu, z jakimi mamy do czynienia w obliczaniu odległości koordynacyjnych, wystarczy uwzględnić tylko dwa zasadniczo różne mechanizmy propagacji sygnału zakłócającego:

- mod (1), rozchodzący się wzdłuż wielkiego koła (propagacja ortodromowa), przy czym warunki propagacji są określone zarówno przez właściwości elektryczne powierzchni Ziemi, jak i stan troposfery; mod (1) ujmuje łącznie efekt dyfrakcji, superrefrakcji i propagacji w duktach,

⁽¹⁾ Dla procentów p małych z zakresu od 0,001% do 1,0% mówimy o krótkookresowości (*short-term*), dla $p \geq 20\%$ o długookresowości (*long-term*).

• mod (2), ujmujący rozpraszanie fali elektromagnetycznej przez opady (zwykle deszcz); propagacja modu (2) nie jest ograniczona do drogi wyznaczonej przez łuk wielkiego koła (propagacja pozaortodromowa).

Tłumienność trasy dla modu propagacji (1) jest wyznaczana na podstawie tłumienności wolnej przestrzeni (tłumienie pomiędzy izotropowymi antenami, nazywane również podstawowymi stratami transmisji) oraz zyski energetyczne anten na obu końcach trasy sygnału zakłócającego. Minimalna dopuszczalna tłumienność wolnej przestrzeni może być wyznaczona z zależności

$$L_b(p) = P'_t + G'_t + G_r - P_r(p) \quad \text{dB}, \quad (10.2)$$

przy czym:

$L_b(p)$ – minimalne dopuszczalne tłumienie wolnej przestrzeni dla $p\%$ czasu; tłumienie wolnej przestrzeni musi przekraczać tę wartość przez $p\%$ czasu,

G'_t – zysk energetyczny (w stosunku do izotropowej anteny) anteny nadawczej stacji zakłócającej; jeśli zakłóca naziemna stacja satelitarna, to zysk energetyczny należy wyznaczyć w kierunku fizycznego horyzontu na danym azymucie; jeśli zakłóca stacja naziemna, to należy przyjąć maksymalny oczekiwany zysk energetyczny,

G_r – zysk energetyczny (w stosunku do izotropowej anteny) anteny stacji zakłócającej; jeśli zakłócana jest naziemna stacja satelitarna, to zysk energetyczny należy wyznaczyć w kierunku fizycznego horyzontu na danym azymucie; jeśli zakłócana jest stacja naziemna, to należy przyjąć maksymalny oczekiwany zysk energetyczny.

Sposób wyznaczania kąta od osi głównej wiązki anteny satelitarnej do horyzontu w funkcji azymutu przedstawiono w dodatku 1 do [51].

Dopuszczalna moc zakłóceń interferencyjnych pochodzących od pojedynczego źródła wyraża się wzorem

$$P_r(p) = 10 \log(k T_e B) + N_L + 10 \log(10^{M_S/10} - 1) - W \quad \text{dB(W)}, \quad (10.3)$$

w którym:

k – stała Boltzmanna $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K,

T_e – temperatura szumowa systemu odbiorczego (K) na wyjściu anteny; należy ją wyznaczyć z zależności

$$T_e = T_a + (L_t - 1) 290 + T_r/L_t,$$

w której:

T_a – temperatura szumowa anteny odbiorczej,

L_t – tłumienie linii transmisyjnej pomiędzy anteną i odbiornikiem,

T_r – wypadkowa temperatura szumowa odbiornika na jego wejściu,

N_L – szumy łącza; w przypadku transmisji poprzez satelity retransmisyjne należy uwzględnić również szumy łącza Ziemia–satelita i efekty związane z intermodulacją; dla stałych łączy satelitarnych $N_L = 1$ dB, dla łączy naziemnych $N_L = 0$ dB,

B – pasmo odniesienia (Hz); pasmo zakłócanego odbiornika, w którym może być uśredniany sygnał zakłócający,

- p – procent czasu, podczas którego zakłócenie pochodzące od jednego źródła przekracza wartość dopuszczalną; ponieważ sygnały zakłócające pochodzące z niezależnych źródeł nie muszą występować jednocześnie, więc $p = p_0/n$,
- p_0 – procent czasu, podczas którego wypadkowe zakłócenie (pochodzące ze wszystkich źródeł) przekracza wartość dopuszczalną,
- n – liczba źródeł wytwarzających zakłócenia o podobnym poziomie; założono, że dla małych procentów czasu brak jest korelacji pomiędzy sygnałami zakłócającymi,
- M_S – margines interferencyjny (dB); jest to wartość, o którą można zwiększyć szumy łącza w warunkach czystego nieba, uzyskując minimalną dopuszczalną jakość transmisji; margines interferencyjny M_S jest sumą (dB) dwóch składników:
 - M_0 – który jest różnicą (dB) pomiędzy stosunkiem C/N wymaganym do pracy łącza z nominalną jakością w długich okresach czasu i stosunkiem C/N wymaganym do pracy łącza z minimalną dopuszczalną jakością w krótkich okresach czasu;
 - ΔM – który jest różnicą (dB) pomiędzy bieżącą wartością stosunku C/N w warunkach czystego nieba i wartością wymaganą do pracy łącza z nominalną jakością.

Dla hipotetycznej analogowej radiowej linii odniesienia HRC wyznaczono w zaleceniu ITU-R F.393 wielkość marginesu interferencyjnego. Linia ma długość 2500 km i składa się z 50 prześłów o jednakowej długości. Przy pojedynczym skoku o długości 50 km szum łącza w kanale fonicznym może wzrosnąć o 150 pW0p (3 pW0p/1 km). Dla całego łącza odniesienia maksymalny wzrost szumu nie może przekroczyć wartości 47 500 pW0p. Zatem $M_0 = 10 \log(47\,500/150) = 25$ dB.

Zapewnienie minimalnej dopuszczalnej jakości transmisji w pojedynczym prześle wymaga odpowiedniego marginesu interferencyjnego. Ponieważ, średnio rzecz biorąc, łącze w obrębie jednego prześła pracuje bez zaników, szumy wzrastają więc tylko o 25 pW0p. Dlatego też $\Delta M = 10 \log(150/25) = 7,8$ dB, a $M_S = 25 + 7,8 \approx 33$ dB.

Dla naziemnych linii cyfrowych wpływ zaników krótkookresowych jest kompensowany marginesem interferencyjnym wartości 25÷40 dB. Ponieważ prawdopodobieństwo jednoczesnego wystąpienia wzrostu zakłóceń i zaniku nośnej jest pomijalnie małe, cały margines interferencyjny może być wykorzystany do kompensacji wpływu zakłócenia.

Dla analogowych łączy satelitarnych (satelitarna służba stała), zgodnie z zaleceniem ITU-R S.353, $M_0 = 10 \log(50\,000/10\,000) = 7$ dB. Wartość ta wystarczy do kompensacji zaników do częstotliwości 17 GHz, dlatego $\Delta M = 0$ dB i $M_S = 7$ dB. Dla częstotliwości powyżej 17 GHz wartość ΔM może być większa niż 0 dB.

W satelitarnych systemach służby stałej stosujących łącza cyfrowe wartość M_0 może w praktyce być nie większa niż 1 dB. Poprawną pracę łącza w takich warunkach uzyskuje się dzięki stosowaniu kodowania nadmiarowego FEC. Przy tak małych wartościach marginesu interferencyjnego może jednak wystąpić efekt progowy związany z silnymi zmianami BER przy małych zmianach C/N . Efekt ten jest spowodowany utratą synchronizacji przez dekodery oraz załamaniem pracy algorytmu dekodującego. Czas do ponownej synchronizacji może być znaczny, szczególnie, gdy przesyła-

my dane z małą prędkością. Dlatego też zmniejszenie stosunku C/N o 1 dB przy $BER=10^{-7}$ może znacznie obniżyć jakość świadczonych usług i spowodować przerwę w transmisji od kilku sekund do kilkunastu minut. Z tego względu margines interferencyjny powinien być określony na podstawie głębokości zaników i czasu ich trwania (procentu czasu, w którym zanik jest większy niż zadana wartość). Praktyczne wartości marginesu interferencyjnego można przyjąć z tabeli 10.1.

Tabela 10.1. Margines interferencyjny dla cyfrowych satelitarnych linii radiowych

Częstotliwość, GHz	M_S , dB
<10	2
10 do 17	4
>17	6

Określenie składowych M_0 i ΔM marginesu interferencyjnego może być niemożliwe dla naziemnych satelitarnych stacji ruchomych. W takim przypadku margines interferencyjny należy wyznaczyć na podstawie dopuszczalnej mocy zakłóceń, które można dodać do szumów własnych systemu odbiorczego. Określa się dopuszczalny wzrostu temperatury szumowej systemu odbiorczego ΔN (np. 25%) wyrażony w procentach, który nie może być przekroczony przez więcej niż $p\%$ czasu (np. 10–50%). Dopuszczalna moc zakłóceń $P_r(p)$ może być wyznaczona z zależności

$$P_r(p) = 10 \log k T B + 10 \log (\Delta N/100), \quad (10.4)$$

a margines interferencyjny

$$M_S = 10 \log (\Delta N/100 + 1), \quad (10.5)$$

W – współczynnik równoważności (dB), określający wpływ danego sygnału zakłócającego na odbiór sygnału pożądanego w odniesieniu do wpływu szumu termicznego o mocy równoważnej sygnałowi zakłócającemu w rozważanym pasmie. Wartość tego współczynnika jest dodatnia, jeśli sygnał zakłócający powoduje większe pogorszenie jakości odbioru niż mocowo równoważny szum termiczny.

Współczynnik równoważności W dla łączy telefonicznych ze zwielokrotnieniem częstotliwościowym FDM-FM może być obliczony z zależności

$$W = 10 \log (f_m (1 + r m) D(f_m, 0) \text{ dB}), \quad (10.6)$$

w której:

m – wartość skuteczna (r.m.s) indeksu modulacji sygnału zakłócającego,

r – napięciowy stosunek wartości szczytowej do wartości skutecznej (wielokanałowy) sygnału zakłócającego.

Należy zauważyć, że zależność $f_m (1 + r m)$ określa połowę szerokości pasma sygnału zakłócającego. Funkcja $D(f_m, 0)$ stanowi element współczynnika redukcji zakłóceń B z zależności (3) zalecenia ITU-R STF.766. Jeśli skuteczna wartość indeksu modulacji sygnału użytecznego jest większa niż 0,8, to W nie przekracza wartości 4 dB, pod warunkiem, że pasmo odniesienia jest równe zastępczej szumowej szerokości pasma sygnału użytecznego w.cz.

Przy bardzo małych indeksach modulacji sygnału użytecznego W może przybierać wartości z szerokiego przedziału, rośnie wraz ze zmniejszaniem się indeksu modulacji sygnału użytecznego i zakłócającego. Z doświadczeń wynika jednak, że w takim wypadku

należy przyjąć pasmo odniesienia równe pasmu telefonicznemu 4 kHz, a wartość W nie jest większa niż 0 dB. Jeśli sygnał użyteczny jest sygnałem cyfrowym, to W jest zazwyczaj równe lub mniejsze od 0 dB, niezależnie od charakterystyki zakłócającego sygnału.

Szczegółowy sposób wyznaczania wartości W przedstawiono w ITU-R SF.766.

10.1.2. KONTURY POMOCNICZE

Kontur koordynacyjny i dodatkowe kontury są wyznaczane przy założeniu najbardziej niekorzystnych warunków zakłóceńowych. Tego typu warunki zdarzają się w praktyce niezmiernie rzadko. Dlatego też należy wyznaczyć kontury pomocnicze, które umożliwiają eliminację z dalszych rozważań stacji, dla których nie jest celowe przyjęcie ekstremalnych założeń. W przypadku propagacji ortodromowej kontury pomocnicze mogą być wykorzystane przez administrację kraju, na którym rozciąga się obszar koordynacyjny, bez konieczności prowadzenia dokładnych analiz.

Kontury pomocnicze można stosować dla stacji nadawczych i odbiorczych. Należy je wykreślać dla obliczonej wartości tłumienności trasy pomniejszonej o 5, 10, 15, 20 dB itd., aż do uzyskania minimalnej odległości koordynacyjnej 100 km.

10.1.3. KONTURY DODATKOWE

Obszar koordynacyjny określa się dla typu stacji naziemnej, dla której jest wymagana największa odległość koordynacyjna. Procedury koordynacyjne zostały opracowane dla służb stałych i dotyczą wszystkich pasm im przypisanych, w tym: stałych stacji wykorzystujących rozpraszanie troposferyczne oraz stacji linii radiowych pracujących przy bezpośredniej widoczności (*line-of-sight*) z analogową modulacją. Są jednak inne systemy naziemne, które nie mają tak ostrych wymagań koordynacyjnych. Dla tego typu stacji administracja może wykreślić dodatkowe kontury koordynacyjne, uwzględniające charakterystyki tych stacji. Parametry tego typu systemów (m.in. cyfrowych linii radiowych), wykorzystywane przy koordynacji, przedstawiono w tabelach 10.2 i 10.3. Kontury dodatkowe można również wykreślić przy koordynacji systemów pracujących w pasmach użytkowanych przez służby stałe i ruchowe. Dane do tego typu analiz nie zostały dotychczas przygotowane przez ITU.

10.1.4. OKREŚLENIE ODLEGŁOŚCI KOORDYNACYJNEJ PRZY PROPAGACJI ORTODROMOWEJ (MOD 1)

Na potrzeby obliczeń odległości koordynacyjnej przy propagacji ortodromowej podzielono świat na cztery strefy środowiskowe (radioklimatyczne):

- strefa A1 – obszary przybrzeżne i wybrzeża, tj. obszary przyległe do strefy B i strefy C, wysokości do 100 m w stosunku do średniego poziomu morza lub obszarów wodnych i oddalone od strefy B lub strefy C o nie więcej niż 50 km,
- strefa A2 – obszary lądowe z wyjątkiem obszarów należących do strefy A1,

- strefa B – „zimne morza”, oceany i duże śródlądowe obszary wodne położone powyżej 30° szerokości geograficznej, z wyjątkiem mórz Śródziemnego i Czarnego,
- strefa C – „ciepłe morza”, oceany i duże śródlądowe obszary wodne położone poniżej 30° szerokości geograficznej (obejmuje również morza Śródziemne i Czarne).

W celach administracyjnych zdefiniowano pojęcie dużych śródlądowych obszarów wodnych leżących w strefach B i C jako obszarów o powierzchni większej niż 7800 km², z wyłączeniem rzek. Wyspę na tych obszarach należy traktować jak obszar wodny, jeśli jej wysokość na obszarze przekraczającym 90% powierzchni nie przekracza 100 m powyżej średniego poziomu wody. W przeciwnym razie wyspę należy traktować jak obszar lądowy.

Obszary śródlądowe o powierzchni większej niż 7800 km² obejmujące skupiska jezior i rzek może być trudno zakwalifikować do jednej ze stref. Administracja może zakwalifikować je do strefy A1 pod warunkiem, że obejmują one w więcej niż 50% obszar wodny i na więcej niż 90% powierzchni wysokość terenu nie przekracza 100 m w stosunku do średniego poziomu wody. Tego typu obszary powinny być zarejestrowane przez administrację w Biurze Radiokomunikacyjnym ITU z wyraźnym określeniem strefy, do której należą. Jeśli takiej deklaracji nie ma, to obszar powinien być traktowany jako strefa A2. W celu uzyskania maksymalnej zbieżności wyników obliczeń zaleca się stosowanie cyfrowej mapy IDWM dostępnej w ITU.

10.1.5. PROCEDURA WYZNACZANIA ODLEGŁOŚCI KOORDYNACYJNEJ PRZY PROPAGACJI ORTODROMOWEJ (MOD 1)

Odległość koordynacyjna to odległość, w której tłumienność trasy jest równa minimalnej dopuszczalnej tłumienności trasy $L_b(p)$

$$L_b(p) = P_t' + G_e + 42 + \Delta G - P_r(p) \text{ dB}, \quad (10.7)$$

przy czym:

P_t' i $P_r(p)$ zdefiniowano w zależności (10.1),

G_e – zysk energetyczny anteny naziemnej stacji satelitarnej w kierunku horyzontu (pod kątem elewacji odpowiadającym kątowi do horyzontu) na rozważanym azymucie,

ΔG – różnica (w dB) pomiędzy maksymalnym zakładanym zyskiem stacji naziemnej (linii radiowej) a wartością 42 dB; wartość tę dla różnych zakresów częstotliwości podano w tabelach 10.2 i 10.3.

Niech

$$L_1 = L_b(p) + A_1 \text{ dB} \quad (10.8)$$

oraz

$$A_1 = 120 + 20 \log(f) + \log(p) + 5p^{0.5} + A_h \text{ dB}, \quad (10.9)$$

przy czym:

f – częstotliwość, GHz,

A_h – współczynnik korekcyjny dla kąta elewacji stacji do horyzontu Θ °*

$$A_h = \begin{cases} 20 \log[1 + 4,5 \Theta f^{0,5}] + \Theta f^{0,33} & \text{dB dla } \Theta \geq 0^\circ, \\ 8\Theta & \text{dB dla } 0^\circ > \Theta \geq -0,5^\circ, \\ -4 & \text{dB dla } \Theta < -0,5^\circ. \end{cases} \quad \begin{matrix} (10.10a) \\ (10.10b) \\ (10.10c) \end{matrix}$$

Maksymalna wartość współczynnika korekcyjnego A_h wynosi 30 dB. Przyjmowanie do obliczeń większych wartości nie ma odzwierciedlenia w praktyce.

Tabela 10.2. Parametry potrzebne do określenia odległości koordynacyjnej

Przeznaczenie służby satelitarnej		Operacje w kosmosie		Ruchowa satelitarna Ruchowa lądowa satelitarna Ruchowa morska satelitarna		Ruchowa satelitarna	Badanie kosmosu Operacje w kosmosie Badanie Ziemi z kosmosu	Stała satelitarna Ruchowa satelitarna	Stała satelitarna	
Zakres częstotliwości (GHz)		1,427–1,429		1,6100–1,6455 1,6565–1,6600 1,675–1,710		1,970–2,010	2,025–2,110 2,110–2,120 (Głęboki kosmos)	2,655–2,690	5,725–7,075	
Sygnał modulujący stację naziemną ⁽¹⁾		A	N	A	N	A	A	A	A	N
Parametry zakłóceń stacji naziemnej oraz warunki	p_0 (%)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,005
	n	2	2	2	2	2	2	1	2	3
	p (%)	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,01	0,005	0,002
	N_L (dB)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M_S (dB)	33	33	33	33	26 ⁽²⁾	26 ⁽²⁾	26 ⁽³⁾	33	37
Parametry stacji naziemnej	W (dB)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	G_r (dB) ⁽⁴⁾	35	35	35	35	52 ⁽²⁾	52 ⁽²⁾	52 ⁽³⁾	45	45
	ΔG (dB)	–7	–7	–7	–7	10 ⁽²⁾	10 ⁽²⁾	10 ⁽³⁾	3	3
Pasma odniesienia	T_r (K)	750	750	750	750	500 ⁽²⁾	500 ⁽²⁾	500 ⁽³⁾	750	750
	B (Hz)	$4 \cdot 10^3$	10^6	$4 \cdot 10^3$	10^6	$4 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	10^6
Dopuszczalny poziom zakłóceń	$P_f(p)$ (dB(W)) w B	–131	–107	–131	–107	–140	–140	–140	–131	–103

Po określeniu wielkości L_1 można wyznaczyć odległość koordynacyjną d_1 (dla modu 1) z zależności

* Kąt elewacji do horyzontu to kąt pomiędzy kierunkiem ze środka anteny stacji naziemnej do horyzontu optycznego na danym azymucie a płaszczyzną poziomą. Wymagane jest określenie tego kąta dla wszystkich analizowanych azymutów. W praktyce wystarczy wyznaczyć ten kąt z krokiem co 5°. Należy jednak uwzględnić lokalne minima tego kąta leżące pomiędzy 5° przedziałami.

$$L_1 = \sum_{i=1}^n \beta_i(p) d_i \text{ dB}, \quad (10.11)$$

$i = 1$ do n odnosi się do kolejnych przedziałów trasy leżących w różnych strefach środowiskowych typu A1, A2, B i C; wzdłuż jednej trasy może występować wiele stref,

d_i – długość (w km) trasy w każdej strefie,

$\beta_i(p)$ – tłumienność właściwa (dB/km) w i -tej strefie.

dla nadawczej satelitarnej stacji naziemnej (ITU-R IS.847-1)

Badanie kosmosu		Stała satelitarna Ruchowa satelitarna Meteorologiczna satelitarna		Stała satelitarna		Stała satelitarna		Stała satelitarna	Stała satelitarna	Stała satelitarna
7,145–7,235		7,900–8,400		10,7–11,7		12,5–13,25 13,75–14,8		17,7– 18,1	24,75– 25,25 27– 29,5	42,5– 51,4
A	N	A	N	A	N	A	N	N	N	N
0,001	0,005	0,01	0,005	0,01	0,005	0,01	0,005	0,005	0,005	0,005
2	2	2	2	2	3	2	2	2	1	1
0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,002	0,005	0,005
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	37	33	37	33	37	33	40	25	25	25
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	47	47	47	50	50	50	50	50	50	50
5	5	5	5	8	8	8	8	8	8	8
750	750	750	750	1500	1500	1500	1500	3200	3200	3200
$4 \cdot 10^3$	10^6	$4 \cdot 10^3$	10^6	$4 \cdot 10^3$	10^6	$4 \cdot 10^3$	10^6	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	10^6
–131	–103	–131	–103	–128	–100	–128	–97	–109	–109	–109

(1) A – modulacja analogowa; N – modulacja cyfrowa.

(2) Użyto parametrów pozahoryzontowej linii radiowej. Parametry horyzontowej linii radiowej mogą być zastosowane w zakresie częstotliwości 1,675÷1,710 GHz do wyznaczenia odległości koordynacyjnej zgodnie z p. 10.1.1.

(3) Użyto parametrów pozahoryzontowej linii radiowej.

Parametry horyzontowej linii radiowej mogą być zastosowane w zakresie częstotliwości od 5,725 do 7,075 GHz do wyznaczenia odległości koordynacyjnej zgodnie z p. 10.1.1 z wyjątkiem, gdy $G_r = 37$ dB i $\Delta G = -5$ dB.

(4) Nie uwzględniono tłumienia fidera.

Tabela 10.3. Parametry potrzebne do określenia odległości koordynacyjnej

Przeznaczenie służby satelitarnej		Ruchowa satelitarna Ruchowa lądowa satelitarna Ruchowa morska satelitarna	Operacje w kosmosie	Meteorologiczna satelitarna	Badanie kosmosu		Operacje w kosmosie	Badanie Ziemi z kosmosu	Stała satelitarna	
Zakres częstotliwości GHz		1,492–1,530 1,555–1,559 2,160–2,200 2,4835–2,5200 ⁽¹⁾	1,525–1,530	1,670–1,710 ⁽²⁾	1,700–1,710 2,200–2,290	2,290–2,300 (Deep space)	2,200–2,290	2,200–2,290	2,500–2,690	
Modulacja naziemnej stacji ⁽³⁾		N	N		N	N	N	N	A	N
Parametry zakłóceniu stacji naziemnej I warunki	p_0 (%)	10	1,0		0,1	0,001	1	1	0,03	0,003
	n	1	1		2	1	2	2	3	3
	p (%)	10	1,0		0,05	0,001	0,5	0,5	0,01	0,001
	N_L (dB)	0			–	–	–	–	1	1
	M_S (dB)	1 ⁽⁴⁾			–	–	–	–	7	2
Parametry stacji naziemnej	W (dB)	0	0		–	–	–	–	4	0
	E (dB(W))	A 37 ⁽⁶⁾	50	92 ⁽⁷⁾	62 ⁽⁷⁾⁽⁸⁾	62 ⁽⁷⁾⁽⁸⁾	62 ⁽⁷⁾	92 ⁽⁷⁾	92 ⁽⁷⁾	92 ⁽⁷⁾
	$w B$ ⁽⁵⁾	N 37	37							
	P_t (dB(W))	A 0	13	40 ⁽⁷⁾	10 ⁽⁷⁾⁽⁸⁾	10 ⁽⁷⁾⁽⁸⁾	10 ⁽⁷⁾	40 ⁽⁷⁾	40 ⁽⁷⁾	40 ⁽⁷⁾
	$w B$	N 0	0							
Pasma odniesienia ⁽¹¹⁾	ΔG (dB)	–5	–5	10 ⁽⁷⁾	10 ⁽⁷⁾	10 ⁽⁷⁾	10 ⁽⁷⁾	10 ⁽⁷⁾	10 ⁽⁷⁾	10 ⁽⁷⁾
	B (Hz)	$4 \cdot 10^3$	10^3	10^6	1	1	10^3	10^6	10^6	10^6
Dopuszczalny poziom zakłóceń	$P_r(p)$ (dB(W)) $w B$	–176	–184		–216	–222	–184	–154	–	–

⁽¹⁾ W pasmach tych przyjęto parametry naziemnej stacji jak dla stacji linii radiowej pracującej w warunkach bezpośredniej widoczności. Jeśli administracja uważa, że w pasmach od 2,160 do 2,200 GHz i od 2,4835 do 2,5200 GHz należy uwzględnić pozahoryzontowe linie radiowe, to do wyznaczenia obszaru koordynacyjnego można użyć parametrów związanych z pasmem od 2,500 do 2,690 GHz.

⁽²⁾ W pasmie 1,670÷1,700 GHz wymagany jest dodatkowy kontur do koordynacji ze służbą meteorologiczną (szczegóły w ITU-R IS.850).

⁽³⁾ A – modulacja analogowa, N – modulacja cyfrowa.

⁽⁴⁾ Wartość wynikająca z 25% poziomu zakłóceń.

⁽⁵⁾ E definiuje się jako $EIRP$ naziemnej stacji zakłócającej w pasmie odniesienia.

⁽⁶⁾ Wielkość ta to zredukowany do celów koordynacji nominalny poziom mocy 50 dB(W). Redukcja mocy wynika z małego prawdopodobieństwa emisji dużej mocy w relatywnie wąskim pasmie naziemnej stacji.

⁽⁷⁾ Jak w odsyłaczu ⁽⁹⁾; z wyjątkiem $E = 50$ dB(W) i $\Delta G = -5$ dB dla stacji naziemnej. Dla służby związanej z badaniem kosmosu należy uwzględnić ⁽⁸⁾, jeśli nie rozważa się linii pozahoryzontowych. Dla naziemnych analogowych linii radiowych: $E = 20$ dB(W) i $P_t = -17$ dB(W); dla naziemnych cyfrowych linii radiowych: $E = -23$ dB(W), $P_t = -60$ dB(W) i $\Delta G = -5$ dB.

dla odbiorczej satelitarnej stacji naziemnej (ITU-R IS.847-1)

Stała satelitarna		Stała satelitarna		Stała satelitarna meteorologicz- na satelitarna		Bada- nie Ziemi z kos- mosu	Badanie kosmosu		Stała satelitarna		Meteo- rologi- czna sateli- tarna	Stała sateli- tarna	Rucho- wa sateli- tarna
							blisko Ziemi	głęboki kosmos					
3,400–4200		4,500–4,800		7,250–7,750		8,025– 8,400	8,400–8,500		10,7–12,75		17,7–47,0		
A	N	A	N	A	N	–	–	–	A	N		N	
0,03	0,005	0,03	0,005	0,03	0,005	1,0	0,1	0,001	0,03	0,003		0,003	
3	3	3	3	3	3		2	1	2	2		2	
0,01	0,002	0,01	0,002	0,01	0,002		0,05	0,001	0,015	0,002		0,002	
1	1	1	1	1	1		–	–	1	1		1	
7	2	7	2	7	2		–	–	7	4		6	
4	0	4	0	4	0		–	–	4	0		0	
55	55	92 ⁽⁹⁾	92 ⁽⁹⁾	55	55	55	25 ⁽⁸⁾	25 ⁽⁸⁾	55	55		–	
42	42	42 ⁽¹⁰⁾	42 ⁽¹⁰⁾	45	45	42	–18	–18	42	42		40	
13	13	40 ⁽⁹⁾	40 ⁽⁹⁾	13	13	13	–17 ⁽⁸⁾	–17 ⁽⁸⁾	10	10		–	
0	0	0	0	3	3	0	–60	–60	–3	–3		–7	
0	0	10 ⁽⁹⁾ (10)	10 ⁽⁹⁾ (10)	0	0	0	0	0	3	3		5	
10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	1	1	10 ⁶	10 ⁶		10 ⁶	
–	–	–	–	–	–	–154	–220	–220	–	–		–	

⁽⁸⁾ Wartości estymowano dla szerokości pasma 1 Hz. Są one mniejsze o 30 dB od całkowitej promieniomowanej mocy.

⁽⁹⁾ W pasmie tym przyjęto parametry dla stacji pozahoryzontowych linii radiowych. Jeśli administracja jest przekonana, że linie pozahoryzontowe nie muszą być uwzględniane, to należy przyjąć parametry stacji linii radiowych pracujących w warunkach bezpośredniej widoczności w pasmie 3,4÷4,2 GHz.

⁽¹⁰⁾ Zakłada się, że systemy cyfrowe nie są pozahoryzontowe, dlatego $\Delta G = 0$ dB. Dla pozahoryzontowych cyfrowych linii radiowych można przyjąć parametry jak dla pozahoryzontowych linii analogowych.

⁽¹¹⁾ Dla niektórych systemów pracujących w stałej służbie satelitarnej pożądane może być uwzględnienie szerszego pasma odniesienia B . Pasma to wpływa jednak na zmniejszenie odległości koordynacyjnych i późniejsze decyzje o zmniejszeniu pasma mogą wymagać powtórnej koordynacji stacji naziemnej.

Tłumienność właściwą należy wyznaczyć z zależności

$$\beta_i(p) = 0,01 + \beta_{dz}(p) + \beta_0 + \beta_{vz} \text{ dB/km}, \quad (10.12)$$

w której $\beta_{dz}(p)$ jest tłumiennością właściwą dla określonej strefy przekraczaną przez więcej niż $p\%$ czasu i wywołaną anomaliami propagacyjnymi. Tłumienność tę oblicza się z zależności

$$\beta_{dz}(p) = C_1 + C_2 \log(f) + C_3 p^{C_4} \text{ dB/km}. \quad (10.13)$$

Wartości współczynników C_1 , C_2 , C_3 i C_4 dla czterech stref środowiskowych przedstawiono w tabeli 10.4.

Tabela 10.4. Wartości współczynników C_1 , C_2 , C_3 , C_4 i ρ służące do wyznaczenia tłumienności właściwej

Strefa	C_1	C_2	C_3	C_4	$\rho, \text{ g/m}^3$
A1	0,03	0,03	0,15	0,2	10,0
A2	0,04	0,05	0,16	0,1	7,5
B	0,015	0,015	0,05	0,15	10,0
C	0	0,015	0,04	0,15	10,0

Wielkości β_0 i β_{vz} reprezentują tłumienność właściwą spowodowaną odpowiednio tłumieniem tlenu i pary wodnej. Należy je obliczyć z zależności

$$\beta_0 = \begin{cases} \left[7,19 \cdot 10^{-3} + \frac{6,09}{f^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f - 57)^2 + 1,50} \right] f^2 \cdot 10^{-3} \text{ dB/km dla } f < 57 \text{ GHz} & (10.14a) \\ \beta_0 = \beta_{0(57)} + 1,5 (f - 57) \text{ dB/km dla } 57 \leq f \leq 60 \text{ GHz} & (10.14b) \end{cases}$$

przy czym $\beta_{0(57)}$ wyznaczono na podstawie zależności (10.14a) dla częstotliwości 57 GHz.

Wartość tłumienności spowodowanej parą wodną β_{vz} określa się ze wzoru

$$\beta_{vz} = \left\{ 0,050 + 0,0021\rho + \frac{3,6}{(f - 22,2)^2 + 8,5} + \frac{10,6}{(f - 183,3)^2 + 9,0} + \frac{8,9}{(f - 325,4)^2 + 26,3} \right\} f^2 \rho \cdot 10^{-4} \text{ dB/km dla } f < 350 \text{ GHz}. \quad (10.15)$$

Zależy ona od strefy środowiskowej i musi być wyznaczona dla odpowiedniej gęstości pary wodnej $\rho \text{ (g/m}^3\text{)}$ (tab. 10.4).

Odległość koordynacyjna dla propagacji ortodromowej (mod 1), określona wzorem (10.11) może być, w przypadku przechodzenia różnych stref środowiskowych, wyznaczona metodą iteracyjną. Obliczenia należy rozpocząć od wyznaczenia tłumie-

nia propagacyjnego $\beta_i(p)D_i$ poszczególnych odcinków tras, leżących w różnych strefach środowiskowych, na podstawie wcześniej określonych długości odcinków D_i . Poruszając się wzdłuż promienia od naziemnej stacji i sumując poszczególne tłumienia dochodzimy do odcinka n , dla którego spełniona jest nierówność

$$\sum_{i=1}^n \beta_i(p) D_i > L_1. \quad (10.16)$$

Nie można zatem całej długości odcinka n doliczyć do odległości koordynacyjnej. Właściwą długość ostatniego odcinka d_n wyznaczamy przez liniową interpolację, zgodnie z zależnością

$$d_n = \frac{\left[L_1 - \sum_{i=1}^{n-1} \beta_i(p) D_i \right]}{\beta_n}. \quad (10.17)$$

Odległość koordynacyjną d_1 , uwzględniającą propagację ortodromową (mod 1), wyznacza się z zależności końcowej

$$d_1 = \begin{cases} d_n + \sum_{i=1}^{n-1} D_i & \text{km dla } n > 1 \\ \frac{L_1}{\beta_1} & \text{km dla } n = 1 \end{cases} \quad (10.18)$$

10.1.6. MAKSYMALNA ODLEGŁOŚĆ KOORDYNACYJNA DLA PROPAGACJI ORTODROMOWEJ (MOD 1)

Maksymalne odległości koordynacyjne dla tras w całości zawartych w jednej strefie środowiskowej przedstawiono w tabeli 10.5.

Tabela 10.5. Maksymalna odległość koordynacyjna przy propagacji ortodromowej (mod 1)

Strefa	Maksymalna odległość koordynacyjna d_{m1} , km
A1	500
A2	350
B	900
C	1200

10.1.7. OKREŚLENIE ODLEGŁOŚCI KOORDYNACYJNEJ PRZY PROPAGACJI PRZEZ ROZPRASZANIE NA HYDROMETEORACH

Odległość koordynacyjną dla propagacji przez rozpraszanie na hydrometeorach wyznacza się, porównując straty propagacyjne L_2 związane z tym modem propagacji do dopuszczalnych strat $L(p)$ określonych zależnością (10.1).

Jak wcześniej wspomniano, minimalna odległość koordynacyjna nie może być mniejsza niż 100 km. W ogólnym przypadku, przy rozpraszaniu na hydrometeorach, odległość 100 km jest w zupełności wystarczająca do zapewnienia odpowiedniego poziomu ochrony innych systemów. Jedynie sporadyczne przypadki muszą być analizowane w zakresie odległości do 100 km. Mogą jednak wystąpić szczególne kombinacje parametrów, np. duży poziom promieniowanego sygnału przez stację zakłócającą i niski dopuszczalny poziom zakłóceń odbiornika zakłócanej stacji. W takim przypadku zakłócana stacja wymaga większego poziomu ochrony, a zatem większego obszaru koordynacyjnego. Z sytuacją taką spotykamy się, gdy dla zakresu częstotliwości i deszczowej strefy klimatycznej odpowiedniej dla naziemnej stacji, wymagane tłumienie $L(p)$ przekracza o więcej niż ΔG odpowiednią wartość podaną w tabeli 10.6. Wtedy obszar koordynacyjny należy wyznaczyć zgodnie z procedurą opisaną w dalszej części.

Tabela 10.6. Poziomy tłumienia (dB) do wyznaczania odległości koordynacyjnej przy rozpraszaniu na hydrometeorach (mod 2)

Zakres częstotliwości (GHz)	Deszczowa strefa klimatyczna				
	A, B	C, D, E	F, G, H, J, K	L, M	N, P, Q
1	152	148	144	141	136
4	140	136	132	129	125
6	138	134	130	127	124
8	136	132	129	126	124
10	135	131	129	127	126
12	134	131	129	127	126
14	135	132	130	128	127
18	138	136	134	132	131
20	144	142	140	139	137
22,4	153	151	149	148	146
25	149	147	145	144	142
28	147	145	143	141	139
30	147	145	143	141	140
35	151	149	147	145	143
40–60	157	155	153	151	149

Uwaga: Północna część Polski znajduje się w strefie E, a środkowa i południowa w strefie H.

Obszar koordynacyjny związany z rozpraszaniem na hydrometeorach ma postać koła o promieniu d_r (promień rozpraszania deszczowego) ze środkiem w punkcie oddległym o Δd od stacji satelitarnej wzdłuż azymutu głównej wiązki promieniowania (rys. 10.2).

Straty transmisji L_2 są związane z promieniem rozpraszania deszczowego d_r w następujący sposób:

$$L_2 = 168 + 20 \log d_r - 20 \log f - 13,2 \log R - G_T + 10 \log A_b - 10 \log C + \Gamma + H + \beta_0 d_0 + \beta_v d_v, \quad \text{dB}, \quad (10.19)$$

przy czym:

R – intensywność opadów (mm/h) przekraczana przez $p\%$ czasu, która jest zależna od strefy deszczowo-klimatycznej,

G_T – zysk energetyczny anteny stacji naziemnej (linii radiowej); założono, że $G_T = 42 + \Delta G$ dBi,

k i α – współczynniki odczytane z tabeli 10.7 dla odpowiedniej częstotliwości – (dla k stosować interpolację logarytmiczną względem częstotliwości, dla α stosować interpolację liniową).

Tabela 10.7. Wartości współczynników k i α w funkcji częstotliwości

Częstotliwość GHz	k	α
1	0,000 0352	0,880
2	0,000 138	0,923
4	0,000 591	1,075
6	0,001 55	1,265
7	0,002 65	1,312
8	0,003 95	1,31
10	0,008 87	1,264
12	0,016 8	1,20
14	0,029	1,15
18	0,055	1,09
20	0,069 1	1,065
22,4	0,090	1,05
25	0,113	1,03
28	0,150	1,01
30	0,167	1,00
35	0,233	0,963
40	0,310	0,929
45	0,393	0,897
50	0,479	0,868
60	0,642	0,824

Wielkości C i Γ należy obliczyć ze wzorów:

$$C = \begin{cases} \frac{2,17}{\gamma_r d_s} \left(1 - 10^{-\frac{\gamma_r d_s}{5}} \right) & \text{dB dla } f > 4 \text{ GHz} \\ 1 & \text{dB dla } f \leq 4 \text{ GHz} \end{cases} \quad (10.20)$$

$$\Gamma = \frac{631 \gamma_r}{\sqrt{R}} 10^{-(R+1)^{0,19}} \text{ dB}, \quad (10.21)$$

w których:

$$\gamma_r = k R^\alpha \text{ dB}, \quad (10.22)$$

$$d_s = 3,5 R^{-0,08} \text{ dB}. \quad (10.23)$$

Pozostałe wielkości w zależności (10.19) można wyznaczyć po wprowadzeniu zmiennych pomocniczych i wykonaniu obliczeń w cyklu iteracyjnym. Wartość H można wyznaczyć po wprowadzeniu zmiennej pomocniczej h_{FR} , która jest funkcją szerokości geograficznej ζ i wyznacza się ją z zależności:

dla północnej półkuli

$$h_{FR} = \begin{cases} 5 - 0,075 (\zeta - 23) & \text{km dla } \zeta > 23^\circ \\ 5 & \text{km dla } 0^\circ \leq \zeta \leq 23^\circ \end{cases} \quad (10.24a)$$

dla południowej półkuli

$$h_{FR} = \begin{cases} 5 & \text{km dla } 0^\circ \geq \zeta \geq -21^\circ, \\ 5 + 0,1 (\zeta + 21) & \text{km dla } -71^\circ < \zeta \leq -21^\circ, \\ 0 & \text{km dla } \zeta \leq -71^\circ. \end{cases} \quad (10.24b)$$

Wprowadza się również zmienną pomocniczą x przydatną w procesie iteracji

$$x = 168 - 20 \log f - 13,3 \log R - G_T - 10 \log C + \Gamma - L_2, \quad (10.25)$$

zależną od dopuszczalnego tłumienia propagacyjnego L_2 .

Tłumienność właściwą gazu: tlenu – β_0 i pary wodnej – β_v określają zależności (10.14) i (10.15). Tłumienność właściwą pary wodnej należy wyznaczyć, niezależnie od strefy środowiskowej, dla gęstości $\rho = 7,5 \text{ g/m}^3$.

Maksymalny promień rozpraszania deszczowego d_{m2} dany jest zależnością

$$d_{m2} = \sqrt{17000 (h_{FR} + 3)} \text{ km}. \quad (10.26)$$

W celu wyznaczenia odległości koordynacyjnej d_r należy przeprowadzić proces iteracji polegający na obliczaniu w kolejnych krokach następujących wielkości:

$$h_{cv} = \frac{(d_r - 40)^2}{17000} \text{ km}, \quad (10.27)$$

$$H = \begin{cases} 6,5 (h_{cv} - h_{FR}) & \text{dB dla } h_{cv} > h_{FR}, \\ 0 & \text{dB dla } h_{cv} \leq h_{FR}, \end{cases} \quad (10.28)$$

$$10 \log A_b = \begin{cases} 0,005 (f - 10)^{1,7} R^{0,4} & \text{dB dla } \begin{cases} 10 \text{ GHz} < f \leq 60 \text{ GHz}, \\ \text{i } h_{cv} < h_{FR}, \end{cases} \\ 0 & \text{dB dla } \begin{cases} f < 10 \text{ GHz}, \\ \text{lub } h_{cv} \geq h_{FR}, \end{cases} \end{cases} \quad (10.29)$$

$$d_0 = \begin{cases} 0,7 d_r + 32 & \text{km dla } d_r < 340 \text{ km}, \\ 270 & \text{km dla } d_r \geq 340 \text{ km}, \end{cases} \quad (10.30)$$

$$d_v = \begin{cases} 0,7 d_r + 32 & \text{km dla } d_r < 240 \text{ km,} \\ 200 & \text{km dla } d_r \geq 240 \text{ km,} \end{cases} \quad (10.31)$$

$$Y = x + 20 \log d_r + 10 \log A_b + H + \beta_0 d_0 + \beta_v d_v \text{ dB.} \quad (10.32)$$

Warunkiem wyznaczenia odległości d_r jest zerowanie się zmiennej Y ($Y = 0$), która jest monotonicznie rosnącą funkcją odległości d_r .

Procedura wyznaczania promienia rozpraszania deszczowego d_r (odległości koordynacyjnej dla propagacji przez rozpraszanie na hydrometeorach) może być przedstawiona w kolejnych krokach.

Krok 1: Wyznaczyć wartość Y dla $d_r = 100$ km, $Y(100 \text{ km})$.

Krok 2: Jeśli $Y(100 \text{ km}) \geq 0$, to $d_r = 100$ km jest poszukiwaną odległością (minimalna wartość).

Krok 3: W przeciwnym razie wyznaczyć wartość Y dla $d_r = d_{m2}$, $Y(d_{m2})$.

Krok 4: Jeśli $Y(d_{m2}) \leq 0$, to $d_r = d_{m2}$ jest poszukiwaną odległością (maksymalna wartość).

Krok 5: Jeśli ani $d_r = 100$ km ani $d_r = d_{m2}$ nie jest poszukiwaną odległością, to przyjmij je jako graniczne wartości i rozpocznij proces iteracyjnego wyznaczenia d_r , stosując np. metodę połowienia odcinka pomiędzy skrajnymi wartościami. Dla odległości $\frac{100 + d_{m2}}{2}$ należy przeliczyć wzory od (10.27) do (10.32) i w zależności od

uzyskanej wartości Y podjąć decyzję:

- czy wyznaczona odległość to odległość koordynacyjna ($Y \cong 0$),
- czy należy się zbliżyć do stacji (zmniejszyć odległość), bo uzyskano $Y > 0$,
- czy należy oddalić się od stacji (zwiększyć odległość), bo uzyskano $Y < 0$.

Obszar koordynacyjny dla rozpraszania na hydrometeorach jest ograniczony konturem w kształcie okręgu o promieniu równym mniejszej z dwóch wartości d_r i d_{m2} ($\min(d_r, d_{m2})$) i o środku przesuniętym o Δd w kierunku azymutu wyznaczonego przez główną wiązkę promieniowania naziemnej stacji satelitarnej. Wielkość przesunięcia Δd należy obliczyć z zależności

$$\Delta d = \frac{(\min(d_r, d_{m2}) - 40)^2 \operatorname{ctg} \varepsilon_s}{17000} \text{ km}^{(*)}, \quad (10.33)$$

przy czym: ε_s jest kątem elewacji głównej wiązki promieniowania. Ponadto promień d_2 tego obszaru mierzony od stacji satelitarnej nie może być mniejszy niż 100 km. Tam, gdzie odległość od stacji satelitarnej do konturu jest mniejsza niż 100 km, należy przyjąć odległość koordynacyjną $d_2 = 100$ km.

Jeżeli naziemna stacja satelitarna współpracuje z satelitą geosynchronicznym na orbicie o małym kącie inklinacji, to obszar koordynacyjny związany z rozpraszaniem

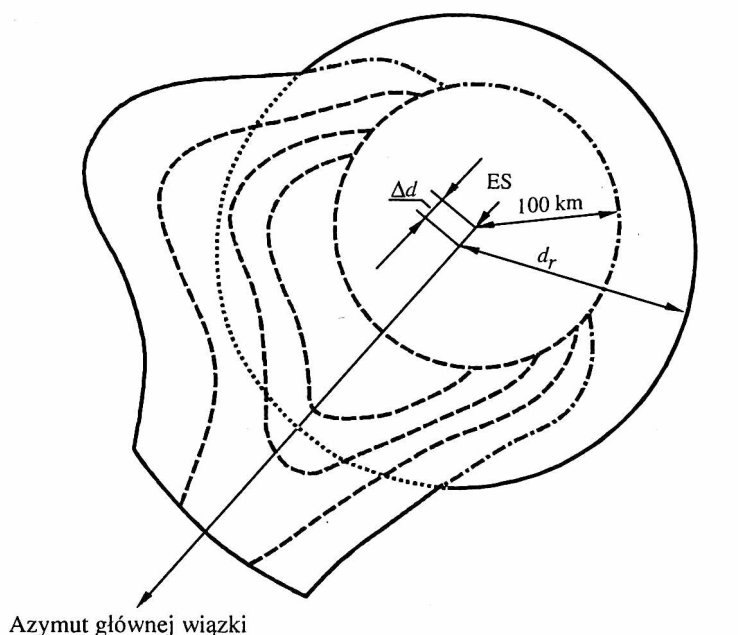
(*) W wyjątkowych sytuacjach, gdy kąt elewacji anteny do satelity jest mniejszy od 3° , Δd należy obliczyć z wzoru: $\Delta d = \min[d_r - 40, (d_r - 40)^2 \operatorname{ctg} \varepsilon_s / 17000]$.

na hydrometeorach (mod 2) należy wyznaczyć jako sumę dwóch obszarów koordynacyjnych określonych dla dwóch kierunków anteny (azymut i kąt elewacji) do dwóch pozycji satelity o największych kątach inklinacji.

Obszar koordynacyjny związany z rozpraszaniem na hydrometeorach (mod 2) dla stacji satelitarnej współpracującej z kilkoma satelitami na różnych pozycjach orbitalnych jest sumą obszarów wyznaczonych dla dwóch skrajnych satelitów (znajdujących się na pozycjach najbardziej na zachód i najbardziej na wschód).

10.1.8. MINIMALNA ODLEGŁOŚĆ KOORDYNACYJNA I KONTUR KOORDYNACYJNY

Minimalną odległością koordynacyjną dla obu typów propagacji jest 100 km. Jeżeli odległości d_1 lub d_2 , wyznaczone na podstawie wcześniej opisanych zależności, są mniejsze niż 100 km, to należy przyjąć odległość 100 km.



ES – naziemna stacja satelitarna

Δd – przesunięcie środka koła

- kontur koordynacyjny
- - - - - kontur koordynacyjny dla modu propagacji (1)
- kontur koordynacyjny dla modu propagacji (2)
- kontury pomocnicze dla modu propagacji (1)

Rys. 10.2. Obszar koordynacyjny dla naziemnej stacji satelitarnej współpracującej z satelitą geostacjonarnym (ITU-R IS.847-1)

Ostateczny kontur koordynacyjny wyznacza się, przyjmując na każdym azymucie od stacji satelitarnej większą z dwóch odległości koordynacyjnych – maks(d_1 , d_2). W celu orientacji, który z modów propagacji w danym zakresie azymutów może być pominięty, należy wykreślić wszystkie kontury. Linia przerywaną zaznaczyć kontury dla modu propagacji (1) leżące wewnątrz konturu dla modu propagacji (2) i dla modu propagacji (2) leżącego wewnątrz konturu dla modu propagacji (1). Przykład konturu koordynacyjnego przedstawiono na rysunku 10.2.

10.2. WYZNACZANIE OBSZARU KOORDYNACYJNEGO WOKÓŁ NADAWCZEJ NAZIEMNEJ STACJI SATELITARNEJ PRACUJĄCEJ W PASMACH CZĘSTOTLIWOŚCI PRZYPISANYCH DLA DWUKIERUNKOWEJ ŁĄCZNOŚCI

Sposób wyznaczania obszaru koordynacyjnego naziemnej stacji satelitarnej pracującej w pasmie przypisanym satelitarnej łączności dwukierunkowej jest przedstawiony w zaleceniu ITU-R IS.848-1. Praca w obu kierunkach w tym samym pasmie oznacza, że stosowane częstotliwości w łączu Ziemia–satelita i w łączu satelita–Ziemia znajdują się w tym samym, wspólnym pasmie. Z tego względu pojawia się możliwość zakłócania odbiorczej naziemnej stacji satelitarnej przez stację nadawczą. Zakłóceń można uniknąć, jeżeli zastosuje się procedury koordynacyjne dla obu typów stacji (nadawczych i odbiorczych). Procedury koordynacyjne umożliwiające wyznaczenie obszaru koordynacyjnego dla omawianego przypadku stanowią modyfikację procedur opisanych w zaleceniu ITU-R IS.847.

Podstawą określenia obszaru koordynacyjnego jest, jak w przypadku stacji satelitarnej stosujących różne pasma do transmisji sygnału do i z satelity, dopuszczalny poziom zakłócenia na wejściu odbiornika zakłócaniej stacji $P_{\text{f}}(p)$. Jest on obliczany z tych samych zależności, z tą różnicą, że ulega zmianie temperatura szumowa systemu odbiorczego zakłócaniej stacji. Wielkość temperatury szumowej należy przyjąć zgodnie z tabelą 10.8.

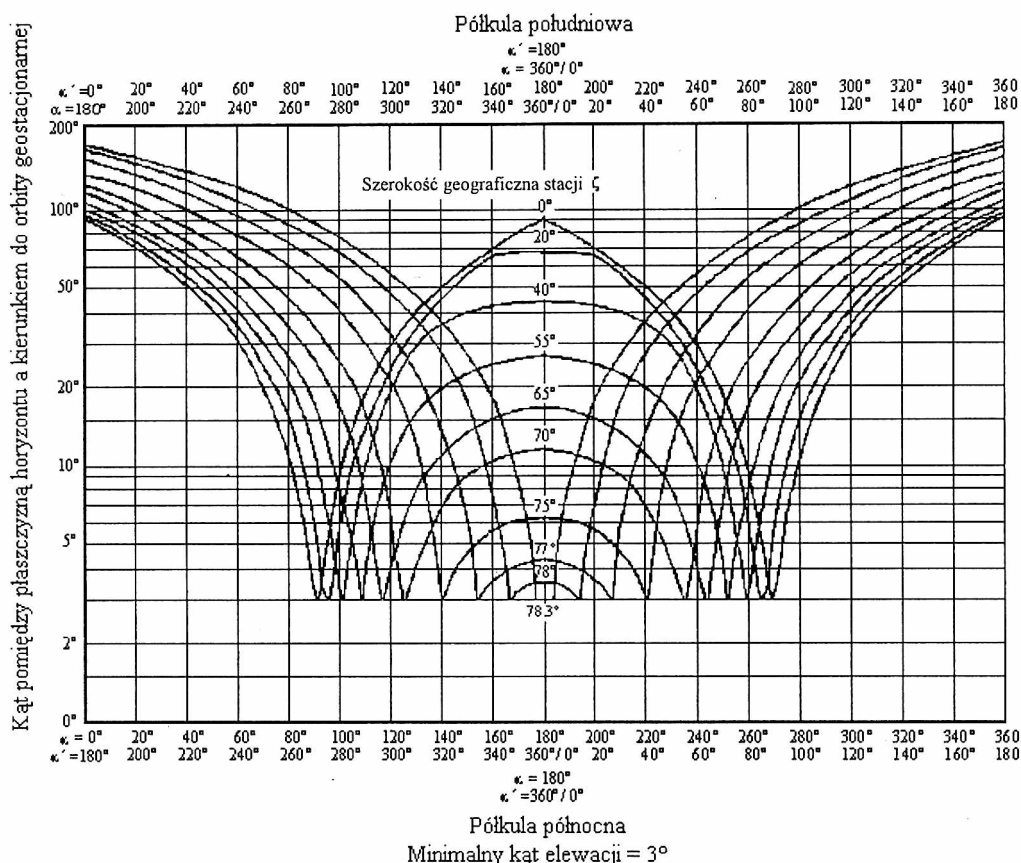
Tabela 10.8. Zastępcza temperatura szumowa odbiornika zakłócaniej naziemnej stacji satelitarnej (ITU-R IS.848-1)

Zakres częstotliwości, GHz	Zastępcza temperatura T_e , K
1–10	75
10–17	150
>17	300

W celu określenia obszaru koordynacyjnego dla modu propagacji (1) konieczne jest obliczenie zysku energetycznego anteny odbiorczej w kierunku zakłócającej stacji nadawczej. Charakterystyki i położenie stacji odbiorczej nie są jednak znane. Dlatego

też należy przyjąć kilka wstępnych założeń. Zakłada się, że odbiorcza stacja satelitar-na znajduje się na skraju obszaru koordynacyjnego i jest niezbyt odległa od stacji nadawczej. Ze względu na dokładność obliczeń, zamiast kulistego modelu Ziemi, można przyjąć model płaski. Ponadto zakłada się, że naziemne stacje satelitarne nadawcza i odbiorcza znajdują się na tej samej szerokości geograficznej.

Zgodnie z zależnościami (10.2) i (10.7), w celu wyznaczenia tłumienności trasy $L_b(p)$, należy uwzględnić zyski energetyczne anten nadawczej i odbiorczej w kierunku horyzontu i na wspólnym azymucie wyznaczonym od stacji nadawczej. Dla anteny nadawczej można przebieg zysku energetycznego wyznaczyć bezpośrednio w funkcji azymutu α od tej anteny. Uwzględniając wcześniejsze założenia, dla anteny odbiorczej azymut α' w kierunku anteny nadawczej można obliczyć z zależności $\alpha' = \alpha + 180^\circ$. Dlatego dla zadanego azymutu od anteny nadawczej zysk energetyczny trasy można wyznaczyć z zależności $G_t(\alpha) + G_r(\alpha')$.



Rys. 10.3. Przebieg kąta elewacji ε w funkcji azymutu α dla głównej wiązki anteny stacji satelitarnej położonej na różnych szerokościach geograficznych ζ (ITU-R IS.848-1)

Zysk energetyczny anteny odbiorczej określa się zgodnie z dodatkiem 1 do zalecenia ITU-R IS.847. W tym jednak przypadku zysk jest określany dla naziemnej stacji satelitarnej, a nie dla naziemnej stacji do łączności naziemnej (stacji ziemskiej), dlatego należy uwzględnić, że:

- główna wiązka anteny odbiorczej nie jest skierowana w kierunku horyzontu, ale w kierunku satelity pod często dużym kątem elewacji,
- kierunek głównej wiązki zależy od możliwych położenia satelitów geostacjonarnych.

Z tych względów, nie mając danych na temat położenia odbiorczej stacji satelitarnej, należy zastosować procedurę podaną w załączniku 1 do dodatku 1 zalecenia ITU-R IS.847 i w równaniu (10.7) przyjąć, że $G_e = 42 + \Delta G$.

Ponieważ nie jest wiadomo z góry, w kierunku jakiego miejsca na orbicie jest skierowana główna wiązka anteny odbiorczej, zysk w kierunku horyzontu tej anteny należy więc wyznaczyć dla wszystkich punktów orbity geostacjonarnej. Należy również przyjąć, że horyzont znajduje się pod zerowym kątem elewacji. Ostatnie założenie, że obie stacje znajdują się na tej samej szerokości geograficznej, jest założeniem upraszczającym. Błąd wynikający z przyjęcia tego założenia nie przekracza w żadnym przypadku 2 dB.

Zysk energetyczny odbiorczej anteny stacji zakłócanej w kierunku horyzontu należy wyznaczyć zgodnie z przypadkiem 2. opisanym w załączniku 1. do dodatku 1. zalecenia ITU-R IS.847 dla każdego azymutu α i dla:

- wszystkich punktów na orbicie geostacjonarnej, do których kąt elewacji przekracza 3° , przyjmując szerokość geograficzną stacji odbiorczej równą szerokości geograficznej stacji nadawczej,
- kąta elewacji do horyzontu równego 0° .

Na rysunku 10.3 pokazano przebiegi kąta elewacji głównej wiązki anteny skierowanej w kierunku orbity geostacjonarnej w funkcji azymutów α i α' . Szerokość geograficzna położenia naziemnej stacji satelitarnej ζ jest parametrem. Jeśli wykorzystamy charakterystykę promieniowania anteny, która jest zalecana w załączniku 1 do dodatku 1 zalecenia ITU-R IS.847, to można wyznaczyć zysk energetyczny anteny w kierunku horyzontu jako funkcję azymutów α i α' . Przykład takiej charakterystyki pokazano na rysunku 10.4. Na rysunku 10.5 przedstawiono przykład obszaru koordynacyjnego wyznaczonego według omówionej wcześniej procedury. Obszar ten wyznaczono, przyjmując następujące wartości poszczególnych parametrów do obliczeń:

- parametry nadawczej stacji satelitarnej:

$$f = 17 \text{ GHz},$$

$$P_{\text{r}} = 40 \text{ dB (W/MHz)},$$

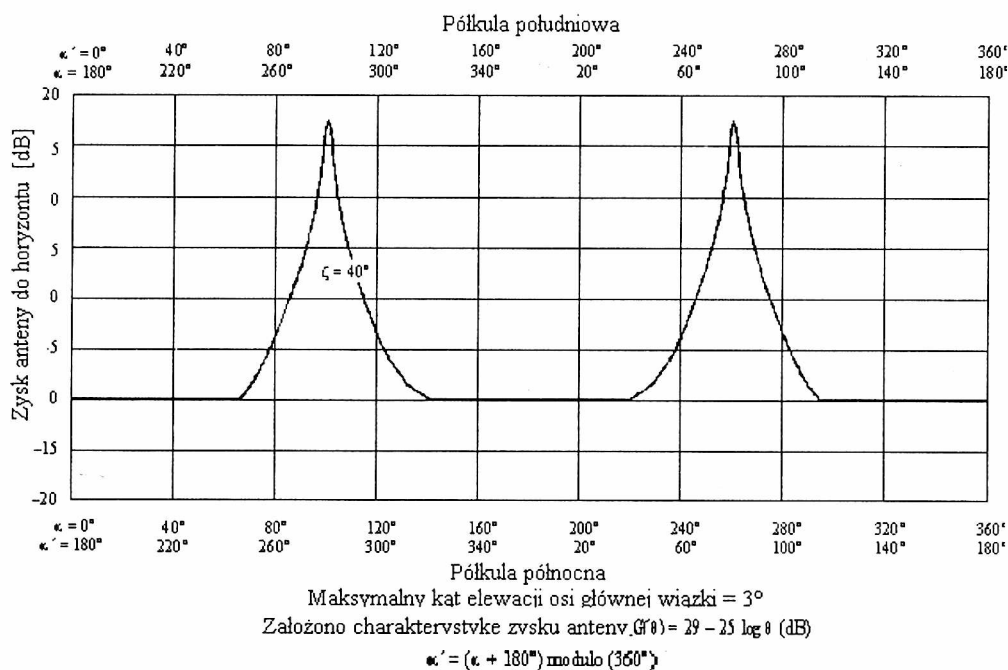
$$\zeta = 40^\circ,$$

$$\text{kąt elewacji do satelity} = 20^\circ,$$

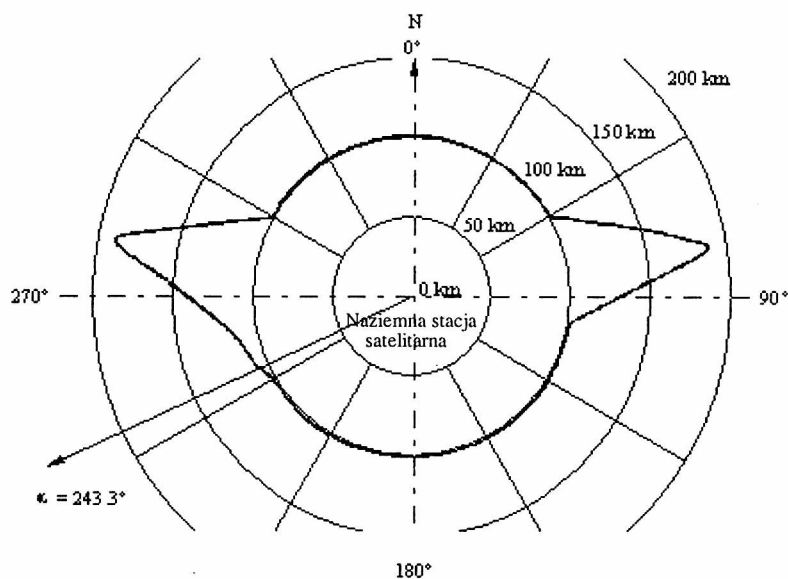
$$\text{azymut do satelity} = 243,3^\circ,$$

$$\text{strefa klimatyczna} = \text{A2},$$

$$\text{kąt do horyzontu} = 0^\circ.$$



Rys. 10.4. Przebieg zysku energetycznego anteny stacji satelitarnej w kierunku horyzontu w funkcji azymutu α (ITU-R IS.848-1)

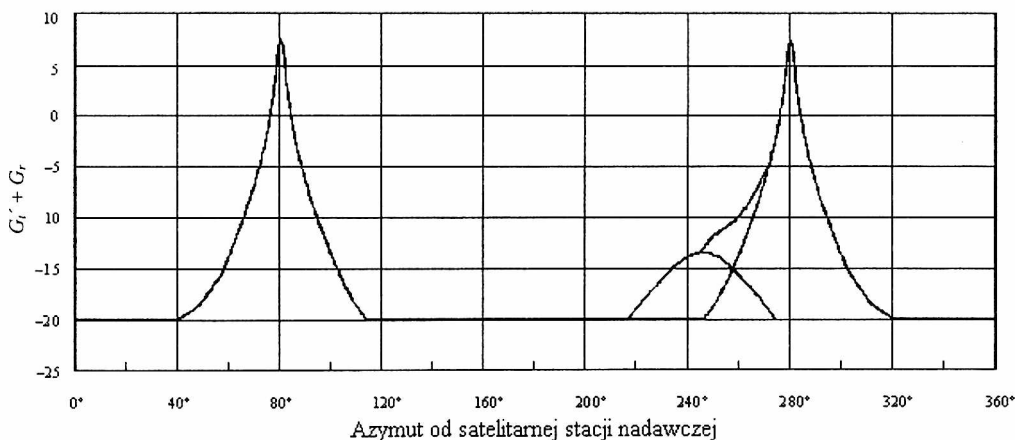


Rys. 10.5. Przykład obszaru koordynacyjnego wyznaczonego dla propagacji ortodromowej (ITU-R IS.848-1)

Postępując zgodnie z wcześniej opisaną procedurą, oblicza się w kolejności następujące wielkości:

$P_r(p)$	$= -141,1 \text{ dB (W/MHz)}$	(obliczone z zależności (10.3)),
p	$= 0,003\%$	(odczytane z tabeli 10.3),
L_1	$= 38,7 + G_r + G_r$	(obliczone z zależności (10.7) i (10.8)),
β_{dz}	$= 0,19102 \text{ dB/km}$	(obliczone z zależności (10.13)),
β_0	$= 0,00903 \text{ dB/km}$	(obliczone z zależności (10.14)),
β_{vz}	$= 0,03631 \text{ dB/km}$	(obliczone z zależności (10.15)),
d_1	$= L_1/0,24636$	(obliczone z zależności (10.11)).

Należy pamiętać, że przy obliczaniu zysku energetycznego anteny odbiorczej w kierunku horyzontu należy uwzględnić maksymalny zysk anteny równy 42 dBi. Przebieg zysku trasy $G_r + G_r$ dla pokazanego na rysunku 10.5 obszaru koordynacyjnego zaprezentowano na rysunku 10.6.



Rys. 10.6. Zysk trasy $G_r(\alpha) + G_r(\alpha')$ dla przypadku pokazanego na rys. 10.5 (ITU-R IS.848-1)

Obszar rozproszenia deszczowego (mod propagacji 2) dla nadawczej naziemnej stacji satelitarnej należy obliczyć zgodnie z następującą procedurą:

Krok 1: Oblicz kąt elewacji ε_s i azymut α_s do satelity, z którym stacja satelitarna nawiązała połączenie. Dla stacji współpracujących z satelitami znajdującymi się na orbitach nachylonych do płaszczyzny równika należy przyjąć najmniejszy kąt elewacji i odpowiadający temu kątowi azymut.

Krok 2: Oblicz długość trasy d_s wzdłuż osi wiązki głównej do punktu, w którym izoterma temperatury wynosi 0° . Izoterma 0° znajduje się na wysokości h_{FR} .

$$d_s = 8500 \left(\sqrt{\text{tg}^2(\varepsilon_s) + \frac{h_{FR}}{4250}} - \text{tg}(\varepsilon_s) \right) \text{ km}, \quad (10.34)$$

$$h_{FR} = \left\{ \begin{array}{ll} \begin{array}{ll} 5 - 0,075(\zeta - 23) & \text{km dla } \zeta > 23^\circ \\ 5 & \text{km dla } 0^\circ \leq \zeta \leq 23^\circ \end{array} & \left. \vphantom{\begin{array}{l} 5 - 0,075(\zeta - 23) \\ 5 \end{array}} \right\} \text{północna półkula,} \\ \begin{array}{ll} 5 & \text{km dla } 0^\circ \geq \zeta \geq -21^\circ \\ 5 + 0,1(\zeta + 21) & \text{km dla } -71^\circ \leq \zeta \leq -21^\circ \\ 0 & \text{km dla } \zeta \leq -71^\circ \end{array} & \left. \vphantom{\begin{array}{l} 5 \\ 5 + 0,1(\zeta + 21) \\ 0 \end{array}} \right\} \text{południowa półkula.} \end{array} \quad (10.35)$$

Krok 3: Zaznacz na mapie w odpowiedniej skali odległość d_s od stacji satelitarnej w kierunku azymutu α_s . Zaznaczony punkt jest punktem odniesienia, wokół którego wykreślony zostanie kontur rozproszenia deszczowego.

Krok 4: Wyznacz odległość maksymalnej widzialności dla punktu przecięcia osi głównej wiązki anteny z izotermą 0° ; jest to większa z długości

$$d_{\text{maks}} = 130,4 \sqrt{h_{FR}} \text{ km lub } 100 \text{ km} \quad (10.36)$$

oraz azymut odniesienia α_r .

$$\alpha_r = \cos^{-1}(0,2069 \operatorname{tg}(\zeta)), \quad (10.37)$$

przy czym ζ jest szerokością geograficzną punktu przecięcia.

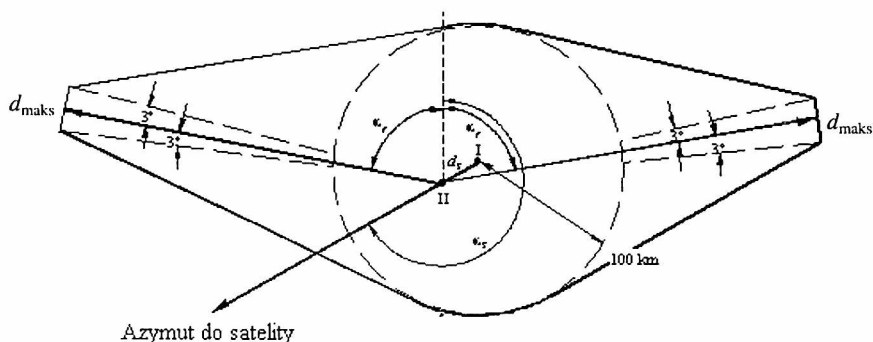
Dla punktów o szerokości geograficznej północnej większej niż $78,3^\circ$ i o szerokości geograficznej południowej poniżej -71° , obszar rozproszenia deszczowego jest kołem o promieniu 100 km ($d_{\text{maks}} = 100 \text{ km}$).

Krok 5: Od punktu odniesienia zaznacz na mapie odległość d_{maks} na dwóch azymutach α_r i $360^\circ - \alpha_r$.

Krok 6: Zaznacz na mapie we wcześniej zaznaczonych punktach odległych od punktu odniesienia o d_{maks} dwa łuki o szerokości 6° ze środkiem wyznaczonym przez azymuty. Łuki te są pierwszymi wykreślonymi elementami granic obszaru koordynacyjnego.

Krok 7: Wykreśl koło o promieniu 100 km i środku w miejscu lokalizacji stacji satelitarnej. Następnie połącz dwa górne brzegi łuków prostymi stycznymi do górnej części koła, a dwa dolne – prostymi stycznymi do dolnej części koła. Tak utworzony obszar jest obszarem rozproszenia deszczowego. Na rysunku 10.7 przedstawiono przykładowy obszar koordynacyjny dla rozproszenia przez deszcz. Wyznaczony obszar obejmuje wszystkie możliwe lokalizacje naziemnej odbiorczej stacji satelitarnej, dla której kierunek do orbity geostacjonarnej przecina oś głównej wiązki anteny satelitarnej stacji nadawczej (założono minimalny kąt pomiędzy wiązkami równy 3°). Do obliczeń przyjęto: $\zeta = 40^\circ$, $\varepsilon_s = 8^\circ$, $\alpha_s = 253,6^\circ$. Wartości poszczególnych wyznaczanych parametrów są następujące:

$$\begin{array}{ll} d_s = 26,2 \text{ km} & (\text{obliczona z zależności (10.34)}), \\ h_{FR} = 3,725 \text{ km} & (\text{obliczona z zależności (10.35)}), \\ d_{\text{maks}} = 251,7 \text{ km} & (\text{obliczona z zależności (10.36)}), \\ \alpha_r = 80,0^\circ & (\text{obliczona z zależności (10.37)}). \end{array}$$



- I położenie nadawczej stacji satelitarnej
 II punkt, w którym oś główna wiązki anteny osiąga wysokość h_{FR}

Rys. 10.7. Przykład wyznaczonego obszaru koordynacyjnego dla rozpraszania przez deszcz (ITU-R IS.848-1)

10.3. WYZNACZANIE OBSZARU KOORDYNACYJNEGO WOKÓŁ NADAWCZEJ NAZIEMNEJ STACJI SATELITARNEJ PRACUJĄCEJ W PASMACH CZĘSTOTLIWOŚCI WSPÓLNYCH Z SYSTEMAMI NAZIEMNYMI I WSPÓŁPRACUJĄCEJ Z NIEGEOSTACJONARNYMI SATELITAMI

Naziemne stacje satelitarne utrzymujące łączność z satelitami krążącymi wokół Ziemi po niegeostacjonarnych orbitach mogą być wyposażone w anteny śledzące ruch satelitów. Zysk energetyczny tych anten w kierunku horyzontu, w zależności od ustawienia, może zmieniać się w dużych granicach. Zmiany zysku odbywają się zazwyczaj w sposób periodyczny i przewidywalny. Występowanie względnie dużego zysku energetycznego w kierunku horyzontu i jednocześnie małe tłumienie trasy w kierunku tego samego azymutu są nieskorelowanymi zjawiskami losowymi, które mogą zdarzyć się tylko w przeciągu małego procentu czasu. Wartości minimalnego dopuszczalnego kąta elewacji i maksymalnej dopuszczalnej mocy promieniowanej izotropowo $EIRP$ w kierunku horyzontu są podane w artykule 28 *Regulaminu radio-komunikacyjnego* [67]. Dzięki temu ograniczona jest maksymalna odległość koordynacyjna.

Metoda ITU-R IS. 847 zakłada stałą wartość zysku energetycznego anteny w kierunku horyzontu, dlatego nie można jej stosować w tym przypadku. Potrzebne są inne założenia, które wraz z metodą obliczeniową przedstawiono w zaleceniu ITU-R IS.849-1.

Tabela 10.9. Parametry potrzebne do obliczenia odległości koordynacyjnej

Przeznaczenie służby satelitarnej		Badanie przestrzeni kosmicznej		
		w pobliżu Ziemi		daleki kosmos
Pasma częstotliwości (MHz) ⁽¹⁾		bez załogi	z załogą	
		1 700–1 710 2 200–2 290		2 290–2 300
Modulacja stosowana przez stację ⁽²⁾		–	–	–
Parametry zakłóceń i wymagania dla stacji naziemnej	p_0 (%)	0,1	0,001	0,001
	n	2	1	1
	p (%)	0,05	0,001	0,001
	N_L (dB) ⁽³⁾	–	–	–
	M_S (dB) ⁽⁴⁾	–	–	–
	W (dB) ⁽⁵⁾	–	–	–
Parametry stacji ziemskiej	E (dB(W)) A	62 ⁽⁶⁾	62 ⁽⁶⁾	62 ⁽⁶⁾
	E (dB(W)) N	–	–	–
	P_t (dB(W)) A	10 ⁽⁶⁾	10 ⁽⁶⁾	10 ⁽⁶⁾
	P_t (dB(W)) N	–	–	–
	DG (dB)	10 ⁽⁶⁾	10 ⁽⁶⁾	10 ⁽⁶⁾
Szerokość pasma odniesienia ⁽⁸⁾	B (Hz)	1	1	1
Dopuszczalny poziom zakłóceń	$P_r(p)$ (dB(W)) w B	–216	–216	–222

⁽¹⁾ Przypisane pasma częstotliwości podano w artykule 8 RR [67].

⁽²⁾ A – modulacja analogowa; N – modulacja cyfrowa.

⁽³⁾ ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾ Jak w tabeli 10.2.

⁽⁶⁾ W tych pasmach wybrano parametry odpowiadające stacjom ziemskim pracującym w systemach łączności naziemnej. Tylko dla służby badania przestrzeni kosmicznej, gdy nie rozważa się systemów łączności naziemnej, przyjmując pasmo o szerokości 1 Hz oraz 30 dB poniżej założonego wypadkowego poziomu emisji, można użyć następujące wartości:

$E = 20$ dB, $P_t = -17$ dB(W), $DG = -5$ dB dla analogowych stacji ziemskich,

$E = -23$ dB, $P_t = -60$ dB(W), $DG = -5$ dB dla cyfrowych stacji ziemskich.

⁽⁷⁾ W tych pasmach przyjęto parametry stacji ziemskich związanych z łącznością naziemną. Jeśli administracja uważa, że systemów łączności naziemnej nie trzeba uwzględniać, to w celu określenia obszaru koordynacyjnego można wybrać parametry odnoszące się do horyzontowych linii radiowych pracujących w pasmach 1525–1530 MHz.

⁽⁸⁾ W niektórych systemach może być celowy wybór pasma odniesienia B , różnego od wartości z tabeli – gdy parametry systemu wskazują, że tak można zrobić. Ponieważ jednak wartości E i P_t nie mogą być zmienione, szersze pasmo spowoduje zmniejszenie obszaru koordynacyjnego; późniejsze decyzje związane z zawężeniem pasma mogą spowodować konieczność powtórnej koordynacji stacji. Celowe może być również zawężenie pasma odniesienia, np. przy transmisji wąskopasmowej pasmo odniesienia B może być równe najmniejszej szerokości pasma zajmowanej przez pożądaną transmisję.

⁽⁹⁾ W niektórych przypadkach ze względu na charakterystyki systemu konieczne jest rozważenie węższego pasma odniesienia B . W takich przypadkach należy założyć szerokość pasma odniesienia równą rzeczywiście zajmowanej szerokości widma lub równą 1 MHz (wybrać większą wartość). Wymagania związane z dopuszczalnym poziomem powinny być proporcjonalnie dostosowane, (np. jeśli $P_r(p)$ jest -118 dB(W) w 100 MHz, wtedy $P_r(p)$ można przyjąć równe -138 dB(W) w 1 MHz).

dla odbiorczej stacji satelitarnej współpracującej z niegeostacjonarnymi satelitami

Operacje w kosmosie		Satelity badające Ziemię		Satelity meteorologiczne		
1 525–1 530	2 200–2 290	8 025–8 400		1 670–1 710 ⁽¹⁴⁾		7 450–7 550
–	–	N	N	N	N	N
1,0	1,0	0,02	0,022	0,012	0,012	0,006
1	2	2	2	2	2	2
1,0	0,5	0,01	0,011	0,006	0,006	0,003
–	–	–	–	–	–	1
–	–	–	–	–	–	24
0	0	0	0	0	0	0
50	62 ⁽⁷⁾	55	55	92 ⁽⁷⁾	92 ⁽⁷⁾	55
37	–	42	42	–	–	–
13	10 ⁽⁷⁾	13	13	40 ⁽⁷⁾	40 ⁽⁷⁾	13
0	–	0	0	–	–	–
–5	10 ⁽⁷⁾	0	0	10 ⁽⁷⁾	10 ⁽⁷⁾	0
10 ³	10 ³	100·10 ⁶ (9)	40·10 ⁶ (9)	5,33·10 ⁶	1,334·10 ⁶	10 ⁶
–184	–184	–118 ⁽¹⁰⁾	–126 ⁽¹¹⁾	–124 ⁽¹²⁾	–144 ⁽¹³⁾	–142

⁽¹⁰⁾ Wartości te stosuje się dla stacji służących do zbierania i przechowywania danych wyposażonych w anteny o zysku 55,2 dBi (średnica 9 m). Dla anten o innym zysku dopuszczalny poziom zakłóceń zmienia się proporcjonalnie do zmian zysku energetycznego anteny.

⁽¹¹⁾ Wartości te stosuje się dla stacji służących do bezpośredniego odczytu danych wyposażonych w anteny o zysku 36,4 dBi (średnica 1 m). Dla anten o innym zysku dopuszczalny poziom zakłóceń zmienia się proporcjonalnie do zmian zysku energetycznego anteny.

⁽¹²⁾ Wartości te stosuje się dla stacji wyposażonych w anteny o zysku 46,8 dBi (średnica 15,9 m). Dla anten o zysku z przedziału 39 dBi (średnica 6,5 m) $< G < 46,8$, $P_r(p) = G - 170,8$ dB(W).

⁽¹³⁾ Wartości te stosuje się dla stacji wyposażonych w anteny o zysku 29,8 dBi (średnica 2,2 m). Dla anten o innym zysku G ($G \leq 38$ dBi), odpowiednie wartości $P_r(p)$ są następujące:

$$P_r(p) = -144 \text{ dB(W)} \quad \text{dla } G \leq 30 \text{ dBi (2,3 m diameter),}$$

$$P_r(p) = 2(G - 30) - 144 \text{ dB(W)} \quad \text{dla } 30 \text{ dBi} < G \leq 34 \text{ dBi (średnica 3,6 m),}$$

$$P_r(p) = G - 170 \text{ dB(W)} \quad \text{dla } 34 \text{ dBi} < G < 38 \text{ dBi (średnica 5,8 m).}$$

⁽¹⁴⁾ W paśmie 1670÷1700 MHz, wymagany jest dodatkowy kontur do koordynacji ze służbą wsparcia meteorologicznego. Szczegóły obliczeń w tabeli 10.11 (zalecenie IS.850 [54]).

W zaleceniu tym zakłada się, że antena śledząca satelitę pracuje pod minimalnym, spełniającym operacyjne wymagania satelity, kątem elewacji. Wartość tego kąta i maksymalna dopuszczalna *EIRP* są określone w artykule 28 [67].

Obszar koordynacyjny dla opisywanego przypadku można wyznaczyć dwiema metodami: statystyczną i niezmiennego w czasie zysku TIG. Jako ostateczną wartość należy przyjąć mniejszą z dwóch obliczonych odległości. W obu przypadkach niezbędne do obliczeń dane, określające parametry elektryczne naziemnej stacji odbiorczej, należy przyjąć zgodnie z tabelą 10.9.

W praktyce zastosowanie metody statystycznej daje w wyniku mniejsze odległości koordynacyjne niż uzyskane metodą TIG, przedstawioną w dalszej części rozdziału. Oznacza to, że obszar koordynacyjny w praktyce jest wyznaczany na podstawie odległości koordynacyjnych wyznaczonych metodą statystyczną. Jeśli jednak na niektórych azymutach odległość koordynacyjna obliczona metodą TIG jest mniejsza, to należy przyjąć tą mniejszą wartość.

Przy określaniu obszaru koordynacyjnego dla stacji satelitarnych współpracujących z niegeostacjonarnymi satelitami nie uwzględnia się modu propagacji (2) (rozproszenie na hydrometeorach). Wynika to z małego prawdopodobieństwa zdarzenia, że straty transmisyjne będą nie większe niż dopuszczalna wartość. Występuje tu efekt redukcji tego prawdopodobieństwa spowodowany ruchem anteny o względnie dużym zysku lub względnie dużymi stratami dla anteny o małym zysku. We wszystkich przypadkach odległość koordynacyjna wyznaczona dla modu propagacji (1) jest większa niż dla modu propagacji (2). Przy odległościach pomiędzy stacjami mniejszymi niż odległość koordynacyjna mod propagacji (2) może mieć istotne znaczenie.

10.3.1. METODY STATYSTYCZNE

Pierwsza metoda statystyczna zakłada, że zysk energetyczny anteny w kierunku horyzontu (G_r, G_r) odpowiada zyskowi przekraczanemu przez 3% czasu. Obliczoną wartość zysku należy podstawić do zależności dla modu (1) propagacji opisanych w dodatku 1 do zalecenia [51]. Metoda ta wymaga określenia dystrybucyjności rozkładu zysku energetycznego anteny w kierunku horyzontu i analizowanych azymutów.

Jeśli potencjalnie zakłócana stacja ziemna lub stacja należąca do innej administracji leży wewnątrz obszaru koordynacyjnego wyznaczonego dla 3% czasu, to administracja może, po uzgodnieniach z inną administracją, zastąpić obszar koordynacyjny obliczony na podstawie kryterium 3% obszarem wyznaczonym drugą metodą statystyczną. Metoda ta polega na wyznaczeniu łącznego rozkładu prawdopodobieństwa i uwzględnia wspólne statystyki strat propagacji i zysku anten. Statystyki te wyznacza się obliczając spłot funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla strat propagacji i zysku energetycznego anten.

Na podstawie obliczeń stwierdzono, że uzyskiwane metodą wyznaczenia łącznego rozkładu prawdopodobieństwa odległości koordynacyjne są wystarczająco duże, mniejsze jednak niż obliczone pierwszą metodą statystyczną i metodą TIG. Obecnie administracje są zachęcane do stosowania tej metody.

Metoda uwzględniająca łączny rozkład prawdopodobieństwa jest metodą wymagającą stosowania względnie skomplikowanego aparatu matematycznego. Można ją stosować jedynie po uzgodnieniach z zainteresowanymi administracjami. Dokładny opis tej metody można znaleźć w publikacji [53].

10.3.2. METODA TIG

Metoda niezmiennego w czasie zysku TIG jest szczególnie przydatna, gdy zysk energetyczny anteny w kierunku horyzontu nie może być określony z zadowalającą dokładnością. Zysk anteny należy wtedy wyznaczyć z zależności

$$\begin{aligned} G_e &= G_{\text{maks}} & \text{dla} & \quad (G_{\text{maks}} - G_{\text{min}}) \leq 20 \text{ dB}, \\ G_e &= G_{\text{maks}} + 20 & \text{dla} & \quad 20 < (G_{\text{maks}} - G_{\text{min}}) < 30 \text{ dB}, \\ G_e &= G_{\text{maks}} - 10 & \text{dla} & \quad (G_{\text{maks}} - G_{\text{min}}) \geq 30 \text{ dB}, \end{aligned} \quad (10.38)$$

G_e reprezentuje zysk energetyczny anteny (dBi) w kierunku analizowanego azymutu, który należy podstawić jako wartość G_r lub G_r w zależności (10.2), natomiast G_{maks} i G_{min} to odpowiednio maksymalna i minimalna wartość zysku energetycznego anteny (dBi) w kierunku horyzontu na analizowanym azymucie.

Po obliczeniu zysków energetycznych G_r i G_r należy zastosować metodę wyznaczania odległości koordynacyjnej przedstawioną w zaleceniu IS.847 [51].

Metoda TIG daje pewne korzyści (mniejszy obszar koordynacyjny) związane z uwzględnieniem zmieniającego się zysku energetycznego anteny w kierunku horyzontu jedynie wtedy, gdy analizowana antena ma dostatecznie duży zysk maksymalny (większy niż 23 dBi). Jeśli maksymalny zysk anteny jest mniejszy, to zmiany zysku w kierunku horyzontu nie przekraczają 20 dB.

Jeśli analizowana stacja satelitarna jest przystosowana przez określony czas do pracy z satelitą geostacjonarnym, a przez pozostały czas z satelitami na innych orbitach, to odległość koordynacyjna dla każdego azymutu jest większą z dwóch odległości koordynacyjnych wyznaczonych dla łączności z satelitą geostacjonarnym (po uwzględnieniu modu propagacji (1) i (2)) i innymi satelitami (uwzględniając mod propagacji (1)).

Wyznaczony dla naziemnej stacji satelitarnej obszar koordynacyjny należy uzupełnić o dane określające rodzaj zastosowanej do obliczeń metody, tabelę przedstawiającą minimalną wartość kąta elewacji oraz wielkość zysku energetycznego w kierunku horyzontu dla każdego analizowanego azymutu.

W praktyce zastosowanie metody statystycznej daje w wyniku mniejsze odległości koordynacyjne niż uzyskane metodą TIG. Oznacza to, że obszar koordynacyjny jest w praktyce wyznaczany na podstawie odległości koordynacyjnych wyznaczonych metodą statystyczną. Jeśli jednak na niektórych azymutach odległość koordynacyjna obliczona metodą TIG jest mniejsza, to należy przyjąć tę mniejszą wartość.

10.4. OBSZARY KOORDYNACYJNE DLA SATELITARNYCH SŁUŻB RUCHOWYCH

Kiedy występuje wspólne użytkowanie tych samych pasm częstotliwości przez systemy naziemne i ruchowe systemy satelitarne, obszary koordynacyjne można wyznaczać na podstawie uproszczonych modeli. Ze względu na charakterystyki ruchomych naziemnych terminali satelitarnych nie ma potrzeby prowadzenia oddzielnej procedury koordynacyjnej dla każdego przypadku i dla każdego azymutu. Uproszczone metody uwzględniają *EIRP* stacji nadawczej i poziom czułości stacji odbiorczej oraz dużą wartość podstawowych strat transmisji na trasach pozahoryzontowych. Nie są brane pod uwagę dodatkowe tłumienia spowodowane specyficznym ukształtowaniem terenu.

W tabelach 10.10 i 10.11 przedstawiono odległości koordynacyjne dla naziemnych stacji satelitarnych nadawczych i odbiorczych. Rozważono kilka przypadków zdefiniowanych przez pasmo częstotliwości i służby radiokomunikacyjne. W celu wyznaczenia obszaru koordynacyjnego dla terminali satelitarnych, które mogą pracować na określonym obszarze, odległość koordynacyjną należy odmierzyć we wszystkich kierunkach od obsługiwanego obszaru. Obszar koordynacyjny obejmuje obszar obsługiwany. Dla stacjonarnych stacji satelitarnych obszar koordynacyjny należy wyznaczyć od punktu określającego lokalizację analizowanej stacji. Dla przypadków, które nie są określone w tabelach 10.10 i 10.11 należy stosować procedury koordynacyjne opisane w IS.847 [51] i IS.849 [53]. W zaleceniu [53] można również znaleźć uwagi związane z odległością koordynacyjną dla stacji satelitarnych pracujących na potrzeby lotnictwa i instalowanych na pokładzie statku powietrznego i na powierzchni ziemi, dla stacji satelitarnych pracujących w systemach lokalizacyjnych i w służbie meteorologicznej i wsparcia meteorologicznego.

Tabela 10.10. Odległości koordynacyjne dla nadawczych naziemnych stacji satelitarnych

Pasmo częstotliwości MHz	Służba ziemna (RR nr)	Służba kosmiczna (RR nr)	Klasa naziemnej stacji	Odległość koordynacyjna km
1	2	3	4	5
1610–1626,5	radionawigacja lotnicza stała (730)	ruchowa satelitarna (731E)	na pokładzie	1000 i 500 <i>vis a vis</i> odpowiednio dla stacji lotniczych i na ziemi pracujących w służbie naziemnej (uwaga 1.)
		satelitarna radionawigacja lotnicza (732) (731E)	na ziemi	
		ruchowa lotnicza satelitarna (733) (731E)		zał. ITU-R IS.847 lub ITU-R IS.849 dla sł. stałej, inaczej 500 (uwaga 1.)
		radiolokalizacja satelitarna	na pokładzie	400, <i>vis a vis</i> stacji na ziemi pracującej w sł. naziemnej (uwaga 2.)
			na ziemi	100, <i>vis a vis</i> stacji na ziemi pracującej w sł. naziemnej (uwaga 2.)

1	2	3	4	5
1626,5–1631,5	stała (730)	ruchowa satelitarna (726D)	na pokładzie	1000 (uwaga 1.)
1626,5–1645,5		ruchowa satelitarna (726C) (726D)	na ziemi	zał. ITU-R IS.847 lub ITU-R IS.849 (uwaga 1.)
		ruchowa morska satelitarna (726C)	na ziemi	zał. ITU-R IS.847 lub ITU-R IS.849 (uwaga 1.)
1631,5–1634,5		stała (730) ruchowa lotnicza (735)	ruchowa lądowa satelitarna (726B)	na pokładzie
1646,5–1656,5	ruchowa lotnicza satelitarna (726D)		na ziemi	
1656,5–1660	stała (730)	ruchowa lądowa satelitarna (726D) ruchowa satelitarna (730B) (730C) (726D) ruchowa lotnicza satelitarna (730A) (726D)		
1675–1710	stała, ruchowa	ruchowa satelitarna (735A)		
1970–2010	stała, ruchowa	ruchowa satelitarna (746B)	na pokładzie	1000 i 500, <i>vis a vis</i> odpowiednio stacji lotniczej lub na ziemi pracującej w sł. naziemnej (uwaga 1.)
			na ziemi	zał. ITU-R IS.847 lub ITU-R IS.849 dla stacji na ziemi pracujących w sł. naziemnej, inaczej 500 (uwaga 1.)
5000–5250	radionawigacja lotnicza ruchowa (797B)	ruchowa lotnicza satelitarna (733)	na pokładzie	1000 i 500, <i>vis a vis</i> odpowiednio stacji lotniczej lub na ziemi pracującej w sł. naziemnej
7900–8025	stała, ruchowa	ruchowa satelitarna (812)		
15400–15700	radionawigacja lotnicza	ruchowa lotnicza satelitarna (733)		
43500–47000	ruchowa radionawigacja	ruchowa satelitarna radionawigacja satelitarna		

Tabela 10.11. Odległości koordynacyjne dla odbiorczych naziemnych stacji satelitarnych

Pasmo częstotliwości MHz	Służba ziemska (RR nr)	Służba kosmiczna (RR nr)	Klasa naziemnej stacji	Odległość koordynacyjna km
1	2	3	4	5
1215–1260	radiolokacja stała, ruchowa (711) radionawigacja (712, 712A) radionawigacja lotnicza (714)	radionawigacja satelitarna	na pokładzie	1000 i 500, <i>vis a vis</i> odpowiednio stacji na pokładzie i na ziemi pracujących w sl. naziemnej
1492–1525	stała, ruchowa	ruchowa satelitarna (723C)	na pokładzie	1000 i 500, <i>vis a vis</i> odpowiednio stacji na pokładzie i na ziemi pracujących w sl. naziemnej (uwaga 1.) zał. ITU-R IS.847 lub ITU-R IS.849 dla stacji na ziemi, inaczej 500 (uwaga 1.)
1525–1530		ruchowa satelitarna (726D) morska ruchowa satelitarna (726D)	na ziemi	
1550–1555		lotnicza ruchowa satelitarna (726D)		
1555–1559	stała (730)	lotnicza ruchowa satelitarna (730A) (726D) ruchowa satelitarna (730C) (726D)		
		lądowa ruchowa satelitarna (726D)	na ziemi	zał. ITU-R IS.847 lub ITU-R IS.849 (uwaga 1.)
1559–1610	radionawigacja lotnicza stała (730)	radionawigacja satelitarna		1000 i 500, <i>vis a vis</i> odpowiednio stacji na pokładzie i na ziemi pracujących w sl. naziemnej, za wyjątkiem sl. ruchowej lotniczej satelitarnej <i>vis a vis</i> sl. stałej, gdzie należy przyjąć 800
1610–1626,5		lotnicza radionawi- gacja satelitarna (732) lotnicza ruchowa satelitarna (733)		

1	2	3	4	5
1613,8–1626,5	radionawigacja lotnicza stała (730)	ruchowa satelitarna (731F)	na pokładzie na ziemi	1000 i 500, <i>vis a vis</i> odpowiednio stacji na pokładzie i na ziemi pracu- jących w sł. naziemnej (uwaga 1.) zał. ITU-R IS.847 lub ITU-R IS.849 dla sł. stałej, inaczej 500 (uwaga 1.,6.)
1670–1700	ruchowa (740A) wsparcia meteo- rologicznego stała	meteorologiczna satelitarna	na ziemi	uwaga 3.
2160–2200	stała, ruchowa	ruchowa satelitarna (746B)	na pokładzie na ziemi	1000 i 500, <i>vis a vis</i> odpowiednio stacji na pokładzie i na ziemi pra- cujących w sł. naziemnej (uwaga 1.) rec. ITU-R IS.847 lub ITU-R IS.849 dla stacji na ziemi pracują- cych w sł. naziemnej, inaczej 500 (uwaga 1.)
2483,5–2500	stała, ruchowa radiolokalizacja	ruchowa satelitarna (753F) radiolokalizacja satelitarna (753A) (753C)	na pokładzie na ziemi	400, <i>vis a vis</i> stacji na ziemi pra- cującej w sł. naziemnej (uwaga 2.) 100, <i>vis a vis</i> stacji na ziemi pracu- jącej w sł. naziemnej (uwaga 2.)
2500–2520	stała, ruchowa	ruchowa satelitarna (760A)	na pokładzie na ziemi	1000 i 500, <i>vis a vis</i> odpowiednio stacji na pokładzie i na ziemi pra- cującej w sł. naziemnej (uwaga 1.) zał. ITU-R IS.847 lub ITU-R IS.849 (uwaga 1.)
5000–5250	radionawigacja lotnicza ruchowa (797B)	ruchowa lotnicza satelitarna (733)	na pokładzie	1000 i 500, <i>vis a vis</i> odpowiednio stacji na pokładzie i na ziemi pracujących w sł. naziemnej
5150–5216		radiolokalizacja satelitarna (797A)		
7250–7375	stała, ruchowa	ruchowa satelitarna (812)		
15400–15700	radionawigacja lotnicza	ruchowa lotnicza satelitarna (733)		
20200–21200	stała, ruchowa (873)	ruchowa satelitarna		
29500–40500	stała, ruchowa			
43500–47000	ruchowa radionawigacja	radionawigacja satelitarna		

Wszystkie uwagi zgodne z uwagami w IS.850 [54].

11. METODY POMIARU EMISYJNOŚCI NAZIEMNYCH STACJI SATELITARNYCH VSAT

W normach ETSI 300 157 [31], 300 159 [32] i 300 327 [64] dotyczących stacji satelitarnych VSAT pracujących w pasmie K_u i stacji satelitarnych służby reporterskiej SNG ograniczono maksymalne poziomy promieniowania niepożądanego przez podanie odpowiednich wartości *EIRP*. Taki sposób definicji ułatwia modelowanie tego typu stacji. Niestety, pomiar zgodności tego parametru z normą jest niezwykle trudny. Dlatego też powołano w ETSI specjalną grupę zajmującą się opracowaniem metodologii pomiaru naziemnych stacji satelitarnych VSAT. Owocem prac tej grupy było stworzenie podstaw do opracowania standardu ETSI ETS 300 456 [36]. Autor zaangażowany był w opracowanie tego standardu, jak również w opracowanie i weryfikację *Technicznych podstaw do wymagań* TBR [65, 66] Na podstawie tych dokumentów omówiono metody pomiarowe i zalecenia związane z testowaniem terminali VSAT i satelitarnych stacji reporterskich SNG. Powinny one stać się podstawą do opracowania odpowiednich krajowych procedur homologacyjnych.

11.1. STANOWISKA POMIAROWE

Do pomiaru emisyjności terminali VSAT i SNG rozważa się następujące typy stanowisk pomiarowych:

- wolna przestrzeń – pomiar w polu dalekim (*outdoor far-field*),
- komora bezodbiciowa (bezechowa) (*anechoic chamber*),
- otwarta przestrzeń (wolna półprzestrzeń) OATS,
- stanowisko z tzw. anteną kompaktową (*compact antenna*),
- komora częściowo bezodbiciowa (*semi-anechoic chamber*).

Pomiary zysku anteny i jej parametrów polaryzacyjnych muszą być wykonane w polu dalekim, które jest dostępne na stanowisku w wolnej przestrzeni lub na stanowisku wykorzystującym anteny kompaktowe.

W celu zmniejszenia niepewności i błędów pomiaru wszystkie stanowiska pomiarowe powinny być sprawdzone, a tam gdzie to jest konieczne skalibrowane.

Do pomiarów można stosować również inne stanowiska pomiarowe pod warunkiem, że udowodni się, że wyniki uzyskane na tym stanowisku są w pełni zgodne z wynikami uzyskanymi na jednym z wcześniej wymienionych stanowisk w całym zakresie częstotliwości pomiarowych. Przy pomiarach w komorze bezechowej należy pamiętać, że materiały absorpcyjne mogą absorbować maksymalnie moc 155 mW/cm^2 przy częstotliwości 12 GHz, która spada do wartości 116 mW/cm^2 przy 18 GHz. Podczas pomiarów terminalu VSAT wymagających włączenia nośnej należy szczególną uwagę zwrócić na nieprzekroczenie podanych wcześniej limitów absorpcji.

Stanowisko pomiarowe powinno być umieszczone na odpowiedniej płaszczyźnie lub ziemi wolnej od wszelkich obiektów mogących spowodować odbicia fałszujące wyniki pomiaru. Również obiekty znajdujące się w sąsiedztwie stanowiska pomiarowego nie mogą obniżać dokładności pomiaru.

Wszystkie pomiary dotyczące emisyjności i podatności elektromagnetycznej terminalu VSAT muszą być prowadzone podczas jego pracy w trybie ciągłego nadawania.

Poziom szumu i zakłóceń tła pomiarowego musi być o 6 dB niższy niż najniższy poziom, z którym wyniki pomiarów są porównywane.

11.1.1. WOLNA PRZESTRZEŃ – POMIAR W POLU DALEKIM

Tego typu stanowisko pomiarowe powinno być zlokalizowane na zewnątrz. Odległość pomiędzy anteną pomiarową i anteną mierzoną powinna być na tyle duża, by znajdowały się one wzajemnie w swoich dalekich strefach promieniowania. Odbicia zarówno od obiektów naturalnych, jak i sztucznych powinny być jak najmniejsze oraz o znanej amplitudzie i wpływie.

W dokumencie IEC 510-2-1 [44] w dodatku B odległość do strefy dalekiej promieniowania anteny o kołowej aperturze jest określona wzorem

$$D_{sd} > 2D^2/\lambda \text{ m}, \quad (11.1)$$

w którym:

D_{sd} – odległość do strefy dalekiej,

D – największy rozmiar apertury badanej anteny, m,

λ – długość fali w wolnej przestrzeni przy częstotliwości pomiarowej, m.

Nawet przy odległości pomiarowej $D_{sd} = 2D^2/\lambda$ różnica dróg pomiędzy środkiem źródła a środkiem apertury i środkiem źródła a brzegiem apertury wynosi $\lambda/16$. Spowodowana tą różnicą dróg zmiana fazy fali padającej wynosi $22,5^\circ$, a błąd pomiaru zysku anteny 0,1 dB.

Struktura, do której jest przymocowane badane urządzenie musi umożliwić ustawienie polaryzacji, kąta elewacji i azymutu tak, aby odebrany sygnał miał maksymalną wartość.

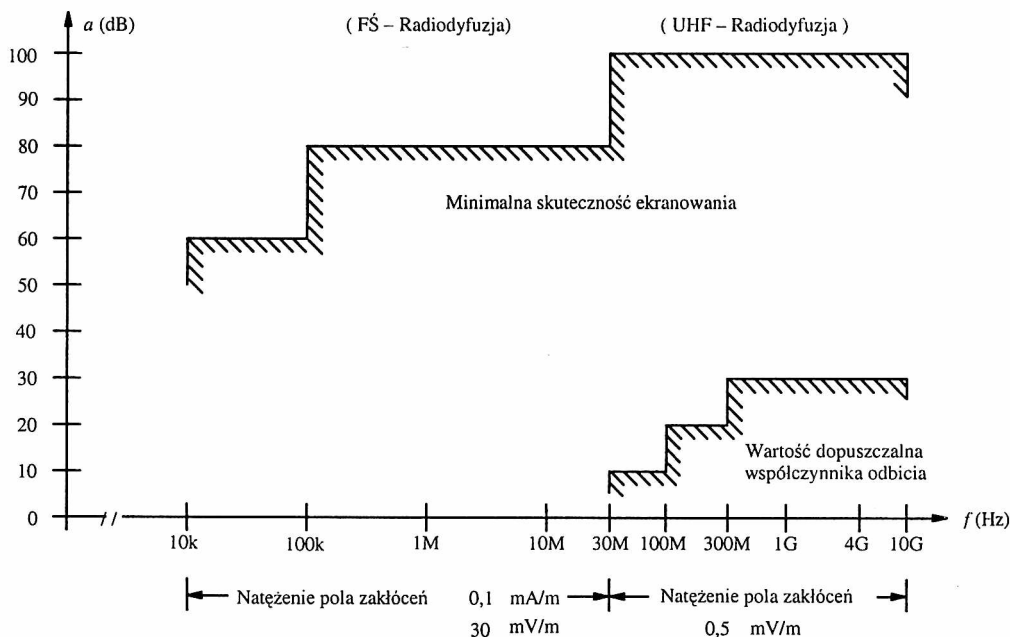
W celu eliminacji błędów spowodowanych zmianami współczynnika odbicia podczas pomiarów w różnych geometriach układu pomiarowego należy dążyć do minimalizacji odbić od podłoża. Odpowiednią uwagę należy również zwrócić na odbicia od innych obiektów przyległych do stanowiska pomiarowego. Nie mogą one pogarszać wyników pomiarów. Ponadto wszystkie przewody pomiarowe powinny być tak krótkie, jak to możliwe i należy je ekranować.

Pomiary antenowe można wykonywać w polu bliskim, jeśli laboratorium korzysta z metody skanowania i systemu komputerowego umożliwiającego przeliczenie wyników pomiarów w polu bliskim na wyniki pomiarów w polu dalekim. Warunkiem jest wcześniejsze przeprowadzenie testów potwierdzających poprawność przeliczeń dla określonych anten.

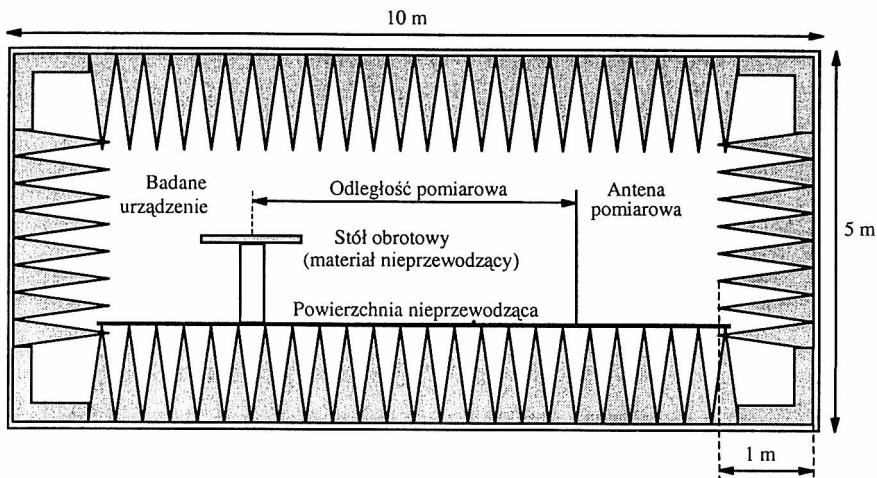
11.1.2. KOMORA BEZODBICIOWA

Komora bezodbiciowa to dobrze ekranowane pomieszczenie wyłożone wewnątrz materiałem dobrze absorbującym promieniowanie elektromagnetyczne. Dzięki temu warunki pomiaru wewnątrz komory symulują warunki w wolnej przestrzeni. Można w niej prowadzić pomiary bezwzględne lub porównawcze. Pomiary bezwzględne natężenia pola wymagają wcześniejszej kalibracji komory. Komora bezodbiciowa jest często stosowana w pomiarach wrażliwości i odporności na narażenia elektromagnetyczne.

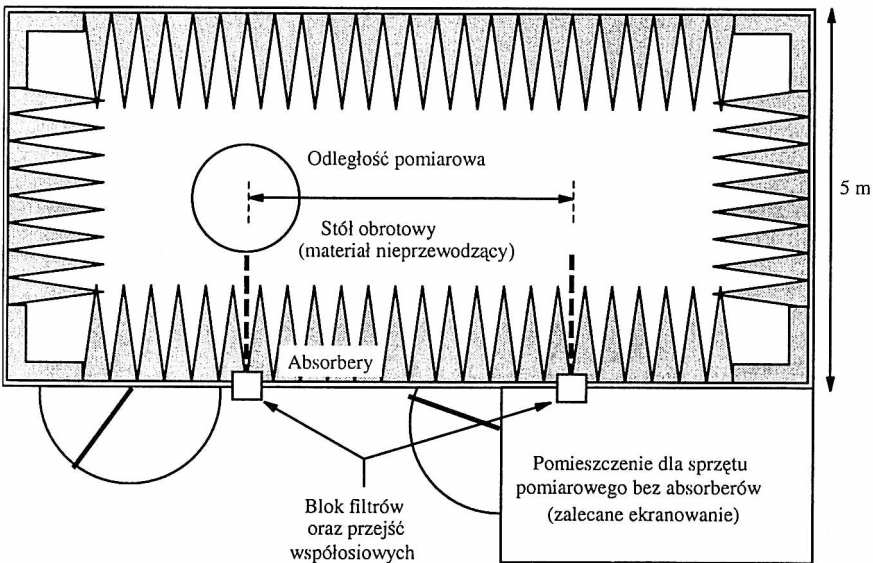
Komora bezodbiciowa musi spełniać wymagania związane ze skutecznością ekranowania oraz współczynnikiem odbicia, których przykład przedstawiono na rysunku 11.1. Na rysunku 11.2 pokazano przykład komory bezechowej o wymiarach zewnętrznych 5×10 m i wysokości 5 m. Komory o takich wymiarach stosuje się głównie do pomiarów kompatybilności elektromagnetycznej. Sufit i ściany komory są wyłożone absorberami o kształcie piramidy i wysokości 1 m, podłoga natomiast specjalnym absorberem umożliwiającym chodzenie. Dostępna przestrzeń pomiarowa komory wynosi $3 \times 8 \times 3$ m, dlatego też maksymalna odległość pomiarowa wzdłuż środkowej osi komory wynosi 5 m. Absorber umieszczony na podłodze eliminuje odbicia, dzięki czemu wysokość anteny pomiarowej nie musi być zmieniana podczas procedury kalibracyjnej. Na rysunku 11.3 pokazano komorę, którą można stosować do pomiaru przy większych częstotliwościach. Rozmiary komory stosowanej do pomiarów nie są normalizowane.



Rys. 11.1. Skuteczność ekranowania i współczynnik odbicia wymagane dla komory bezodbiciowej



Widok z góry



Rys. 11.2. Komora bezodbiciowa symulująca warunki wolnej przestrzeni stosowana do pomiaru przy częstotliwościach poniżej 3 GHz

Przy propagacji w wolnej przestrzeni zależność między natężeniem pola a odległością w strefie dalekiej jest określona wzorem

$$E = E_0 \frac{R_0}{R}, \quad (11.2)$$

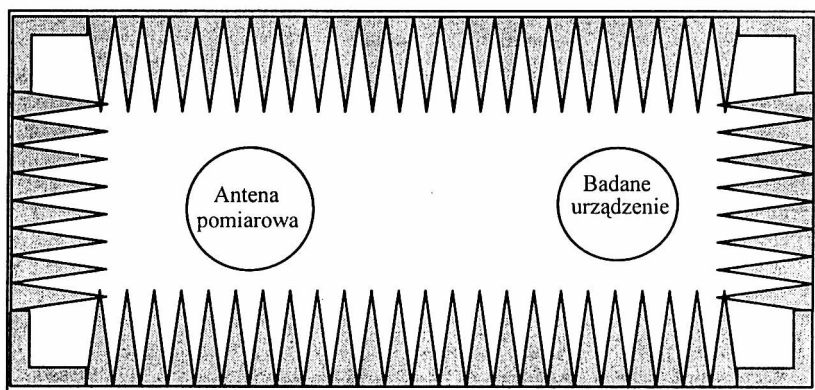
w którym:

E – natężenie pola elektrycznego,

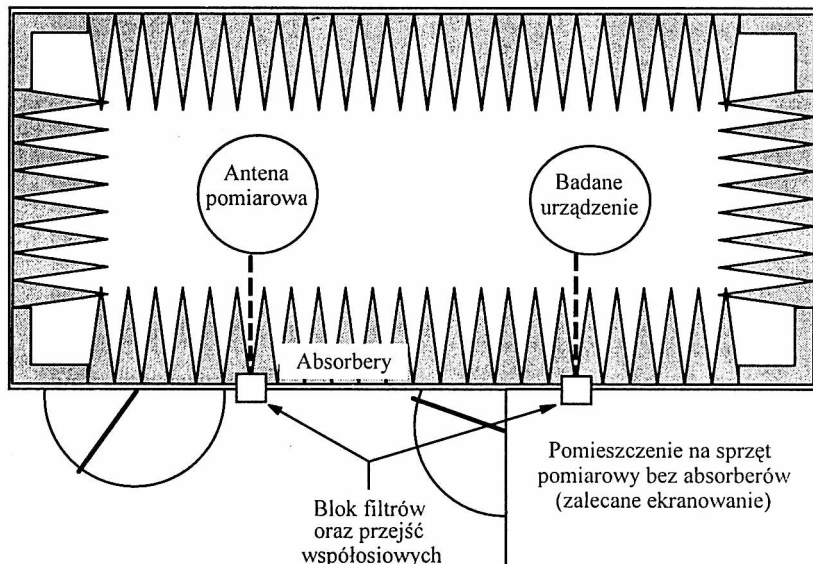
E_0 – natężenie odniesienia,

R_0 – odległość odniesienia,

R – bieżąca odległość.



Widok z góry



Rys. 11.3. Komora bezodbiiciowa symulująca warunki wolnej przestrzeni stosowana do pomiaru przy częstotliwościach powyżej 3 GHz

Wzór (11.2) umożliwia prowadzenie pomiarów względnych. Wpływ tłumienia przewodów, niedopasowania anteny lub jej rozmiaru jest do pominięcia. Jeśli weźmiemy logarytm z obu stron wyrażenia, to otrzymamy

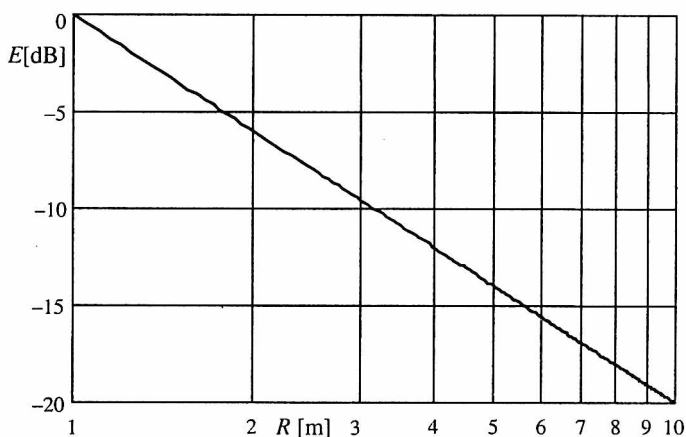
$$E_{\text{dB}} = E_{0\text{dB}} + R_{0\text{dB}} - R_{\text{dB}}, \quad (11.3)$$

gdzie:

$$R_{0\text{dB}} = 20 \log(R_0) = \text{const},$$

$$R_{\text{dB}} = 20 \log(R).$$

Z zależności tej widać, że związek pomiędzy natężeniem pola i odległością w decybelach jest liniowy. Na rysunku 11.4. pokazano, jak zmienia się natężenie pola w funkcji odległości dla przypadku, gdy w odległości 1 m natężenie wynosi 0 dB.



Rys. 11.4. Zmiany natężenia pola w funkcji odległości

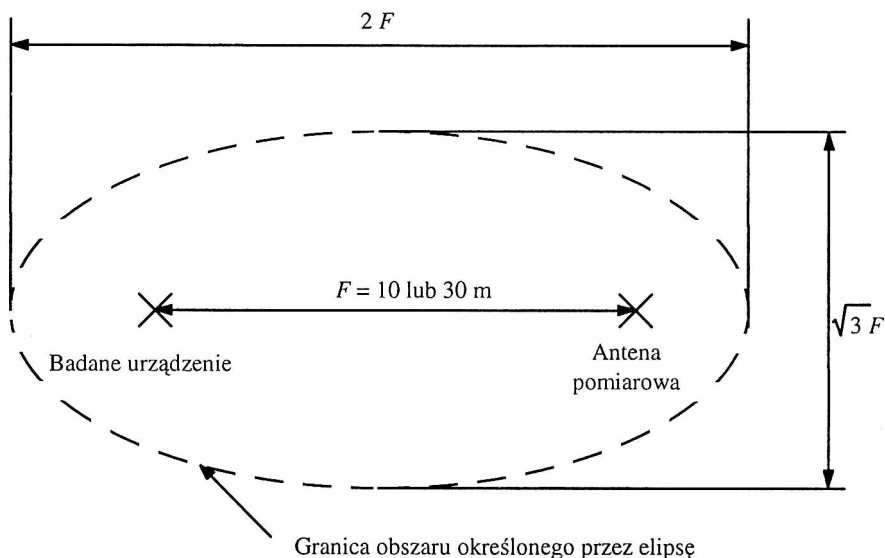
Na podstawie zależności (11.2) można w łatwy sposób sprawdzić wpływ odbić w komorze. Wszelkie odchylenia od prostej podczas wyznaczania natężenia pola w funkcji odległości świadczą o istnieniu odbić, a wielkość tych odchyżeń może świadczyć o wartości współczynnika odbicia. Pomiar ten jest dużo łatwiej wykonać niż pomiar współczynnika odbicia.

W komorze bezechowej o wymiarach podanych na rysunku 11.2 przy częstotliwości poniżej 100 MHz nie ma strefy dalekiej i odbicia są znaczne, dlatego też niezbędna jest dokładna kalibracja. W środkowym zakresie częstotliwości od 100 MHz do 1 GHz zależność natężenia pola od odległości powinna niewiele odbiegać od teoretycznej liniowej zależności. Powyżej 1 GHz, ponieważ pojawia się więcej odbić, zależność natężenia pola od odległości bardziej odbiega od zależności teoretycznej, dlatego też bardzo istotnym czynnikiem podczas pomiarów jest użycie komory bezechowej o odpowiednich rozmiarach w stosunku do zakresu częstotliwości, w którym pomiary należy wykonać, oraz rozmiarów sprzętu, który należy mierzyć.

11.1.3. OTWARTA PRZESTRZEŃ (WOLNA PÓLPRZESTRZEŃ)

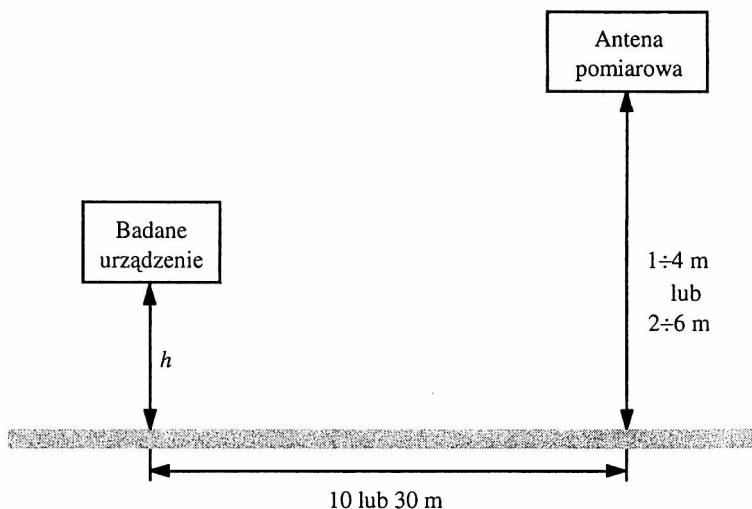
W zakresie częstotliwości, w którym są prowadzone badania, stanowisko pomiarowe w otwartej przestrzeni OATS oraz wszelkiego rodzaju osłony i zadaszenia chroniące stanowisko przed warunkami atmosferycznymi muszą być „przezroczyste” dla fali elektromagnetycznej. Można na nim prowadzić pomiary bezwzględnych, jak i względnych wartości natężenia pola. W przypadku pomiarów wartości bezwzględnych konieczne jest wcześniejsze kalibrowanie stanowiska.

Na rysunku 11.5 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego w otwartej przestrzeni. Powinno być ono oddalone od zabudowań, linii energetycznych, płotów, drzew itp. oraz być wypoziomowane. Należy zainstalować płaszczyznę odniesienia w celu ustabilizowania naturalnych odbijających właściwości podłoża i uczynienia ich niezależnymi od innych warunków otoczenia i czasu. Płaszczyzna odniesienia powinna wystawać co najmniej 1 m poza obrys badanego urządzenia oraz co najmniej 1 m poza antenę pomiarową na drugim końcu stanowiska pomiarowego. Podczas pomiarów na częstotliwościach wyższych niż 1 GHz, jeśli płaszczyzna odniesienia jest zbudowana z siatki przewodów lub siatki aluminiowej, to lita metalowa płaszczyzna o wymiarach co najmniej 3 m szerokości i 6 m długości musi przykryć obszar rozpoczynający się od środka obrotowego stołu pomiarowego (środką mierzonego terminalu VSAT) i ciągnący się w kierunku anteny pomiarowej. Wokół stanowiska pomiarowego powinien znajdować się pas terenu wolny od przeszkód, powodujących rozpraszanie fal elektromagnetycznych, i na tyle duży, by sygnały rozpraszane poza nim w nieznacznym stopniu wpływały na wynik pomiaru.



Rys. 11.5. Stanowisko pomiarowe w otwartej przestrzeni OATS
(F – zalecana odległość pomiarowa)

Na rysunku 11.6 przedstawiono położenie sprzętu i płaszczyzny odniesienia podczas pomiaru. Wysokość, na której znajduje się testowany obiekt, powinna być określona dla każdego testu. Wysokość anteny pomiarowej powinna być zmieniana w celu określenia poziomu fali bezpośredniej i odbitej oraz ich sumy i różnicy.



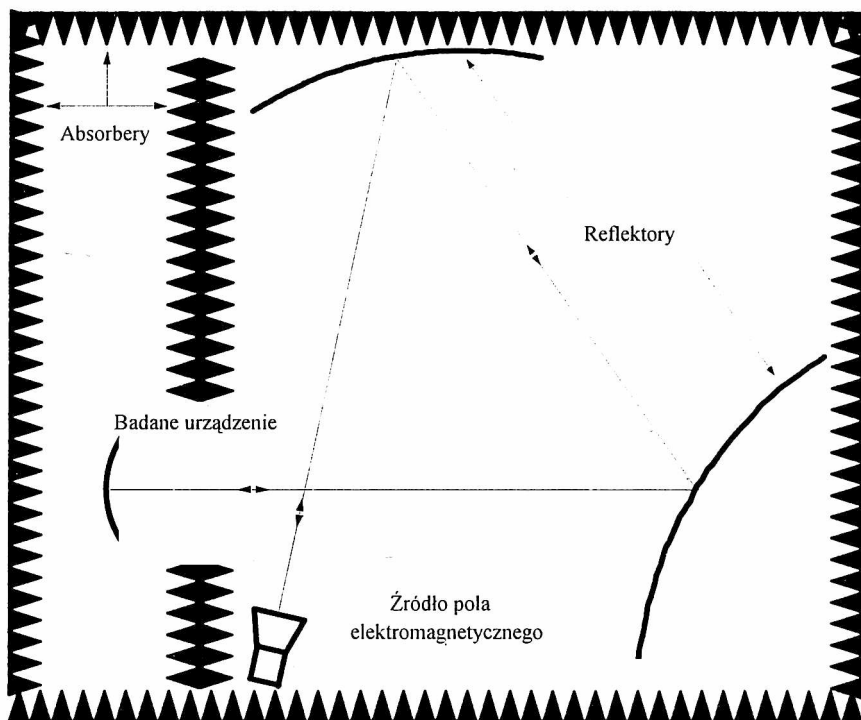
Rys. 11.6. Rozmieszczenie elementów na stanowisku pomiarowym

11.1.4. ANTENA KOMPAKTOWA

Stanowisko pomiarowe stosujące antenę kompaktową składa się z dużej komory bezekowej, w której za pomocą systemu lusterek możliwa jest symulacja strefy dalekiej promieniowania. System lusterek składa się z dokładnie ustawionych i profilowanych powierzchni metalowych tworzących odpowiedni układ optyczny.

Na rysunku 11.7 pokazano ogólną geometrię stanowiska pomiarowego. Antena odbiorcza odbiera sygnał skolimowanej energii. Rozmiar liniowy stosowanych zwierciadeł pomocniczych jest co najmniej trzykrotnie większy niż rozmiar anteny, którą oświetlają lub przez którą są oświetlane. Dlatego też układ tego typu w odpowiednim stopniu aproksymuje falę płaską. Aby stłumić promieniowanie bezpośrednie od testowanego urządzenia do anteny pomiarowej stosuje się zwierciadła odbijające o długich ogniskowych. Stosowanie tego typu zwierciadeł ma dodatkową zaletę związaną z minimalizacją efektów depolaryzacyjnych uwarunkowanych krzywoliniowością zwierciadeł. Efekty dyfrakcyjne na brzegach zwierciadeł zostały zredukowane przez zastosowanie obszarów ze żłobieniami w okolicach brzegu. Pomiedzy antenami umieszcza się materiał absorbujący niepożądane promieniowanie. Wspornik anteny testowej może być przemieszczany na boki oraz do przodu i tyłu w celu dalszej minimalizacji bezpośredniego sprzężenia pomiędzy antenami.

W celu uzyskania wiarygodnych wyników pomiarów na stanowisku z anteną kompaktową należy spełnić pewne wymagania. Jednym z nich jest odpowiednia jakość wykonania powierzchni zwierciadeł. Nawet małe zaburzenia w geometrii powierzchni odbijających w znaczący sposób wpływają na rozkład amplitudy i fazy pola przy antenie odbiorczej, dlatego też niezwykle ważne jest utrzymanie geometrii powierzchni oraz odchyleń na jak najniższym poziomie.



Rys. 11.7. Stanowisko pomiarowe z anteną kompaktową

Stanowisko pomiarowe z anteną kompaktową powinno być oceniane w podobny sposób jak stanowisko konwencjonalne – przez określenie rozkładu pola. Ponieważ pole przy antenie pomiarowej uzyskuje się przez odbicia od krzywoliniowych zwierciadeł, dlatego należy spodziewać się efektów depolaryzacyjnych. Rozkład pola należy więc mierzyć podczas pomiarów polaryzacyjnych oraz amplitudy i fazy szczególnie, gdy wyniki zależą od charakterystyk polaryzacyjnych źródła promieniowania.

11.1.5. KOMORA CZĘŚCIOWO BEZODBICIOWA (Z PRZEWODZĄCĄ PODŁOGĄ)

Komora częściowo bezodbiciowa różni się od typowej komory bezodbiciowej tym, że z podłogi usunięto materiał absorpcyjny i nieprzewodzący, a umieszczono

płaszczyznę doskonale przewodzącą i odbijającą, która musi wystawać co najmniej 1 m poza obrys badanego urządzenia oraz co najmniej 1 m poza antenę pomiarową na drugim końcu stanowiska.

11.2. OGÓLNE WARUNKI POMIARU

11.2.1. ŹRÓDŁA ZASILANIA

Podczas prowadzenia pomiarów parametry wykorzystywanych źródeł zasilania nie powinny przekraczać wartości granicznych określonych w tabeli 11.1 (rozdz. 5. i 6. zalecenia IEC 510-1 [43]). Amplitudy składowych harmonicznych podano w odniesieniu do amplitudy składowej podstawowej.

Tabela 11.1. Parametry źródła zasilania

Parametr	Wartość dopuszczalna
Napięcie	$\pm 2\%$
Częstotliwość	$\pm 2\%$
Poziom harmonicznych	5%

11.2.2. URZĄDZENIA POMIAROWE

Sprzęt pomiarowy wykorzystywany podczas testu powinien mieć ważny okres kalibracji oraz być stosowany zgodnie z określonymi przez producenta warunkami i procedurami.

1. ANTENA POMIAROWA

Podczas pomiarów emisyjności na stanowisku pomiarowym antena pomiarowa jest stosowana do detekcji pola elektromagnetycznego zarówno od badanego urządzenia, jak i anteny odniesienia. Jeśli stanowisko jest przeznaczone do pomiaru charakterystyk odbiornika, antenę pomiarową stosuje się jako antenę nadawczą. Antenę montuje się na maszcie umożliwiającym jej wykorzystanie zarówno w polaryzacji poziomej, jak i pionowej i na odpowiedniej wysokości nad poziom terenu w zakresie od 1 m do 4 m. Podczas pomiarów na częstotliwościach od 80 MHz do 1 GHz stosuje się dipole symetryczne o długościach rezonansowych. Dla częstotliwości pomiarowych poniżej 80 MHz dipol powinien mieć długość rezonansową odpowiednią dla częstotliwości 80 MHz i powinien być dopasowany do przewodu pomiarowego przez odpowiedni układ dopasowujący i transformujący wyjście z symetrycznego na niesymetryczne. Podczas pomiarów przy częstotliwościach większych niż 1 GHz stosuje się anteny różkowe o znanej charakterystyce zysk–częstotliwość. Antena pomiarowa i ewentualnie związany z nią wzmacniacz powinny cechować się wypadkową charakterystyką amplitudowo-częstotliwościową nie odbiegającą o więcej niż o ± 2 dB od odpó-

wiedniej krzywej kalibracji w całym zakresie częstotliwości pomiarowych. Warunek ten dotyczy jedynie anten pomiarowych stosowanych jako anteny odbiorcze.

2. ANTENA WZORCOWA

Przy stosowaniu metody podstawienia antena wzorcowa zastępuje badane urządzenie. Podczas wykonywania pomiarów przy częstotliwościach nie przekraczających 1 GHz antena wzorcowa powinna być dipolem półfalowym o długości rezonansowej na częstotliwości pomiaru lub krótkim dipolem skalibrowanym do dipola półfalowego. Pomiar na częstotliwościach powyżej 1 GHz wykonuje się przy użyciu kalibrowanej anteny rożkowej. Jej środek powinien znajdować się w środku najmniejszego cylindra mieszczącego badane urządzenie, które zastępuje wzorcowa antena.

3. OBCIĄŻENIE POMIAROWE

Obciążenie pomiarowe dołącza się do wzmacniacza mocy HPA podczas stosowania odpowiednich metod pomiarowych. Obciążenie to powinno umożliwiać absorpcję maksymalnej wytwarzanej przez wzmacniacz mocy, nie promieniując mierzalnych pól. Z tego względu musi ono mieć odpowiedni rozmiar oraz zapewniać odprowadzenie wytwarzanego ciepła.

4. ODBIÓRNIK POMIAROWY – ANALIZATOR WIDMA

Podczas pomiarów poniżej częstotliwości 1 GHz odbiornik pomiarowy musi spełniać następujące wymagania:

- dokładność pomiaru sinusoidalnego sygnału w całym zakresie pomiarowym powinna być nie gorsza niż ± 1 dB,
- detektor quasi-szczytowy musi być stosowany wraz z filtrem o pasmie -6 dB równym 120 kHz,
- podczas pomiarów odbiornik musi pracować więcej niż 1 dB poniżej punktu nasycenia (kompresji).

Podczas pomiarów powyżej częstotliwości 1 GHz analizator widma musi spełniać następujące wymagania:

- dokładność pomiaru sinusoidalnego sygnału w całym zakresie pomiarowym powinna być nie gorsza niż ± 4 dB,
- zapewnić ustawienie czasu przemiatania w zakresie od 0,1 do 10 s,
- filtr rozdzielczości powinien mieć 3 dB pasmo o szerokości 100 kHz, a współczynnik kształtu -60 dB/ -3 dB $\leq 15 : 1$,
- łatwość obserwacji przebiegu przy stosowaniu powyższych czasów przemiatania,
- zapewnić skuteczność ekranowania lepszą niż 60 dB,
- podczas pomiarów analizator widma musi pracować więcej niż 1 dB poniżej punktu nasycenia (kompresji).

5. FILTR WEJŚCIOWY

Zaleca się stosowanie filtra wejściowego (tzw. preselekcyjnego) w celu ochrony obwodów wejściowych analizatora lub miernika selektywnego przed zniszczeniem na skutek przeciążenia spowodowanego silnymi sygnałami wytwarzanymi przez badany nadajnik. Filtr ten nie może obniżać zakresu dynamiki chronionego urządzenia pomiarowego.

6. EKRANOWANIE

Właściwości ekranujące stosowanych urządzeń pomiarowych i łączących je przewodów muszą spełniać wymaganie CISPR 16-1 [13], sekcja pierwsza, rozdział 2.8 dla zakresu częstotliwości, w którym są one stosowane.

11.2.3. BADANE URZĄDZENIE

Badanym urządzeniem jest stacja satelitarna VSAT. Pomiary parametrów tej stacji mogą wymagać użycia specjalistycznej aparatury STE, która musi być dostarczona przez producenta lub użytkownika systemu. Aparatura ta jest dostosowana do potrzeb konkretnego systemu, dlatego nie można podać szczegółowych wymagań, które musi ona spełnić. Ogólne wymagania dla tej aparatury są następujące:

- Specjalistyczna aparatura musi zapewnić symulację sygnału odbieranego przez terminal VSAT z satelity, jeśli terminal ten do transmisji wymaga obecności na wejściu odbiornika modulowanego sygnału satelitarnego. Umożliwi to pracę terminalu VSAT w trybie nadawania (z włączoną nośną) i pomiar odpowiednich parametrów.
- Producent musi podać wszelkie charakterystyki specjalistycznej aparatury, które mogą mieć bezpośredni lub pośredni wpływ na mierzone parametry.

Wszystkie badania wymagające pracy terminalu w trybie nadawania powinny odbywać się z nadajnikiem pracującym z maksymalną mocą i z deklarowaną przez producenta maksymalną szybkością transmisji pakietów. Jeśli badanym urządzeniem jest terminal VSAT z modyfikacjami sprzętowymi lub oprogramowania przystosowującymi go do testów, to producent musi dostarczyć pełną dokumentację dokonanych modyfikacji. Dokumentacja ta musi wykazać, że dokonane zmiany symulują wymagane warunki pomiarowe oraz, że podstawowe charakterystyki pracy terminalu nie uległy zmianie. Anteny nie należy obracać wokół osi głównej wiązki. Wszystkie parametry techniczne i warunki pracy podane przez producenta powinny zostać odnotowane w sprawozdaniu z pomiarów.

11.2.4. WARUNKI OTOCZENIA

Wszystkie pomiary należy wykonać w warunkach otoczenia do jakich części zewnętrzna i domowa badanego urządzenia zostały zaprojektowane i w jakich mają pracować.

Warunki standardowe

W najnowszych wersjach dokumentów ETSI związanych z pomiarami terminali VSAT i SNG zrezygnowano z określenia normalnych warunków pomiarów. Dlatego, jeśli nie ma podanych innych wymagań, to można przyjąć, że przez normalne warunki pomiaru rozumie się warunki podane w tabeli 11.2.

Tabela 11.2. Standardowe warunki otoczenia (nie obowiązują)

Parametr	Dopuszczalny zakres
Temperatura	+15 ÷ +35°C
Wilgotność względna	25÷75%
Ciśnienie powietrza	86÷106 kPa (860÷1060 mbar)

11.2.5. UCHYB POMIARU

W tabeli 11.3 przedstawiono dopuszczalne maksymalne wartości uchybu pomiaru.

Tabela 11.3. Maksymalne dopuszczalne uchyby pomiaru

Rodzaj pomiaru	Uchyb
Częstotliwość radiowa	± 10 kHz
Moc sygnału radiowego	$\pm 0,75$ dB
Zakłócenia przewodzone	± 4 dB
Zakłócenia promieniowane	± 4 dB
Zysk anteny (na osi głównej wiązki) $G_{\max}$	± 2 dB
Dyskryminacja polaryzacji	± 2 dB

Tabela 11.4. Maksymalne dopuszczalne uchyby pomiaru charakterystyki zysku energetycznego anteny

Zysk unormowany do zysku na osi głównej wiązki ($G/G_{\max}$), dB	Uchyb, dB
< -3 dB	$\pm 0,3$
$-3 \div -20$	$\pm 1,0$
$-20 \div -30$	$\pm 2,0$
$-30 \div -40$	$\pm 3,0$

11.2.6. WYNIKI POMIARU I SPRAWOZDANIE Z BADAŃ

Po wykonaniu pomiarów należy sporządzić sprawozdanie z badań zawierające informacje dotyczące warunków otoczenia, warunków pomiaru i wyników. Należy w nim podać uchyb pomiaru każdej mierzonej podczas testu wielkości. Wyznaczony uchyb pomiaru powinien być równy lub mniejszy niż uchyb maksymalny podany w tabelach 11.3 i 11.4. Podsumowanie sprawozdania, którego formę zamieszczono w dodatku A dokumentu ETS 300 456 [36], powinno być włączone do sprawozdania.

W dodatku B dokumentu [36] zamieszczono formularze z pomiarów określonych parametrów. Formularze te należy dołączyć do sprawozdania z badań. Zawierają one minimalną ilość informacji wymaganej do pokazania zgodności ze specyfikacją. Wyniki pomiarów w formie graficznej powinny być dołączone do sprawozdania z odpowiednim formularzem z pomiarów. W sprawozdaniu z pomiarów należy podać deklarowane przez producenta pasmo zajmowane podczas transmisji (ang. *nominated bandwidth*). Do sprawozdania z badań należy dołączyć jedynie formularze z wynikami pomiarów. Jeśli wyniki pomiaru zostały zapisane w innej formie niż opisana, to powinny być one przetworzone do zalecanej postaci.

11.2.7. WYMAGANIA ZWIĄZANE Z BEZPIECZEŃSTWEM

1. BEZPIECZEŃSTWO KONSTRUKCJI MECHANICZNEJ

Wszystkie elementy części zewnętrznej stacji powinny być tak skonstruowane, żeby nie było niebezpieczeństwa zranienia podczas kontaktu z ostrymi brzegami lub

rogami konstrukcji. Bezpieczeństwo konstrukcji sprawdza się, dokładnie oglądając całą konstrukcję z zachowaniem środków ostrożności podczas jej obracania. Każdą podejrzaną krawędź lub element należy opisać w raporcie z testu.

2. ODPORNOŚĆ KONSTRUKCJI NA WIATR

Część zewnętrzna stacji z uwzględnieniem jej elementów strukturalnych stosowanych do mocowania (ale bez innych elementów służących do instalacji stacji) musi być tak skonstruowana, aby wytrzymywała następujące obciążenia mechaniczne:

- ciężar anteny i elementów strukturalnych,
- wiatr.

Obciążenie spowodowane ośnieżeniem lub oblodzeniem stacji nie jest uwzględniane. Przy prędkości wiatru dochodzącej do 180 km/h, w normalnych warunkach atmosferycznych (tj. temperatura 293 K i ciśnienie $1,013 \times 10^5$ Pa) żadna z części stacji nie może zostać porwana przez wiatr. Warunki takie są nazywane warunkami przetrwania. W celu sprawdzenia wymienionych wymagań stosuje się dwa sposoby: atest w tunelu aerodynamicznym oraz analizę numeryczną i test uproszczony.

Metody pomiaru tych parametrów przedstawiono szczegółowo w dokumencie [36]. Ich opis nie jest związany z tematem pracy. Wymagania związane z konstrukcją mechaniczną przedstawiono jedynie w celu zasygnalizowania, że podczas prowadzenia pełnych badań homologacyjnych, oprócz testów stacji związanych z jej właściwościami elektrycznymi i radioelektrycznymi, bardzo istotne jest również sprawdzenie jej konstrukcji mechanicznej.

3. BEZPIECZEŃSTWO ELEKTRYCZNE STACJI

Z punktu widzenia elektrycznego bezpieczeństwa stacja musi spełniać wymagania przedstawione we wstępie oraz pierwszej części normy EN 60950 [23], w której są określone minimalne wymagania dotyczące okablowania, wtyków i zasilania. W normie tej przedstawiono ponadto sposoby badania i weryfikacji urządzenia. Wymagania związane z bezpieczeństwem urządzeń są wymaganiami podstawowymi. Ich spełnienie jest obowiązkowe, pomimo że nie obejmuje ich dokument ETSI.

4. OCHRONA ODGROMOWA

Stacja powinna być wyposażona w środki umożliwiające jej uziemienie za pomocą przewodów o wymiarach podanych w p. 10.2.3 normy EN 50083-1 [21]. Prawidłowy sposób uziemienia stacji należy sprawdzić przez pomiar:

- rozmiarów kontaktów uziemiających,
- rozmiarów wszystkich wymaganych miejsc.

Wyniki uzyskane na podstawie pomiarów należy porównać z wielkościami z tabeli 11.5 w celu sprawdzenia zgodności.

Tabela 11.5. Przekrój przewodu uziemiającego

Materiał	Przekrój, mm ²
Cu	16
Al	25
Fe	50

5. ZABEZPIECZENIE PRZED PROMIENIOWANIEM SŁONECZNYM

W słoneczny dzień promienie słoneczne mogą skupić się w pobliżu promiennika anteny, wywołując bardzo silne nagrzanie i płomień. Gdy istnieje możliwość wystąpienia tego zjawiska, antena musi mieć w widocznym miejscu umieszczone ostrzeżenie. Oznakowanie to dotyczy bezpieczeństwa związanego z eksploatacją stacji.

Wymagania związane z bezpieczeństwem urządzeń są wymaganiami podstawowymi. Ich spełnienie jest obowiązkowe, mimo że nie obejmuje ich dokument ETSI.

11.3. SZCZEGÓŁOWE WARUNKI POMIARU STACJI SATELITARNYCH VSAT ODNOŚNIE WYMAGAŃ RADIOELEKTRYCZNYCH

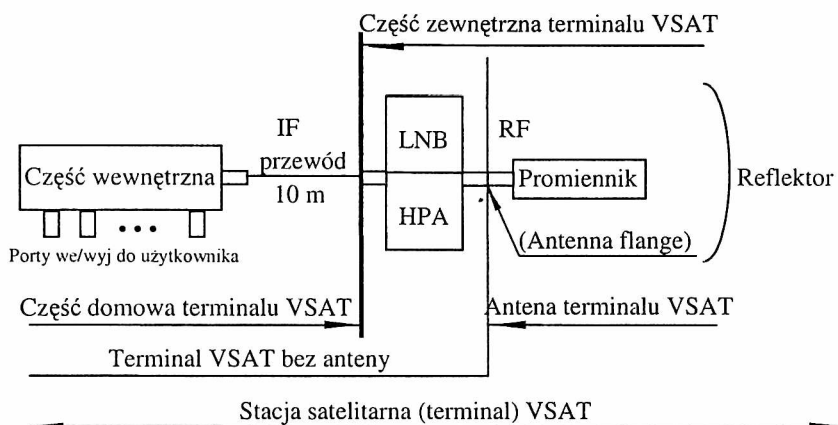
Standardy ETSI [31, 32, 33, 37] narzucają ścisłe ograniczenia na parametry terminali VSAT. Wymagania te dotyczą parametrów radioelektrycznych stacji satelitarnej VSAT w zakresie częstotliwości do 1000 MHz, ujętej w [37], parametrów radioelektrycznych stacji satelitarnej VSAT w zakresie częstotliwości od 1000 MHz do 40 GHz oraz parametrów zaimplementowanego w stacji satelitarnej VSAT systemu nadzoru pracy CCMF. W dalszej części przedstawiono szczegółowo metody i procedury pomiarowe dotyczące parametrów radioelektrycznych wymagających porównania z wartościami dopuszczalnymi zawartymi w odpowiednich normach. Mierzone wielkości dotyczą:

- promieniowania ubocznego w obszarze promieniowania niepożądanego,
- promieniowania ubocznego w obszarze promieniowania pożądanego,
- zastępczej mocy promieniowanej izotropowo *EIRP* w obszarze promieniowania niepożądanego w zakresie częstotliwości pracy terminalu w polaryzacji zamierzonej i ortogonalnej,
- charakterystyki promieniowania anteny nadawczej w polaryzacji zamierzonej i ortogonalnej,
- dyskryminacji polaryzacji anteny nadawczej,
- charakterystyki promieniowania anteny odbiorczej w polaryzacji zamierzonej i ortogonalnej,
- dyskryminacji polaryzacji anteny odbiorczej,
- tłumienia sygnału o częstotliwości nośnej.

11.3.1. PROMIENIOWANIE UBOCZNE W OBSZARZE PROMIENIOWANIA NIEPOŻĄDANEGO

Badanym urządzeniem jest kompletna stacja satelitarna (terminal) VSAT. Stacja ta składa się z części zewnętrznej i domowej, połączonych przewodem o długości 10 m. Badane urządzenie bez anteny składa się z terminalu VSAT z odłączoną częścią promieniującą tj. składa się z części domowej, części zewnętrznej aż do wejścia promien-

nika (ang. *antenna flange*) oraz przewodu o długości 10 m łączącego obie części (rys. 11.8). Terminal VSAT można badać bez anteny tylko wtedy, gdy jego konstrukcja pozwala na jej odłączenie.



Rys. 11.8. Elementy składowe terminalu VSAT: IF – sygnały o częstotliwości pośredniej (p.cz), RF – sygnały o częstotliwości radiowej (w.cz), LNB – blok niskoszumny złożony z konwertera częstotliwości i niskoszumnego wzmacniacza, HPA – wzmacniacz mocy

Typ przewodu łączącego część domową z częścią zewnętrzną musi spełniać zalecenia producenta stacji satelitarnej VSAT i być odnotowany w raporcie z testu. Porty wejścia i wyjścia użytkownika muszą być obciążone dopasowaną impedancją. Producent stacji satelitarnej VSAT może zalecić w dokumentacji technicznej podłączenie do tych portów określonych urządzeń.

Dla częstotliwości pomiarowych poniżej 80 MHz należy stosować dipol symetryczny o długości rezonansowej odpowiadającej częstotliwości 80 MHz dopasowany impedancyjnie do przewodu pomiarowego przez odpowiedni układ dopasowujący i transformujący wyjście z symetrycznego na niesymetryczne. Dopuszcza się wykonanie pomiaru przy użyciu anteny szerokopasmowej, jeśli wcześniej stanowisko pomiarowe zostało skalibrowane zgodnie z zaleceniem CISPR 16-1 [13].

Podczas pomiarów na częstotliwościach od 80 MHz do 1000 MHz stosuje się dipole symetryczne o długościach rezonansowych. Dopuszcza się wykonanie pomiaru przy użyciu anteny szerokopasmowej, jeśli wcześniej stanowisko pomiarowe zostało skalibrowane zgodnie z zaleceniem CISPR 16-1 [13].

Podczas pomiarów przy częstotliwościach większych niż 1000 MHz stosuje się anteny rożkowe o znanej charakterystyce zysk–częstotliwość. Antena pomiarowa i ewentualnie związany z nią wzmacniacz powinny cechować się wypadkową charakterystyką amplitudowo–częstotliwościową nie odbiegającą o więcej niż o ± 2 dB od odpowiedniej krzywej kalibracji w całym zakresie częstotliwości pomiarowych. Warunek ten dotyczy jedynie anten pomiarowych stosowanych jako anteny odbiorcze.

Antena powinna być zainstalowana w sposób zapewniający jej użycie w polaryzacji poziomej i pionowej i na określonej wysokości.

Testy dla nadawczych terminali VSAT należy ograniczyć jedynie do pomiarów podczas nadawania (z włączoną nośną).

1. STANOWISKO POMIAROWE I APARATURA STOSOWANA W ZAKRESIE CZĘSTOTLIWOŚCI DO 1000 MHz

Pomiary w tym zakresie częstotliwości należy wykonywać na stanowisku w otwartej przestrzeni, stanowisku w komorze częściowo bezodbićowej lub w komorze bezodbićowej. Stanowiska te przedstawiono w p. 11.1. Odległość pomiarowa pomiędzy badanym urządzeniem i anteną pomiarową wynosi 10 m. Pomiary można wykonać przy innej odległości. Ich wyniki muszą być jednak przeliczone do odległości 10 m, w celu porównania z poziomami dopuszczalnymi. Przy przeliczeniu należy korzystać z zależności (11.3) (odległość odniesienia $R_0 = 10$ m). Szczególną uwagę należy zachować podczas pomiarów terminali VSAT z odległości 3 m przy częstotliwościach bliskich 30 MHz ze względu na zjawiska związane z występowaniem strefy bliskiej promieniowania. Szczególnie jest to istotne wówczas, gdy terminal VSAT ma duże rozmiary.

Odbiornik pomiarowy musi spełniać wymagania przedstawione w p. 11.2.2.

2. PROCEDURA POMIAROWA W ZAKRESIE CZĘSTOTLIWOŚCI DO 1000 MHz

Procedurę pomiarową można przedstawić w punktach.

a) badanym urządzeniem jest terminal VSAT; terminal ten można testować wraz z anteną, preferuje się jednak pomiar bez anteny z wejściem antenowym dołączonym do niepromieniującego obciążenia;

b) terminal VSAT należy testować w stanie nadawania (z włączoną nośną);

c) terminal należy obrócić o kąt 360° (z wyjątkiem stanowiska w komorze bezodbićowej), jednocześnie zmieniając wysokość anteny pomiarowej w zakresie od 1 do 4 m;

d) należy zmierzyć wartości wszystkich znalezionych sygnałów promieniowania ubocznego i zanotować dla nich częstotliwość i poziom.

3. STANOWISKO POMIAROWE I APARATURA STOSOWANA W ZAKRESIE CZĘSTOTLIWOŚCI POWYŻEJ 1000 MHz

Analizator widma stosowany podczas pomiarów musi spełniać wymagania zawarte w p. 11.2.2. Szerokość filtra rozdzielczości należy wybrać zgodnie z wymaganą szerokością pasma pomiarowego. Jeśli jest to niemożliwe, należy wybrać szerokość filtra jak najbliższą szerokości pasma pomiarowego, a następnie przeliczyć poziomy sygnałów promieniowania ubocznego o charakterze szerokopasmowych sygnałów szumopodobnych do szerokości wymaganego pasma pomiarowego.

Dla terminalu VSAT z anteną badanie należy wykonać w dwóch etapach dla obu stanów pracy (stanu pracy z włączoną i z wyłączonej nośną):

1. Wyszukanie częstotliwości, na których odbywa się promieniowanie uboczne.

2. Pomiar poziomów promieniowania ubocznego na wyszukanych częstotliwościach.

Dla terminalu VSAT bez anteny badanie należy wykonać w trzech etapach dla obu stanów pracy (stanu pracy z włączoną i z wyłączonej nośną):

1. Wyszukanie częstotliwości, na których odbywa się promieniowanie uboczne.
2. Pomiar poziomów promieniowania ubocznego na wyszukanych częstotliwościach.

3. Pomiar promieniowania ubocznego emitowanego przez antenę.

4. WYSZUKANIE CZĘSTOTLIWOŚCI, NA KTÓRYCH ODBYWA SIĘ PROMIENIOWANIE UBOCZNE (ETAP 1.)

Częstotliwości, na których odbywa się promieniowanie uboczne należy szukać: w komorze bezodbiciowej, na stanowisku w otwartej przestrzeni lub w komorze częściowo bezodbiciowej. Antena pomiarowa powinna być zainstalowana blisko badanego urządzenia na wysokości odpowiadającej wysokości środka objętości badanego urządzenia.

Metoda pomiaru jest następująca:

a) badane urządzenie powinno pracować z wyłączoną nośną (odbiorczy terminal VSAT powinien znajdować się w normalnym trybie pracy);

b) kąt elewacji głównej wiązki promieniowania anteny powinien być równy 7° . Jeśli badane urządzenie jest bez anteny, to wyjście antenowe należy połączyć z niepromieniującym obciążeniem;

c) odbiornik pomiarowy powinien przemiatać analizowane pasmo podczas obracania badanego urządzenia;

d) badane urządzenie obracać o kąt 360° , a wszystkie zauważone promieniowania uboczne odnotować w celu dalszego badania;

e) te same pomiary wykonać z anteną pomiarową ustawioną w odwrotnej (ortogonalnej) polaryzacji;

f) dla terminali nadawczych VSAT wszystkie pomiary powtórzyć podczas pracy terminalu z jedną modulowaną nośną nadawaną z maksymalną mocą.

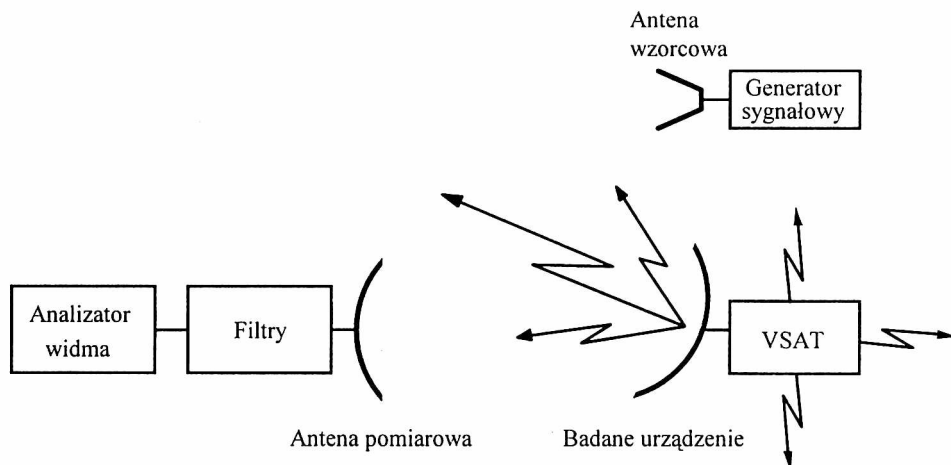
5. POMIAR POZIOMÓW PROMIENIOWANIA UBOCZNEGO NA WYSZUKANYCH CZĘSTOTLIWOŚCIACH (ETAP 2.)

Pomiar poziomów sygnałów emitowanych przez badane urządzenie na częstotliwościach wyszukanych w etapie 1. musi być prowadzony na stanowisku pomiarowym, na którym nie ma obiektów odbijających promieniowanie, czyli na stanowisku w otwartej przestrzeni, w komorze częściowo bezodbiciowej lub komorze bezodbiciowej.

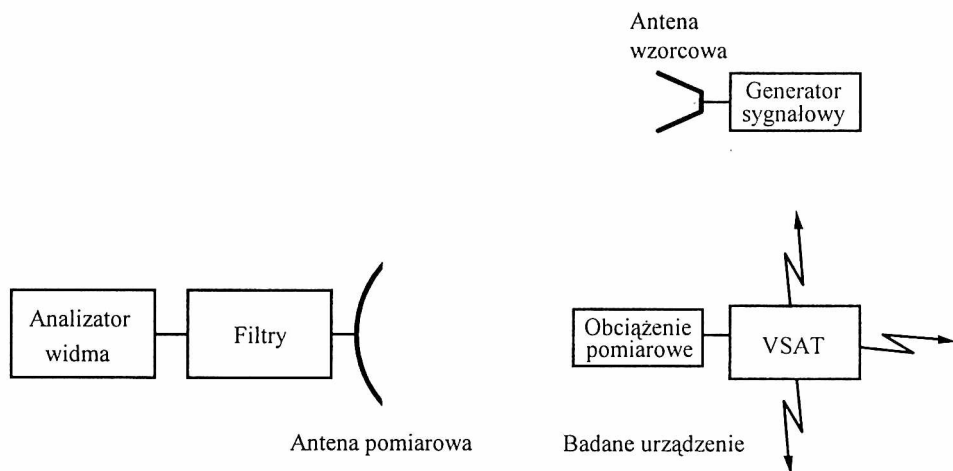
Procedurę pomiaru wygodnie jest przedstawić w kolejnych krokach.

Krok 1. Zestawić stanowisko pomiarowe pokazane na rysunkach 11.9 lub 11.10.

Krok 2. Badane urządzenie umieścić w taki sposób, by jego części były od siebie odległe o około $1 \div 2$ m, część domowa terminalu umieszczona na stole obrotowym na wysokości od 0,5 m do 1 m, a zewnętrzna na ziemi. Przewody połączeniowe należy umieścić za pomocą niemetalicznych podpór na wysokości $0,5 \div 1$ m. Na stanowisku pomiarowym pokazanym na rysunku 11.9 kąt elewacji głównej wiązki promieniowania anteny musi być równy 7° , a antena skierowana z dala od orbity geostacjonarnej lub osłonięta od strony orbity geostacjonarnej panelem absorpcyjnym. Anteny o optymalizowanej charakterystyce promieniowania do współpracy z satelitami geostacjonarnymi muszą być ustawione w taki sposób, by płaszczyzna zawierająca szerzy przekrój głównej wiązki była prostopadła do orbity geostacjonarnej.



Rys. 11.9. Stanowisko do pomiaru promieniowania ubocznego przy częstotliwości powyżej 1 GHz dla terminalu VSAT z anteną



Rys. 11.10. Stanowisko do pomiaru promieniowania ubocznego przy częstotliwości powyżej 1 GHz dla terminalu VSAT bez anteny

Krok 3. Antenę pomiarową umieścić w odległości od badanego urządzenia odpowiedniej dla danego stanowiska pomiarowego (np. 3, 5, 10 m). Badane urządzenie należy obracać i jednocześnie dobrać tak wysokość anteny, aby uzyskać maksymalne wskazanie na dołączonym do niej analizatorze widma dla każdej wcześniej wyszukanej częstotliwości. W komorze bezodbiciowej nie należy zmieniać wysokości anteny pomiarowej. Należy uważać, by antena pomiarowa nigdy nie znalazła się w stożku o rozwartości 7° wokół osi głównej wiązki anteny badanego urządzenia. Wskazania te należy zanotować.

Krok 4. Pomiary powtórzyć przy antenie pomiarowej ustawionej w przeciwnej polaryzacji. Wyniki również zanotować.

Krok 5. Badane urządzenie zastąpić anteną wzorcową dołączoną do generatora sygnałowego. Skierować osie głównych wiązek anteny pomiarowej i wzorcowej na siebie.

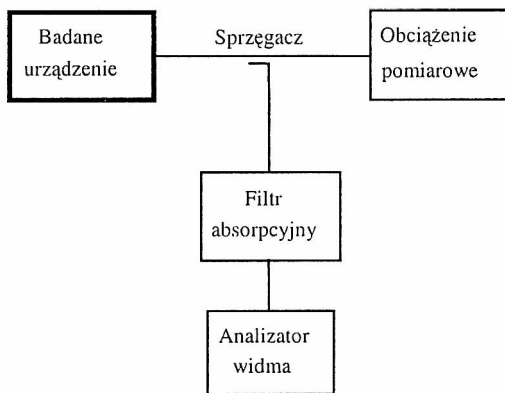
Krok 6. Antena wzorcowa i pomiarowa powinny być dopasowane do polaryzacji, przy której uzyskano maksymalne wskazania w trakcie pomiaru badanego urządzenia za pomocą anteny pomiarowej.

Krok 7. Moc wyjściową generatora należy tak ustawić, aby uzyskać wskazanie identyczne do wcześniej zanotowanego maksymalnego wskazania.

Krok 8. Zanotować moc wyjściową generatora. Poziom *EIRP* promieniowania ubocznego jest sumą w mierze logarytmicznej (dB) mocy wyjściowej generatora i zysku anteny wzorcowej (w stosunku do anteny izotropowej) minus tłumienie przewodu łączącego generator z anteną wzorcową.

6. POMIAR PROMIENIOWANIA UBOCZNEGO EMITOWANEGO PRZEZ ANTENĘ (ETAP 3.)

Dla tego typu pomiarów nie określa się specyficznych wymagań dotyczących stanowiska pomiarowego. Pomiaru dokonuje się w układzie pomiarowym pokazanym na rysunku 11.11.



Rys. 11.11. Stanowisko do pomiaru promieniowania ubocznego powyżej częstotliwości odcięcia

Procedurę pomiaru przedstawiono w kolejnych krokach.

Krok 1. Zestawić stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 11.11. Filtr absorpcyjny zabezpiecza analizator widma przed przeciążeniem wejścia i umożliwia uzyskanie wymaganej dokładności pomiaru, szczególnie w pobliżu częstotliwości nośnej. Filtr ten powinien być dostrojony do częstotliwości nośnej terminalu VSAT.

Krok 2. Pomiary należy prowadzić w zakresie od częstotliwości odcięcia falowodu badanego urządzenia do 40 GHz. Terminale nadawcze muszą pracować podczas pomiaru z maksymalną mocą i typową modulacją.

Krok 3. W celu wyznaczenia poziomu promieniowania ubocznego emitowanego poprzez antenę należy dodać zmierzony na częstotliwości wyszukanego promieniowania ubocznego, dla kątów większych niż 7° , maksymalny zysk anteny do wyniku

pomiaru gęstości mocy wraz z uwzględnieniem niezbędnych współczynników korekcyjnych i kalibracji. Jeśli producent się zgodzi, to można uwzględnić najgorszy przypadek (tj. zysk 8 dBi dla kątów większych niż 7°) zamiast zmierzonego maksymalnego zysku dla częstotliwości równej częstotliwości wyszukanego sygnału niepożądanego.

Krok 4. Powtórzyć pomiar przy wyłączonej nośnej dla terminali nadawczych.

7. WYMAGANIA CO DO PROMIENIOWANIA UBOCZNEGO W OBSZARZE PROMIENIOWANIA NIEPOŻĄDANEGO

Uzyskane w wyniku badań wyniki należy porównać z wartościami dopuszczalnymi.

1. W zakresie częstotliwości od 30 do 1000 MHz emisyjność terminalu VSAT nie powinna przekraczać poziomów granicznych określonych w tabeli 11.6.

Tabela 11.6. Dopuszczalne poziomy emisyjności terminalu VSAT
w zakresie częstotliwości od 30 MHz do 1000 MHz

Zakres częstotliwości, MHz	Poziom dopuszczalny (Quasi-peak), dB(μ V/m)
30÷230	30
230÷1000	37

Dla częstotliwości 230 MHz obowiązuje wartość dopuszczalna 30 dB(μ V/m).

2. Jeśli terminal VSAT znajduje się w stanie pracy, w którym nie może nadawać, to zastępcza moc promieniowana izotropowo *EIRP* promieniowania ubocznego w pasmie 100 kHz nie może przekroczyć wartości podanych w tabeli 11.7 dla obszaru promieniowania niepożądanego (dla kątów o osi głównej wiązki większych niż 7°).

Tabela 11.7. Dopuszczalne poziomy promieniowania ubocznego
w zakresie częstotliwości od 1 GHz do 40 GHz (nadawanie wyłączone)

Zakres częstotliwości, GHz	Poziom dopuszczalny, dB(pW)
1÷10,7 GHz	48
10,7÷21,2 GHz	54
21,2÷40,0 GHz	60

3. Wartości podane w tabeli 11.8. obowiązują jedynie poza pasmem zajmowanym przez sygnał pożądaný. Dla stanu pracy terminalu z wyłączoną i włączoną nośną *EIRP* promieniowania ubocznego w pasmie 100 kHz nie może przekroczyć wartości podanych w tabeli 11.8 w obszarze promieniowania niepożądanego (dla kątów o osi głównej wiązki większych niż 7°).

Tabela 11.8. Dopuszczalne poziomy promieniowania ubocznego
w zakresie częstotliwości od 1 do 40 GHz (włączona nośna)

Zakres częstotliwości, GHz	Poziom dopuszczalny, dB(pW)
1÷3,4	49
3,4÷10,7	55
10,7÷21,2	61
21,2÷40,0	67

W razie wystąpienia w pasmie $13,6 \div 14,9$ GHz jednego lub więcej sygnałów silniejszych niż 61 dB(pW), należy ich moce zsumować w watach i porównać z poziomem dopuszczalnym 78 dB(pW). W przypadku wystąpienia w pasmie $28,0 \div 29,0$ GHz jednego lub więcej sygnałów przekraczających poziom dopuszczalny 67 dB(pW), należy ich moce zsumować w watach i porównać z poziomem dopuszczalnym 78 dB(pW). Pasmo pomiarowe w obu tych przypadkach wynosi 20 MHz.

11.3.2. PROMIENIOWANIE UBOCZNE W OBSZARZE PROMIENIOWANIA POŻĄDANEGO

1. STANOWISKO POMIAROWE

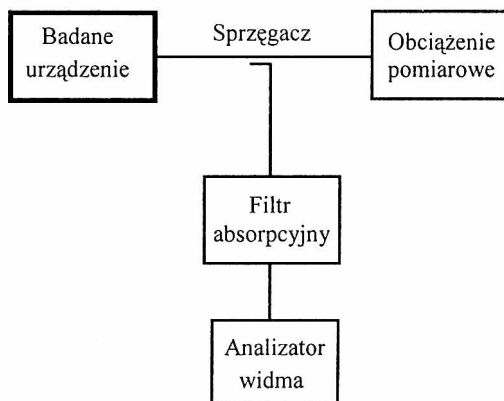
Dla tego typu pomiarów nie określa się specyficznych wymagań dotyczących stanowiska pomiarowego.

2. METODA POMIARU – WYMAGANIA OGÓLNE

Jeśli badany terminal VSAT nie umożliwia odłączenia anteny lub na odłączenie jej nie zgadza się producent, to badania należy prowadzić z dołączoną anteną. Jeśli natomiast badany terminal VSAT umożliwia odłączenie anteny i producent wyraża na to zgodę, to pomiary należy wykonać na wejściu anteny.

3. METODA POMIARU NA WEJŚCIU ANTENY

Pomiaru dokonuje się w układzie pomiarowym pokazanym na rysunku 11.12.



Rys. 11.12. Stanowisko do pomiaru promieniowania ubocznego na wejściu anteny

Procedurę pomiaru przedstawiono w kolejnych krokach.

Krok 1. Zestawić stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 11.12. Filtr absorpcyjny zabezpiecza analizator widma przed przeciążeniem wejścia i umożliwia uzyskanie wymaganej dokładności pomiaru, szczególnie w pobliżu częstotliwości nośnej. Filtr ten powinien być dostrojony do częstotliwości nośnej terminalu VSAT.

Krok 2. Terminal VSAT musi nadawać jedną modulowaną nośną w sposób ciągły lub z maksymalną szybkością transmisji pakietów na częstotliwości nośnej najbliższej dolnej granicy pasma pracy systemu. Terminal musi pracować z maksymalną mocą. Analizowane jest pasmo częstotliwości od 14,00 GHz do 14,50 GHz.

Krok 3. Z uwagi na bliskość nośnej szerokość pomiarowa RBW analizatora widma powinna być równa 3 kHz lub najbliższa tej wartości. Jeśli szerokość filtru pomiarowego RBW jest inna niż zalecana, to dla szumopodobnych szerokopasmowych sygnałów wyniki pomiarów należy odpowiednio skorygować.

Krok 4. Poziom *EIRP* promieniowania ubocznego określa się na podstawie uzyskanych wyników pomiarów, do których dodaje się zysk anteny VSAT odniesiony do anteny izotropowej oraz odpowiednie poprawki korekcyjne i kalibracyjne. Zysk energetyczny anteny musi być zmierzony na częstotliwości najbliższej w stosunku do częstotliwości sygnału promieniowania ubocznego. Metodę pomiarową przedstawiono w p. 11.3.3.

Krok 5. Pomiary należy powtórzyć przy częstotliwości nośnej terminalu VSAT równej częstotliwości środkowej pasma pracy systemu.

Krok 6. Pomiary należy powtórzyć przy częstotliwości nośnej terminalu VSAT równej nośnej najbliższej górnej granicy pasma pracy systemu.

Krok 7. Pomiary należy powtórzyć dla terminalu VSAT pracującego z wyłączoną nośną.

(Podczas wykonywania tych pomiarów można również zmierzyć poziomy sygnałów w nominalnym pasmie pracy terminalu. Wyniki te wykorzystane zostaną w następnym podrozdziale do określenia poziomu promieniowania ubocznego w pasmie nominalnym).

Krok 8. Pomiary należy powtórzyć dla terminalu VSAT pracującego w trybie, w którym nadawanie nie jest dozwolone (ang. *transmission disabled state*).

4. METODA POMIARU Z ANTENĄ WZORCOWĄ

Jeżeli konstrukcja terminalu VSAT uniemożliwia pomiar na wejściu anteny lub producent nie wyraził zgody na tego typu pomiary, to terminal VSAT należy badać wraz z anteną. Stanowisko pomiarowe pokazano na rysunku 11.13.

Procedurę pomiaru przedstawiono w kolejnych krokach.

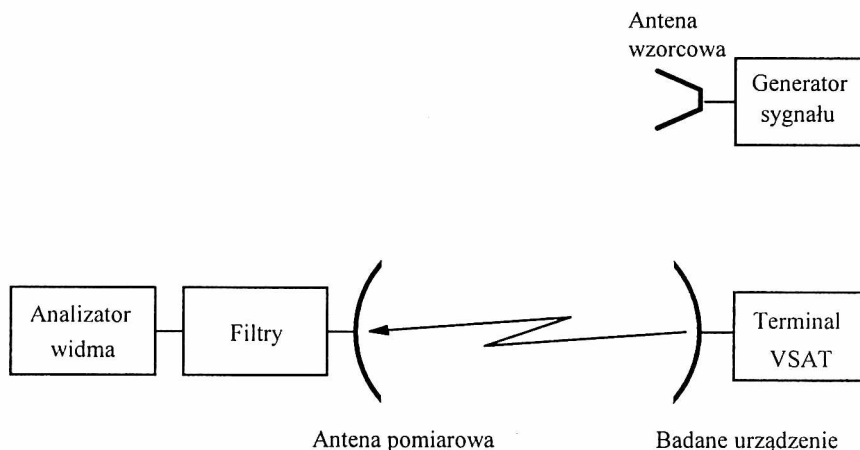
Krok 1. Zestawić stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 11.13.

Krok 2. Badane urządzenie umieścić w taki sposób, by jego części były od siebie oddalone o około 1 ± 2 m. Część domową terminalu umieścić na stole obrotowym na wysokości od 0,5 do 1 m. Przewody połączeniowe należy umieścić za pomocą niemetalicznych podpór na wysokości $0,5 \pm 1$ m.

Krok 3. Pasma pomiarowe analizatora widma RBW ustawić zgodnie z wymaganą szerokością lub ustawić najbliższą dostępną wartość. Jeśli szerokość filtru pomiarowego RBW jest inna niż wymagana, to dla szumopodobnych szerokopasmowych sygnałów wyniki pomiarów należy odpowiednio skorygować.

Krok 4. Terminal VSAT musi nadawać jedną modulowaną nośną w sposób ciągły lub z maksymalną szybkością transmisji pakietów na częstotliwości nośnej najbliższej

dolnej granicy pasma pracy systemu. Terminal musi pracować z maksymalną mocą. W analizowanym pasmie częstotliwości od 14,00 do 14,50 GHz należy odnotować częstotliwości wszystkich sygnałów promieniowania ubocznego.



Rys. 11.13. Stanowisko do pomiaru promieniowania ubocznego terminalu VSAT wraz z anteną

Krok 5. Z uwagi na bliskość nośnej szerokość pomiarowa analizatora widma RBW powinna być równa 3 kHz lub najbliższa tej wartości. Jeśli szerokość filtra pomiarowego RBW jest inna niż zalecana, to dla szumopodobnych szerokopasmowych sygnałów wyniki pomiarów należy odpowiednio skorygować.

Krok 6. Antenę pomiarową umieścić w odległości odpowiedniej dla danego stanowiska pomiarowego (np. 3, 5, 10 m) od badanego urządzenia i skierować w stronę badanego urządzenia. Badane urządzenie należy obracać i jednocześnie dobrać tak wysokość anteny, aby uzyskać maksymalne wskazanie na dołączonym do niej analizatorze widma dla każdej wcześniej wyszukanej częstotliwości. W komorze bezodbićowej nie należy zmieniać wysokości anteny pomiarowej.

Krok 7. Badane urządzenie zastąpić anteną wzorcową dołączoną do generatora sygnałowego. Skierować osie głównych wiązek anteny pomiarowej i wzorcowej na siebie. Odległość pomiędzy antenami musi być taka sama jak pomiędzy anteną pomiarową i badanym urządzeniem (jak w kroku 6.).

Krok 8. Antena wzorcowa i pomiarowa powinny być dopasowane do polaryzacji, przy której uzyskano maksymalne wskazania w trakcie pomiaru badanego urządzenia za pomocą anteny pomiarowej.

Krok 9. Moc wyjściową generatora należy tak ustawić, aby uzyskać wskazanie identyczne do wcześniej zanotowanego maksymalnego wskazania.

Krok 10. Zanotować moc wyjściową generatora. Poziom *EIRP* promieniowania ubocznego jest sumą w mierze logarytmicznej (dB) mocy wyjściowej generatora i zysku anteny wzorcowej (w stosunku do anteny izotropowej) minus tłumienie przewodu łączącego generator z anteną wzorcową.

Krok 11. Pomiary należy powtórzyć (od kroku 4. do 10.) przy częstotliwości nośnej terminalu VSAT równej częstotliwości środkowej pasma pracy systemu.

Krok 12. Pomiary należy powtórzyć (od kroku 4. do 10.) przy częstotliwości nośnej terminalu VSAT równej nośnej najbliższej górnej granicy pasma pracy systemu.

Krok 13. Pomiary należy powtórzyć dla terminalu VSAT pracującego z wyłączoną nośną.

Krok 14. Pomiary należy powtórzyć dla terminalu VSAT pracującego w trybie, w którym nadawanie nie jest dozwolone (*transmission disabled state*).

5. WYMAGANIA DOTYCZĄCE PROMIENIOWANIA UBOCZNEGO W OBSZARZE PROMIENIOWANIA POŻĄDANEGO

1. Terminal VSAT z włączoną nośną

Wymaga się, aby w zakresie częstotliwości od 14,0 do 14,5 GHz zastępcza moc promieniowana izotropowo *EIRP* poza pasmem nadawczym (*outside nominated bandwidth*), w pasmie pomiarowym 100 kHz nie przekraczała poziomu dopuszczalnego określonego wzorem

$$4-10 \log N \text{ dB(W)}.$$

W pasmie pięciokrotnie szerszym od pasma zajmowanego przez transmisję i symetrycznym względem częstotliwości nośnej zastępcza moc promieniowana izotropowo *EIRP* poza pasmem nadawczym, w pasmie pomiarowym 100 kHz nie może przekroczyć poziomu

$$18-10 \log N \text{ dB(W)}.$$

N określa maksymalną liczbę terminali VSAT, które mogą jednocześnie nadawać na tej samej częstotliwości. Liczba ta nie może być przekraczana przez więcej niż 0,01% czasu. Wartość N oraz warunki pracy systemu określa producent.

Wymienione wcześniej poziomy dopuszczalne dotyczą terminalu VSAT pracującego jednocześnie tylko z jedną nośną, nawet jeśli jego budowa umożliwia jednoczesną transmisję wielu nośnych.

2. Terminal VSAT z wyłączoną nośną lub w stanie, kiedy nadawanie nie jest dozwolone

Wymaga się, aby w zakresie częstotliwości od 14,0 do 14,5 GHz zastępcza moc promieniowana izotropowo *EIRP* promieniowania ubocznego w pasmie pomiarowym 100 kHz nie przekraczała wartości -21 dB(W) .

11.3.3. ZASTĘPCZA MOC PROMIENIOWANA IZOTROPOWO W OBSZARZE PROMIENIOWANIA NIEPOŻĄDANEGO

Zastępczą moc promieniowaną izotropowo w obszarze promieniowania niepożądanego mierzy się jedynie dla nadawczych i nadawczo-odbiorczych terminali VSAT.

Wyznacza się ją w pasmie nadawczym, stosując pasmo pomiarowe o szerokości 40 kHz w każdej płaszczyźnie polaryzacyjnej anteny.

W celu pomiaru parametrów elektrycznych anteny czasem zachodzi potrzeba rozłączenia wyjścia części zewnętrznej terminalu VSAT z wejściem anteny oraz dołączenie do wejścia anteny odpowiedniego falowodu lub adaptera umożliwiającego podłączenie aparatury pomiarowej. Użyty falowód lub adapter muszą być skalibrowane.

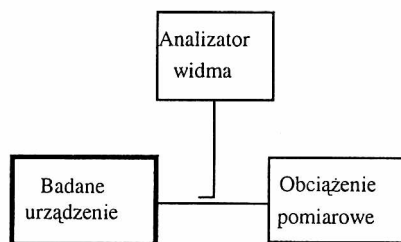
Ponieważ system nadzoru terminalu VSAT uniemożliwia jego pracę w trybie nadawania, jeśli odbiornik terminalu nie odbiera odpowiednich sygnałów, niezbędne jest zatem zablokowanie systemu nadzoru terminalu zgodnie z instrukcją producenta i wymuszenie jego pracy w trybie nadawania lub zastosowanie symulatora sygnału sterującego (symulatora stacji centralnej) symulującego działanie systemu monitorowania i nadzoru sieci NCM lub jego emulatora generującego odpowiednie sygnały sterujące.

Pomiaru dokonuje się w zakresie częstotliwości od 14,0 do 14,5 GHz. Do określenia zastępczej mocy promieniowanej izotropowo w obszarze promieniowania niepożądanego niezbędna jest znajomość mocy wyjściowej nadajnika, zysku energetycznego anteny oraz charakterystyki promieniowania anteny podczas nadawania. Dlatego też należy przeprowadzić następujące pomiary:

- a) pomiar mocy wyjściowej nadajnika, $\text{dB(W)}/40 \text{ kHz}$,
- b) pomiar zysku anteny podczas nadawania, dBi ,
- c) pomiar charakterystyki promieniowania anteny podczas nadawania, dB .

1. POMIAR MOCY WYJŚCIOWEJ NADAJNIKA

Moc wyjściowa nadajnika to maksymalna moc oddawana przez nadajnik i mierzona na wejściu anteny. Dla celów tego testu badane urządzenie składa się z domowej części terminalu oraz elementów części zewnętrznej do wejścia anteny. Nie ma żadnych dodatkowych wymagań w stosunku do organizacji stanowiska pomiarowego. Powinno ono wyglądać jak na rysunku 11.14.



Rys. 11.14. Pomiar mocy wyjściowej nadajnika

Moc wyjściową nadajnika mierzymy po podłączeniu badanego urządzenia do obciążenia pomiarowego. Następnie na wejściu anteny należy zmierzyć moc nośnej ($\text{dB(W)}/40 \text{ kHz}$) modulowanej pseudolosowym ciągiem bitów, biorąc pod uwagę współczynnik sprzężenia sprzęgacza pomiarowego na zadanej częstotliwości oraz tłumienie zastosowanego jako adaptera falowodu. Pasma pomiarowe analizatora widma należy wybrać najbliższe wymaganemu pasmu. Jeśli różni się ono od wymaganego pasma, to należy uwzględnić odpowiednie poprawki.

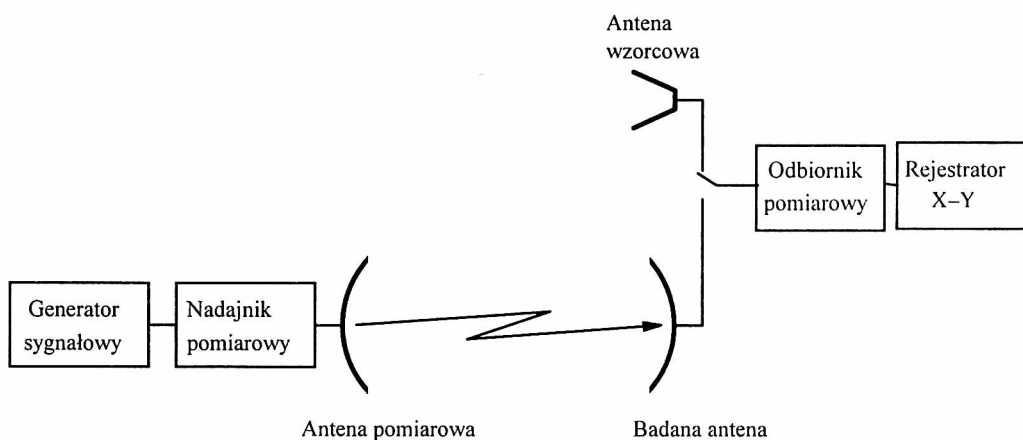
2. POMIAR ZYSKU ENERGETYCZNEGO ANTENY

Zysk energetyczny anteny jest określany jako stosunek mocy (wyrażony w dBi), jaką należy doprowadzić do anteny izotropowej w wolnej przestrzeni do mocy dostarczanej do mierzonej anteny, aby uzyskać takie samo natężenie pola elektromagnetycznego w tej samej odległości i w tym samym kierunku. Jeśli nie zdefiniowano dodatkowych warunków, to zysk dotyczy kierunku maksymalnego promieniowania.

Dla zadanej częstotliwości zyski anteny przy nadawaniu i odbiorze są identyczne.

Badanym urządzeniem jest antena z wyróżnionym portem wejściowym. W jej skład wchodzi reflektor, promiennik, konstrukcja mocująca oraz obudowa promiennika znajdująca się w ognisku anteny (inne elementy elektryczne mieszczące się w tej obudowie nie muszą być zainstalowane).

Antenę należy testować na stanowisku pomiarowym w wolnej przestrzeni w polu dalekim lub na stanowisku stosującym antenę kompaktową. Dopuszcza się również pośrednią metodę pomiaru zysku przez pomiar pola elektromagnetycznego w polu bliskim z wykorzystaniem systemu skanującego. Należy jednak w tym przypadku wykazać, że zastosowana metoda daje takie same wyniki, jak metoda stosowana na stanowisku pomiarowym w wolnej przestrzeni w polu dalekim lub na stanowisku stosującym antenę kompaktową. W przypadku w pełni zautomatyzowanych systemów pomiarowych uchyb pomiaru musi być taki sam jak we wcześniej wymienionych metodach.



Rys. 11.15. Stanowisko do pomiaru zysku energetycznego anteny

Procedurę pomiarową wygodnie jest przedstawić w kolejnych krokach.

Krok 1. Zestawić stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 11.15. Badaną antenę podłączyć do miernika. Serwomechanizm obracający antenę podłączyć do wejścia X rejestratora, poziom sygnału z miernika natomiast do wejścia Y rejestratora.

Krok 2. Sygnał pomiarowy o częstotliwości 14,250 GHz nadawać z nadajnika poprzez antenę pomiarową. Antenę pomiarową ustawić tak, by płaszczyzna wektora pola

elektrycznego E była pionowa, a ponadto obie anteny ustawić tak, by osie głównych wiązek leżały na jednej prostej. Polaryzator badanej anteny dopasować do polaryzacji anteny pomiarowej.

Krok 3. Badaną antenę ustawić tak, by na rejestratorze uzyskać maksymalne wychylenie wskazań. Rejestrator ustawić w taki sposób, by wychylenie to odpowiadało maksymalnej wartości oznaczonej na wykresie.

Krok 4. Mierzoną antenę obracać w azymucie w jednym kierunku do 10° . Położenie to jest wyjściowym położeniem dalszych pomiarów.

Krok 5. Wykres charakterystyki zysku uzyskuje się przez obrót anteny w azymucie od położenia wyjściowego. Antenę należy obracać w przeciwnym do poprzedniego kierunku tak, by przejść przez oś wiązki i dojść do azymutu 10° po drugiej stronie osi wiązki. W czasie obrotu wyniki należy zapisywać na rejestratorze.

Krok 6. Badaną antenę zastąpić anteną wzorcową. Zmierzyć największy poziom odbieranego sygnału.

Krok 7. Poziom ten zaznaczyć na rejestratorze.

Krok 8. Antenę wzorcową obracać jak poprzednio.

Krok 9. Zysk badanej anteny można obliczyć z wzoru

$$G_{EUT} = L_1 - L_2 + C,$$

w którym:

G_{EUT} – zysk badanej anteny, dBi,

L_1 – poziom sygnału z badanej anteny, dB,

L_2 – poziom sygnału z anteny wzorcowej, dB,

C – zysk anteny wzorcowej przy częstotliwości pomiaru, dBi.

Krok 10. Pomiary dla polaryzacji zamierzonej (od kroku 3. do 9.) powtórzyć dla częstotliwości 14,005 GHz.

Krok 11. Pomiary dla polaryzacji zamierzonej (od kroku 3. do 9.) powtórzyć dla częstotliwości 14,495 GHz.

Krok 12. Pomiary w krokach od 2. do 11. można wykonywać jednocześnie.

Krok 13. Pomiary wykonać dla wszystkich częstotliwości w płaszczyźnie polaryzacji ortogonalnej (płaszczyźnie wektora H) i w dwóch płaszczyznach nachylonych pod kątem 45° do tych polaryzacji (brak tego punktu w *Wymaganiach technicznych* prTBR 028).

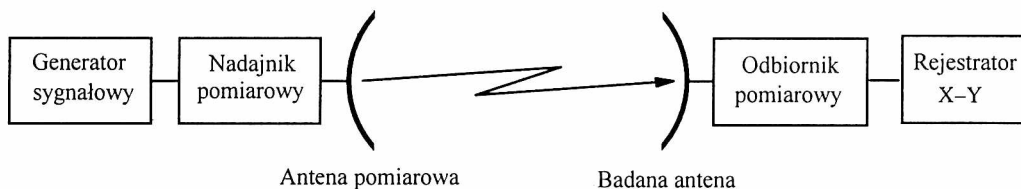
3. POMIAR CHARAKTERYSTYK PROMIENIOWANIA ANTENY

Charakterystyka promieniowania anteny podczas nadawania jest określona przebiegiem natężenia pola w funkcji kąta wycelowania anteny. Pomiar sygnału musi odbywać się odpowiednio daleko.

Badanym urządzeniem jest antena z wyróżnionym portem wejściowym. W jej skład wchodzi: reflektor, promiennik, konstrukcja mocująca oraz obudowa promiennika znajdująca się w ognisku anteny.

Pomiar charakterystyki promieniowania anteny wykonuje się na stanowisku w wolnej przestrzeni w strefie dalekiej lub na stanowisku z anteną kompaktową. Dopuszcza się również pośrednią metodę pomiaru przez pomiar pola elektromagnetycznego,

w polu bliskim z wykorzystaniem systemu skanującego. Należy jednak wówczas wykazać, że zastosowana metoda daje takie same wyniki, jak metoda stosowana na stanowisku pomiarowym w wolnej przestrzeni w polu dalekim lub na stanowisku stosującym antenę kompaktową. W przypadku w pełni zautomatyzowanych systemów pomiarowych uchyb pomiaru musi być taki sam, jak we wcześniej wymienionych metodach.



Rys. 11.16. Stanowisko do pomiaru charakterystyki promieniowania (nadawanie)

Metoda pomiaru charakterystyki promieniowania anteny w płaszczyźnie poziomej (azymutu) dla polaryzacji zamierzonej jest przedstawiona w kolejnych krokach.

Krok 1. Zestawić stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 11.16. Badaną antenę podłączyć do odbiornika pomiarowego. Serwomechanizm obracający antenę podłączyć do wejścia X rejestratora, poziom sygnału z odbiornika natomiast do wejścia Y rejestratora.

Krok 2. Ustawić częstotliwość pomiarową równą 14,250 GHz.

Krok 3. Antenę pomiarową ustawić tak, by płaszczyzna wektora pola elektrycznego E była pionowa, a ponadto obie anteny ustawić tak, by osie głównych wiązek leżały na jednej prostej. Polaryzator badanej anteny dopasować do polaryzacji anteny pomiarowej. Precyzyjne dopasowanie polaryzacji obu anten należy uzyskać przez obrót polaryzatora i obserwację minimum przy ustawieniu polaryzacji ortogonalnej (precyzyjne dopasowanie polaryzacji).

Krok 4. Znaleźć maksymalną wartość sygnału odbieranego i ustawić rejestrator w taki sposób, by odpowiadała ona maksymalnej wartości zaznaczonej na wykresie.

Krok 5. Badaną antenę obrócić w azymucie o kąt -180° .

Krok 6. Rejestracja charakterystyki promieniowania anteny odbywa się podczas obrotu w azymucie badanej anteny od kąta -180° do $+180^\circ$.

Krok 7. Pomiar charakterystyki promieniowania przy zamierzonej polaryzacji od kroku 4. do 6. wykonać dla częstotliwości 14,005 GHz.

Krok 8. Pomiar charakterystyki promieniowania przy zamierzonej polaryzacji od kroku 4. do 6. wykonać dla częstotliwości 14,495 GHz.

Krok 9. Pomiary w krokach od 2. do 8. można wykonać jednocześnie.

Krok 10. Pomiary w krokach od 4. do 9. powtórzyć przy ustawieniu płaszczyzny wektora E anteny pomiarowej poziomo. Częstotliwość pomiarową ustawić równą 14,250 GHz. Dopasować polaryzację badanej anteny do polaryzacji anteny pomiarowej przez obrót polaryzatora (ustawienie minimum dla polaryzacji ortogonalnej).

Metoda pomiaru charakterystyki promieniowania anteny w płaszczyźnie pionowej (elewacji) dla polaryzacji zamierzonej jest przedstawiona w kolejnych krokach.

Krok 1. Zestawić stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 11.16. Badaną antenę podłączyć do odbiornika pomiarowego. Serwomechanizm obracający antenę podłączyć do wejścia X rejestratora, natomiast poziom sygnału z odbiornika do wejścia Y rejestratora.

Krok 2. Ustawić częstotliwość pomiarową równą 14,250 GHz.

Krok 3. Antenę pomiarową ustawić tak, by płaszczyzna wektora pola elektrycznego E była pionowa, a ponadto obie anteny ustawić tak, by osie głównych wiązek leżały na jednej prostej. Polaryzator badanej anteny dopasować do polaryzacji anteny pomiarowej. Precyzyjne dopasowanie polaryzacji obu anten należy uzyskać przez obrót polaryzatora i obserwację minimum przy ustawieniu polaryzacji ortogonalnej (precyzyjne dopasowanie polaryzacji).

Krok 4. Znaleźć maksymalną wartość sygnału odbieranego i ustawić rejestrator w taki sposób, by odpowiadała ona maksymalnej wartości zaznaczonej na wykresie.

Krok 5. Badaną antenę obrócić w elewacji do -1° .

Krok 6. Rejestracja charakterystyki promieniowania anteny odbywa się podczas obrotu w elewacji badanej anteny od kąta -1° do $+70^\circ$.

Krok 7. Pomiar charakterystyki promieniowania przy zamierzonej polaryzacji od kroku 4. do 6. wykonać dla częstotliwości 14,005 GHz.

Krok 8. Pomiar charakterystyki promieniowania przy zamierzonej polaryzacji od kroku 4. do 6. wykonać dla częstotliwości 14,495 GHz.

Krok 9. Pomiary w krokach od 2. do 8. można wykonać jednocześnie.

Krok 10. Pomiary w krokach od 4. do 9. powtórzyć przy ustawieniu płaszczyzny wektora E anteny pomiarowej poziomo. Częstotliwość pomiarową ustawić równą 14,250 GHz. Obie anteny ustawić tak, by osie głównych wiązek leżały na jednej prostej. Dopasować polaryzację badanej anteny do polaryzacji anteny pomiarowej przez obrót polaryzatora (ustawienie minimum dla polaryzacji ortogonalnej).

Metoda pomiaru charakterystyki promieniowania anteny w płaszczyźnie poziomej (azymutu) dla polaryzacji ortogonalnej jest przedstawiona w kolejnych krokach.

Krok 1. Zestawić stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 11.16. Badaną antenę podłączyć do odbiornika pomiarowego. Serwomechanizm obracający antenę podłączyć do wejścia X rejestratora, poziom sygnału z odbiornika natomiast do wejścia Y rejestratora.

Krok 2. Ustawić częstotliwość pomiarową równą 14,250 GHz.

Krok 3. Antenę pomiarową ustawić tak, by płaszczyzna wektora pola elektrycznego E była pionowa, a ponadto obie anteny ustawić tak, by osie głównych wiązek leżały na jednej prostej. Polaryzator badanej anteny ustawić tak, by płaszczyzna wektora E była ortogonalna do płaszczyzny wektora E anteny pomiarowej. Precyzyjne ustawienie płaszczyzny polaryzacji należy uzyskać przez obrót polaryzatora i obserwację minimum przy ustawieniu polaryzacji ortogonalnej (precyzyjne dopasowanie polaryzacji).

Krok 4. Rejestrator ustawić w taki sposób, by maksymalnej wartości zaznaczonej na wykresie odpowiadała maksymalna wartość sygnału odebrana w warunkach pełnego dopasowania polaryzacyjnego (osie głównych wiązek anten skierowane na siebie).

Krok 5. Badaną antenę obrócić w azymucie o kąt -10° .

Krok 6. Rejestracja charakterystyki promieniowania anteny odbywa się podczas obrotu w azymucie badanej anteny od kąta -10° do $+10^\circ$.

Krok 7. Pomiar charakterystyki promieniowania przy ortogonalnej polaryzacji od kroku 4. do 6. wykonać dla częstotliwości 14,005 GHz.

Krok 8. Pomiar charakterystyki promieniowania przy ortogonalnej polaryzacji od kroku 4. do 6. wykonać dla częstotliwości 14,495 GHz.

Krok 9. Pomiary w krokach od 2. do 8. można wykonać jednocześnie.

Krok 10. Pomiary w krokach od 4. do 9. powtórzyć przy ustawieniu płaszczyzny wektora E anteny pomiarowej poziomo. Częstotliwość pomiarową ustawić równą 14,250 GHz. Obie anteny ustawić tak, by osie głównych wiązek leżały na jednej prostej i były skierowane ku sobie. Polaryzator badanej anteny ustawić tak, by płaszczyzna wektora E była ortogonalna do płaszczyzny wektora E anteny pomiarowej. Precyzyjne ustawienie płaszczyzny polaryzacji należy uzyskać przez obrót polaryzatora i obserwację minimum przy ustawieniu polaryzacji ortogonalnej (precyzyjne dopasowanie polaryzacji).

Metoda pomiaru charakterystyki promieniowania anteny w płaszczyźnie pionowej (elewacji) dla polaryzacji ortogonalnej jest przedstawiona w kolejnych krokach.

Krok 1. Zestawić stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 11.16. Badaną antenę podłączyć do odbiornika pomiarowego. Serwomechanizm obracający antenę podłączyć do wejścia X rejestratora, poziom sygnału z odbiornika natomiast do wejścia Y rejestratora.

Krok 2. Ustawić częstotliwość pomiarową równą 14,250 GHz.

Krok 3. Antenę pomiarową ustawić tak, by płaszczyzna wektora pola elektrycznego E była pionowa, a ponadto obie anteny ustawić tak, by osie głównych wiązek leżały na jednej prostej i były skierowane ku sobie. Polaryzator badanej anteny ustawić tak, by płaszczyzna wektora E była ortogonalna do płaszczyzny wektora E anteny pomiarowej. Precyzyjne ustawienie płaszczyzny polaryzacji należy uzyskać przez obrót polaryzatora i obserwację minimum przy ustawieniu polaryzacji ortogonalnej (precyzyjne dopasowanie polaryzacji).

Krok 4. Rejestrator ustawić w taki sposób, by maksymalnej wartości zaznaczonej na wykresie odpowiadała maksymalna wartość sygnału odebrana w warunkach pełnego dopasowania polaryzacyjnego (osie głównych wiązek anten skierowane na siebie).

Krok 5. Badaną antenę obrócić w elewacji do -1° .

Krok 6. Rejestracja charakterystyki promieniowania anteny odbywa się podczas obrotu w elewacji badanej anteny od kąta -1° do $+10^\circ$.

Krok 7. Pomiar charakterystyki promieniowania przy zamierzonej polaryzacji od kroku 4. do 6. wykonać dla częstotliwości 14,005 GHz.

Krok 8. Pomiar charakterystyki promieniowania przy zamierzonej polaryzacji od kroku 4. do 6. wykonać dla częstotliwości 14,495 GHz.

Krok 9. Pomiary w krokach od 2. do 8. można wykonać jednocześnie.

Krok 10. Pomiary w krokach od 4. do 9. powtórzyć przy ustawieniu płaszczyzny wektora E anteny pomiarowej poziomo. Częstotliwość pomiarową ustawić równą 14,250 GHz. Obie anteny ustawić tak, by osie głównych wiązek leżały na jednej prostej i były skierowane ku sobie. Polaryzator badanej anteny ustawić tak, by płaszczyzna wektora E była ortogonalna do płaszczyzny wektora E anteny pomiarowej. Precyzyjne ustawienie płaszczyzny polaryzacji należy uzyskać poprzez obrót polaryzatora i obserwację minimum przy ustawieniu polaryzacji ortogonalnej (precyzyjne dopasowanie polaryzacji).

Wyniki pomiaru należy przetworzyć przez utworzenie tzw. „maski” (zalecanej charakterystyki promieniowania anteny) dla określonych wartości. Przebieg „maski” powinien być odniesiony do poziomu wyznaczonego przez sumę mocy wyjściowej nadajnika i zysku anteny (oba składniki wyrażone w decybelach). Linię wskazującą poziom odniesienia należy umieścić w maksimum zmierzzonego przebiegu charakterystyki promieniowania. Sprawdzenie zgodności ze specyfikacją polega na porównaniu przebiegu „maski” z przebiegiem zmierzonym.

4. WYMAGANIA DOTYCZĄCE ZASTĘPCZEJ MOCY PROMIENIOWANEJ IZOTROPOWO W OBSZARZE PROMIENIOWANIA NIEPOŻĄDANEGO

Ograniczenia związane z tym parametrem dotyczą jedynie stacji nadawczych. Zastępczą moc promieniowaną izotropowo $EIRP$ definiuje się jako maksymalną wartość $EIRP$ transmitowaną przez antenę w pasmie nadawczym i mierzoną w pasmie pomiarowym 40 kHz. Dopuszczalne wartości $EIRP$ dotyczą obszaru promieniowania niepożądanego oraz polaryzacji pożądaney i ortogonalnej.

Dopuszczalne wartości $EIRP$ podano w tabelach 11.9 i 11.10. Są one zgodne z normą ETS 300 159 [32].

Tabela 11.9. Wartości dopuszczalne $EIRP$ (40 kHz) dla polaryzacji pożądaney

Wartość dopuszczalna, dB(W)	Zakres kątów
$33-25 \log(\varphi) - 10 \log N$	$2,5^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ$
$12-10 \log N$	$7^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ$
$36-25 \log(\varphi) - 10 \log N$	$9,2^\circ < \varphi \leq 48^\circ$
$-6-10 \log N$	$\varphi > 48^\circ$

Kąt φ jest kątem w stopniach między osią głównej wiązki anteny a rozpatrywanym kierunkiem, N określa maksymalną liczbę terminali VSAT, które mogą jednocześnie nadawać na tej samej częstotliwości. Wartość N określa producent systemu.

Dla kątów $\varphi > 70^\circ$ wartości z tabeli 11.9 mogą być zwiększone do wartości $4-10 \log N$ dB(W) dla kątów, przy których stosowanie określonego promiennika daje efekt względnie dużego „przelewania energii” (*spillover*).

Dla anten optymalizowanych pod względem zysku w kierunku orbity geostacjonarnej wartości dopuszczalne $EIRP$ w zakresie $2,5^\circ \leq \varphi \leq 20^\circ$ powinny być spełnione między płaszczyznami tworzącymi sektor katowy $\pm 3^\circ$ od osi głównej wiązki anteny.

Tabela 11.10. Wartości dopuszczalne $EIRP$ (40 kHz) dla polaryzacji ortogonalnej

Wartość dopuszczalna, dB(W)	Zakres kątów
$23-25 \log(\varphi) - 10 \log N$	$2,5^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ$
$2-10 \log N$	$7^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ$

Płaszczyzna, w której obowiązuje ograniczenie zysku poza główną wiązką, musi być oznaczona na antenie w taki sposób, by możliwa była jej identyfikacja. Antena musi umożliwiać odpowiednie ustawienie tej płaszczyzny w stosunku do płaszczyzny orbity geostacjonarnej. Antena powinna być tak skonstruowana, by możliwy był jej obrót względem osi głównej wiązki z dokładnością ustawienia kąta $0,5^\circ$.

11.3.4. DYSKRYMINACJA POLARYZACJI ANTENY NADAWCZEJ

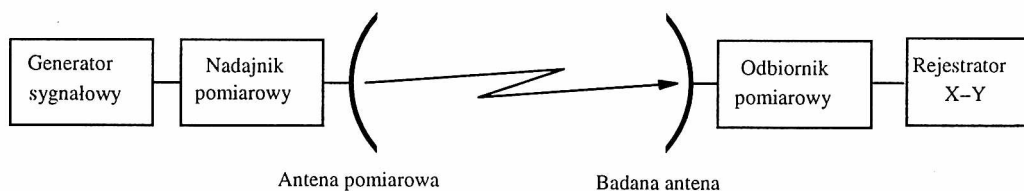
Badanym urządzeniem jest antena z wyróżnionym portem wejściowym. W jej skład wchodzi: reflektor, promiennik, konstrukcja mocująca oraz obudowa promiennika znajdująca się w ognisku anteny.

Pomiar dyskryminacji polaryzacji anteny w zakresie częstotliwości nadawczych można wykonać na stanowisku pomiarowym w otwartej przestrzeni w polu dalekim lub na stanowisku z anteną kompaktową. Dopuszcza się również pośrednią metodę pomiaru przez pomiar pola elektromagnetycznego w polu bliskim z wykorzystaniem systemu skanującego. Należy jednak w tym przypadku wykazać, że zastosowana metoda daje takie same wyniki, jak metoda stosowana na stanowisku pomiarowym w wolnej przestrzeni w polu dalekim lub na stanowisku stosującym antenę kompaktową. W przypadku w pełni zautomatyzowanych systemów pomiarowych uchyb pomiaru musi być taki sam jak we wcześniej wymienionych metodach.

1. POMIAR DYSKRYMINACJI POLARYZACJI ANTENY NADAWCZEJ

Procedurę pomiarową wygodnie jest przedstawić w kolejnych krokach.

Krok 1. Zestawić stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 11.17. Badaną antenę podłączyć do odbiornika pomiarowego. Serwomechanizm obracający antenę podłączyć do wejścia X rejestratora, wyjście sygnału z odbiornika natomiast do wejścia Y rejestratora.



Rys. 11.17. Stanowisko do pomiaru dyskryminacji polaryzacji (nadawanie)

Krok 2. Ustawić częstotliwość pomiarową równą 14,250 GHz.

Krok 3. Antenę pomiarową ustawić tak, by płaszczyzna wektora pola elektrycznego E była pionowa, a ponadto obie anteny ustawić tak, by osie głównych wiązek leżały na jednej

prostej i były skierowane ku sobie. Polaryzator badanej anteny ustawić tak, by płaszczyzna wektora E była równoległa do płaszczyzny wektora E anteny pomiarowej. Precyzyjne ustawienie płaszczyzny polaryzacji należy uzyskać przez obrót polaryzatora i obserwację minimum przy ustawieniu polaryzacji ortogonalnej (precyzyjne dopasowanie polaryzacji).

Krok 4. Odnotować zmierzoną wartość sygnału uzyskaną przy dopasowaniu polaryzacyjnym anten.

Krok 5. Badaną antenę obrócić w poziomie (azymucie) i pionie (elewacji) o kąty, w których mierzony sygnał spada o 1 dB. Zanotować wartości kątów azymutu (AZ1, AZ2) i elewacji (EL1, EL2) odpowiadające 1 dB spadkowi poziomu sygnału przy dopasowaniu polaryzacyjnym anten. Ustawić azymut badanej anteny na 0° , a kąt elewacji na wartość odpowiadającą 50% kąta EL1. Obracać antenę w azymucie w obu kierunkach dopóty, dopóki nie uzyska się na mierniku poziomu sygnału odnotowanego w kroku 4. pomniejszonego o 1 dB. Najmniejszy i największy azymut (AZ3, AZ4), odpowiadający kierunkom spadku zysku anteny przy dopasowaniu dla kąta elewacji równego 50% EL1, należy zanotować. Ustawić azymut na 0° , a kąt elewacji na wartość odpowiadającą 50% kąta EL2. Obracać antenę w azymucie w obu kierunkach aż do uzyskania na mierniku poziomu sygnału odnotowanego w kroku 4. pomniejszonego o 1 dB. Najmniejszy i największy azymut (AZ5, AZ6), odpowiadający kierunkom spadku zysku anteny przy dopasowaniu dla kąta elewacji równego 50% EL2, należy zanotować. Ustawić azymut i kąt elewacji mierzonej anteny na 0° . Obrócić antenę pomiarową względem osi głównej wiązki o kąt 90° w celu odbioru składowej ortogonalnej przez badaną antenę.

Krok 6. Obracać badaną antenę w poziomie od azymutu AZ1 do AZ2 z rejestratorem X–Y, zapisującym stosunek poziomów pomiędzy wartością odnotowaną w kroku 4. i bieżącą wartością mierzonego sygnału o polaryzacji ortogonalnej.

Krok 7. Ustawić badaną antenę pod kątem elewacji równym 50% kąta EL1. Następnie obracać ją w poziomie od azymutu AZ3 do AZ4, z rejestratorem X–Y zapisującym stosunek poziomów pomiędzy wartością odnotowaną w kroku 4. i bieżącą wartością mierzonego sygnału o polaryzacji ortogonalnej.

Krok 8. Ustawić badaną antenę pod kątem elewacji równym 50% kąta EL2. Następnie obracać ją w poziomie od azymutu AZ5 do AZ6, z rejestratorem X–Y zapisującym stosunek poziomów pomiędzy wartością odnotowaną w kroku 4. i bieżącą wartością mierzonego sygnału o polaryzacji ortogonalnej.

Krok 9. Ustawić azymut badanej anteny na 0° . Następnie obracać ją w pionie od kąta elewacji EL1 do EL2 z rejestratorem X–Y, zapisującym stosunek poziomów pomiędzy wartością odnotowaną w kroku 4. i bieżącą wartością mierzonego sygnału o polaryzacji ortogonalnej.

Krok 10. Obrócić antenę pomiarową o 90° względem osi głównej wiązki anteny w celu odbioru składowej sygnału o polaryzacji zamierzonej (dopasowanie polaryzacyjne). Powtórzyć pomiary od kroku 4. do 9. dla częstotliwości 14,005 GHz.

Krok 11. Obrócić antenę pomiarową o 90° względem osi głównej wiązki anteny w celu odbioru składowej sygnału o polaryzacji zamierzonej (dopasowanie polaryzacyjne). Powtórzyć pomiary od kroku 4. do 9. dla częstotliwości 14,495 GHz.

Krok 12. Pomiary od kroku 2. do 11. można prowadzić równocześnie.

Krok 13. Ustawić częstotliwość sygnału pomiarowego równą 14,250 GHz.

Krok 14. Ustawić wstępnie płaszczyznę wektora E anteny pomiarowej w poziomie. Obie anteny ustawić tak, by osie głównych wiązek leżały na jednej prostej i były skierowane ku sobie. Polaryzator badanej anteny ustawić tak, by płaszczyzna wektora E była równoległa do płaszczyzny wektora E anteny pomiarowej. Precyzyjne ustawienie płaszczyzny polaryzacji należy uzyskać przez obrót polaryzatora i obserwację minimum przy ustawieniu polaryzacji ortogonalnej (precyzyjne dopasowanie polaryzacji). Wykonać pomiary od kroku 4. do 12. w płaszczyźnie wektora H .

W wyniku pomiarów uzyskuje się cztery wykresy dla każdej częstotliwości i każdej płaszczyzny, które przedstawiają dyskryminację polaryzacji podczas nadawania w trzech przekrojach poziomych i jednym pionowym w zakresie kątów odpowiadających spadkowi zysku anteny o 1 dB (przy dopasowaniu polaryzacyjnym). Do pomiarów można zastosować w pełni zautomatyzowane stanowisko.

2. DOPUSZCZALNE WARTOŚCI DYSKRYMINACJI POLARYZACJI ANTENY NADAWCZEJ

Wymagane jest, aby dyskryminacja polaryzacji anteny VSAT w nadawczym zakresie częstotliwości była większa od wartości zawartych w tabeli 11.11.

Tabela 11.11. Wartości dopuszczalne dyskryminacji polaryzacji (XPD) w zależności od maksymalnej wartości $EIRP$ (dB(W)/4 kHz) terminalu VSAT

Wartość dopuszczalna, dB	Maksymalne $EIRP$, dB(W)/4 kHz
28	35 i więcej
25	33

Stosować liniową aproksymację dla dopuszczalnej wartości dyskryminacji polaryzacji pomiędzy zakresami wartości $EIRP$ podanymi w tabeli 11.11. Maksymalna wartość $EIRP$ oznaczona przez PD jest uśredniana w zajmowanym pasmie i należy ją wyznaczyć z zależności

$$PD = EIRP_{\text{maks}} - \frac{B_0}{4000} \text{ dB(W)/4 kHz},$$

$EIRP_{\text{maks}}$ – maksymalna wartość $EIRP$ nadającego terminalu,

B_0 – zajmowane pasmo.

11.3.5. TLUMIENIE SYGNAŁU NOŚNEJ

Jednym z podstawowych wymagań dotyczących naziemnych stacji satelitarnych VSAT jest posiadanie sprawnie działającego systemu sterowania i nadzoru CCMF. Część tego systemu jest wbudowana w terminal VSAT i nadzoruje jego prawidłową pracę pod względem charakterystyk emisyjnych oraz kontroluje współpracę z centralnym systemem sterowania i nadzoru [33]. Pozostała część systemu znajduje się na zewnątrz terminalu VSAT (zazwyczaj w centrum nadzoru systemu zlokalizowanym

przy stacji centralnej sieci VSAT – konfiguracja gwiazdy lub połączone do terminalu VSAT sprawującego kontrolę nad siecią – konfiguracja kraty) i steruje oraz nadzoruje jego pracę [34].

Terminal VSAT może znajdować się w jednym z czterech dopuszczalnych stanów pracy:

- nie działa (*out of service*),
- testuje się (*checking*),
- czuwa (*stand by*),
- pracuje (*in service*).

W trzech pierwszych stanach nadawanie przez terminal VSAT jest zabronione (*transmission disabled*). Pomiar tłumienia sygnału nośnego mierzy się w stanie, w którym nadawanie jest zabronione.

1. METODA POMIARU

Do pomiaru tłumienia sygnału nośnego stosuje się stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 11.12, gdy terminal VSAT umożliwia pomiar mocy na wejściu anteny, lub na rysunku 11.13, gdy jedyną możliwą do zastosowania metodą jest pomiar zastępczej mocy promieniowanej izotropowo z anteny. Procedura pomiarowa została przedstawiona w kolejnych krokach.

Krok 1. Dla terminalu VSAT z dostępnym wejściem antenowym zestawić stanowisko pomiarowe zgodnie z rysunkiem 11.12. Dla terminalu ze zintegrowaną anteną (nie ma dojścia do wejścia anteny) zestawić stanowisko pokazane na rysunku 11.13.

Krok 2. Terminal musi nadawać jedną częstotliwość nośną w sposób ciągły lub z maksymalną szybkością transmisji pakietów na częstotliwości 14,250 GHz.

Krok 3. Wybrać 3 kHz szerokość pasma pomiarowego analizatora widma.

Krok 4. Za pomocą systemu sterowania i nadzoru CCMF ustawić terminal VSAT w stanie, w którym nadawanie nie jest dozwolone.

Krok 5. W przypadku pomiarów na wejściu anteny zmierzyć maksymalną moc w pasmie nominalnym terminalu i dodać ją do zysku anteny (na osi głównej wiązki).

Krok 6. W przypadku bezpośredniego pomiaru *EIRP* zmierzyć maksymalną wartość *EIRP* w nominalnym pasmie.

Stan terminalu VSAT, w którym nadawanie nie jest dozwolone, można uzyskać za pomocą komendy systemu CCMF lub dostarczonego przez producenta specjalistycznego oprzyrządowania STE symulującego działanie CCMF.

2. WYMAGANIA DOTYCZĄCE TŁUMIENIA SYGNAŁU NOŚNEGO

We wcześniejszych wersjach standardu dotyczącego terminali VSAT [32] podawano dopuszczalną stabilność częstotliwości nośnej. Z tego typu wymagań zrezygnowano z uwagi na przejęcie przez system CCMF nadzoru nad częstotliwością nośną terminalu. Jeśli wychodzi ona poza dopuszczalne przez producenta wartości, system CCMF wykrywa zaistnienie tego typu zdarzenia i wprowadza terminal VSAT w stan, w którym nadawanie jest zabronione.

Wymaga się, by w stanie, w którym nadawanie przez terminal VSAT nie jest dozwolone nie promieniował on w nominalnym pasmie więcej niż 4 dB(W) w pasmie 4 kHz.

12. STEROWANIE I NADZÓR TERMINALU VSAT

Jednym z elementów wyróżniających naziemne stacje satelitarne VSAT od stacji satelitarnych innych typów jest wymaganie posiadania sprawnie działającego systemu sterowania i nadzoru CCMF. System ten umożliwia wykrycie nieprawidłowej pracy terminalu oraz uniemożliwia nadawanie w sytuacjach, kiedy może zaistnieć niebezpieczeństwo zakłócania przez terminal innych systemów. System sterowania i nadzoru nie wpływa na charakterystyki emisyjne terminalu VSAT, przyczynia się jednak do eliminacji sytuacji, w których zmiana w pracy terminalu może w niekorzystny sposób pogorszyć jego emisyjne parametry. Dlatego też celowe jest krótkie przedstawienie zasadniczych elementów systemu sterowania i nadzoru, który umożliwia bezobsługową pracę terminalom VSAT i przyczynia się do przyznania tej klasie systemów znacznych ułatwień związanych z procedurami prawnymi dopuszczenia do pracy.

Typowym przykładem przejmowania przez system CCMF roli nadzorczej jest pominięcie w najnowszej wersji normy ETS 300 159 wymagań związanych ze stabilnością częstotliwości nośnej. Jeśli częstotliwość nośna zmienia się w zbyt dużym zakresie, system CCMF wykryje to i ustawi terminal VSAT w stanie uniemożliwiającym nadawanie. Uaktywniona zostanie część systemu CMF wbudowana w terminal VSAT. Również operator ma możliwość wyłączenia dowolnego terminalu lub dowolnej grupy terminali, jeśli stwierdzi, że powodują one zakłócenia. Umożliwia to scentralizowany system sterowania i nadzoru CCMF pracujący w centrum u operatora. Dokładny opis systemu CCMF przedstawiono w publikacji [34], a systemu CMF w pracy [33].

12.1. STANY PRACY TERMINALU VSAT

Podstawowym zadaniem funkcji sterowania i nadzoru CMF jest sprowadzenie do minimum ryzyka wystąpienia sytuacji, kiedy sygnały wytwarzane przez terminal VSAT mogą zakłócić pracę innego systemu. Po wykryciu nieprawidłowości w pracy terminalu funkcje CMF blokują możliwość nadawania. Terminal może wtedy wytwarzać poziomy promieniowania wymagane przez normy dla stanów, w których nadawanie jest niedozwolone.

Funkcje nadzoru, obejmują wszelkie sprawdzające i weryfikujące działania prowadzone przez terminal VSAT w celu wykrycia anomalii w pracy, które mogą spowodować zakłócanie innych systemów. Wypadkowy wynik sprawdzania jest zawarty w zmiennej SMV i może przybrać jedną z dwóch wartości:

- terminal jest sprawny SMP,
- terminal nie jest sprawny SMF.

Funkcje sterowania są związane ze zdolnością systemu CCMF do blokady i zezwolenia na transmisję dla danego terminalu VSAT. Ich stan aktualny jest zawarty w zmiennej CV, rezydującej w każdym terminalu VSAT. Zawartość zmiennej zmienia się w wyniku określonych zdarzeń i może przybierać dwie wartości:

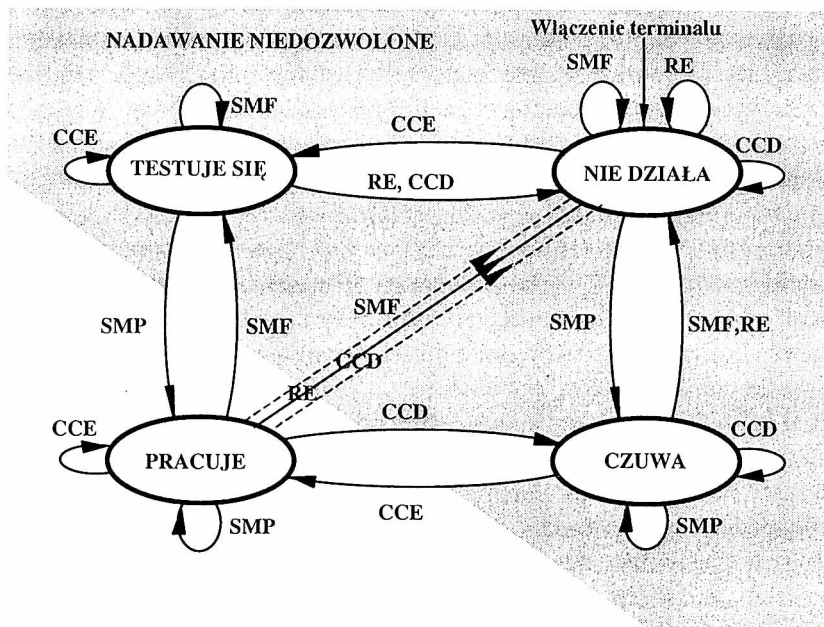
- centralne sterowanie jest niedostępne CCD,
- centralne sterowanie jest dostępne CCE.

Po włączeniu terminalu VSAT do sieci energetycznej system sterowania musi zapewnić mu gotowość do odbioru i realizacji określonych poleceń oraz wprowadzić go w stan, w którym nadawanie nie jest dozwolone.

W podsumowaniu można stwierdzić, że system nadzoru sprawdza czy terminal VSAT jest w pełni sprawny, a system sterowania sprawdza czy terminal VSAT reaguje na rozkazy. Możliwe kombinacje zmiennych SMV i CV definiują cztery, wcześniej wymienione, dopuszczalne stany pracy terminalu VSAT:

- nie działa,
- testuje się,
- czuwa,
- pracuje.

Na rysunku 12.1 pokazano dopuszczalne przejścia pomiędzy stanami pracy terminalu VSAT.



Rys. 12.1. Dopuszczalne przejścia pomiędzy stanami pracy terminalu VSAT

Terminal VSAT nie działa, jeśli nie jest sprawny (SMV przybiera wartość SMF) i gdy nie działa centralny system sterowania (CV przybiera wartość CCD), wówczas

występuje blokada nadawania. W stan ten jest wprowadzany terminal VSAT po włączeniu zasilania lub wyzerowaniu rejestrów (RE).

Terminal VSAT testuje się, jeśli stwierdzono jego niesprawność (SMV przybiera wartość SMF), ale centralny system sterowania działa poprawnie (CV przybiera wartość CCD). W tym stanie występuje blokada nadawania.

Terminal VSAT czuwa, gdy jest sprawny (SMV przybiera wartość SMP) i gdy nie działa centralny system sterowania (CV przybiera wartość CCD). W tym stanie występuje blokada nadawania.

Terminal VSAT pracuje, gdy jest sprawny (SMV przybiera wartość SMP) i gdy prawidłowo działa centralny system sterowania (CV przybiera wartość CCE). W tym stanie terminal może nadawać.

12.2. KANAŁ SYGNALIZACYJNY (STEROWANIA)

Każdy terminal VSAT musi być wyposażony w co najmniej jeden kanał sterowania CC zapewniający łączność z centrum sterowania i nadzoru CCMF. Kanał ten może być wewnętrzny lub zewnętrzny. Kanał wewnętrzny jest realizowany przy użyciu satelitarnych łączy terminalu VSAT, a kanał zewnętrzny poprzez dowolne inne medium transmisyjne, np. sieć komputerową lub publiczną sieć telefoniczną. Rodzaj kanału stosowanego przez terminal VSAT deklaruje producent. Niektórzy operatorzy systemów satelitarnych mogą żądać wyposażenia terminalu VSAT w wewnętrzny kanał sygnalizacyjny.

Działanie wewnętrznego kanału sygnalizacyjnego CC terminalu VSAT musi być sprawdzane w sposób ciągły. Testy obejmują sprawdzenie prawidłowości:

- dostrojenia części odbiorczej do częstotliwości nośnej,
- demodulacji i dekodowania sygnału sterującego,
- odebranej z CCMF wiadomości.

Nieprawidłowe działanie części odbiorczej terminalu przez dłużej niż 30 s musi spowodować podstawienie do zmiennej SMV wartości SMF (terminal niesprawny). Zmiana zawartości zmiennej SMV musi odbyć się nie później niż po 33 s od faktycznego wystąpienia uszkodzenia.

Terminal VSAT musi mieć zapisane dwa unikatowe kody identyfikacyjne w nieulotnej pamięci:

- kod identyfikacyjny kanału lub kanałów sygnalizacyjnych,
- kod identyfikacyjny terminalu VSAT, jeśli kanał sygnalizacyjny jest odbierany przez większą liczbę terminali.

Błędy w odbiorze i właściwej autoryzacji odebranego kodu identyfikacyjnego trwające dłużej niż 60 s muszą spowodować zmianę zawartości zmiennej SMV na SMF (terminal niesprawny). Zmiana zawartości zmiennej SMV musi odbyć się nie później niż po 63 s od faktycznego wystąpienia uszkodzenia. Terminal VSAT musi zapewnić odbiór wiadomości poprzez autoryzowany kanał sterowania CC, gdy zmienna CV ma wartość CCD (kanał sterowania niesprawny), jak i CCE (kanał sterowania sprawny).

12.3. FUNKCJE NADZORU

W terminalu VSAT muszą być zainstalowane funkcje nadzoru następujących elementów:

- procesor,
- podsystem nadawczy,
- prawidłowość transmisji.

Poprawna weryfikacja wszystkich funkcji nadzoru musi zmienić zawartość zmiennej SMV na SMP (terminal sprawny). Wykrycie błędnego działania jednego z podsystemów musi zmienić zawartość zmiennej SMV na SMF (terminal niesprawny). Funkcje nadzoru muszą być aktywne we wszystkich stanach terminalu.

Funkcja nadzoru procesora ma za zadanie sprawdzanie poprawności pracy każdego z zainstalowanych w terminalu procesorów służących do obsługi ruchu oraz manipulacji funkcjami nadzoru czy sterowania i blokady transmisji w razie wykrycia niesprawności jednego z nich. Sprawdzane musi być oprogramowanie i osprzęt. Wykrycie niesprawności procesora nie może trwać dłużej niż 30 s i powoduje zmianę stanu zmiennej SMV na SMF (terminal niesprawny). Zmiana zawartości zmiennej SMV musi odbyć się nie później niż po 33 s od faktycznego wystąpienia uszkodzenia procesora.

Funkcja nadzoru podsystemu nadawczego ma za zadanie blokadę transmisji w razie wykrycia błędów w pracy tego podsystemu. Terminal VSAT musi nadzorować pracę podsystemu generacji sygnału nadawczego. Wykrycie jego niesprawności nie może trwać dłużej niż 5 s i musi zmienić zawartości zmiennej SMV na SMF (terminal niesprawny). Zmiana zawartości zmiennej SMV musi odbyć się nie później niż po 8 s od faktycznego wystąpienia niesprawności.

Funkcja umożliwiająca nadzór nad prawidłowością transmisji ma potwierdzić, że nadana wiadomość została poprawnie odebrana. Jeśli terminal VSAT jest wyposażony w wewnętrzny kanał sterowania CC, to istnieją dwa sposoby potwierdzenia poprawności odbioru:

- potwierdzenie poprawności przez CCMF,
- potwierdzenie poprawności przez stację odbiorczą.

Terminal VSAT musi realizować potwierdzenie poprawności transmisji jednym z wymienionych wcześniej sposobów.

Potwierdzenie poprawności przez CCMF polega na nadaniu przez pracujący terminal VSAT wiadomości o swoim stanie w odpowiedzi na żądanie z CCMF, odebrane poprzez kanał sterujący CC. Wiadomość o stanie terminalu musi być przesłana w wewnętrznym kanale zwrotnym RC. Może być ona wysyłana przez terminal VSAT w sposób okresowy, bez konieczności stymulacji ze strony CCMF.

Potwierdzenie poprawności przez stację odbiorczą polega na nadaniu przez nią wiadomości o prawidłowym odbiorze wysłanych z terminalu wiadomości. Co 10 minut, w okresie których terminal VSAT nadawał przynajmniej jeden raz, powinien on odebrać co najmniej jedną wiadomość mówiącą o prawidłowości odbioru nadawanych przez terminal VSAT wiadomości. Jeśli w ciągu 10 min po każdej transmisji żadne

potwierdzenie nie zostanie odebrane przez terminal VSAT, to należy zmienić zawartości zmiennej SMV na SMF (terminal niesprawny). Zmiana zawartości zmiennej SMV musi odbyć się nie później niż po 11 min od odebrania ostatniej wiadomości potwierdzającej poprawność transmisji.

Jeśli terminal VSAT jest wyposażony jedynie w zewnętrzny kanał sygnalizacyjny, to służy on do sprawdzenia sterowalności oraz prawidłowości transmisji przez żądanie przesłania do centrum sterowania CCMF wiadomości o sprawności terminalu (terminal znajduje się w stanie pracy).

Wiadomość o sprawności terminalu musi przesłać poprzez kanał sygnalizacyjny CC w odpowiedzi na odebrane z CCMF żądanie. Wiadomość o sprawności może być przesłana zewnętrznym kanałem zwrotnym RC i musi zawierać informację o wielkości zastępczej mocy promieniowanej izotropowo *EIRP* i częstotliwości nośnej lub wewnętrznym kanałem zwrotnym RC.

Terminal VSAT musi w poprawny sposób reagować na wiadomości (komendy) wysłane z centrum CCMF. Odebranie wiadomości o niesprawności centralnego systemu nadzoru CCD (sterowanie niesprawne) musi spowodować zmianę zawartości zmiennej CV na CCD w czasie nie dłuższym niż 3 s. Odebranie wiadomości o sprawności centralnego systemu sterowania CCE (sterowanie sprawne) musi spowodować zmianę zawartości zmiennej CV na CCE. W tym przypadku nie ma jednak wymagań czasowych.

Po włączeniu zasilania terminal VSAT musi przejść do stanu, w którym nie pracuje. Jeśli jest on wyposażony w funkcję zerowania rejestrów, to jej uaktywnienie musi spowodować przejście terminalu do stanu, kiedy nie pracuje w czasie nie dłuższym niż 3 s. Terminal VSAT może wyjść ze stanu, w którym nie pracuje lub czuwa jedynie po otrzymaniu wiadomości CCE z centralnego systemu sterowania. Wiadomość CCE może być:

- wysłana z centrum sterowania i nadzoru CCMF na żądanie otrzymane z terminalu VSAT poprzez zewnętrzny kanał sygnalizacyjny CC nie należący do danej sieci VSAT,
- wysyłana w regularnych odstępach czasu przez centrum sterowania i nadzoru CCMF poprzez wewnętrzny kanał sygnalizacyjny CC,
- wysłana z centrum sterowania i nadzoru CCMF poprzez zewnętrzny kanał sygnalizacyjny CC należący do danej sieci VSAT.

O sposobie odbierania wiadomości CCE z centrum decyduje producent terminalu.

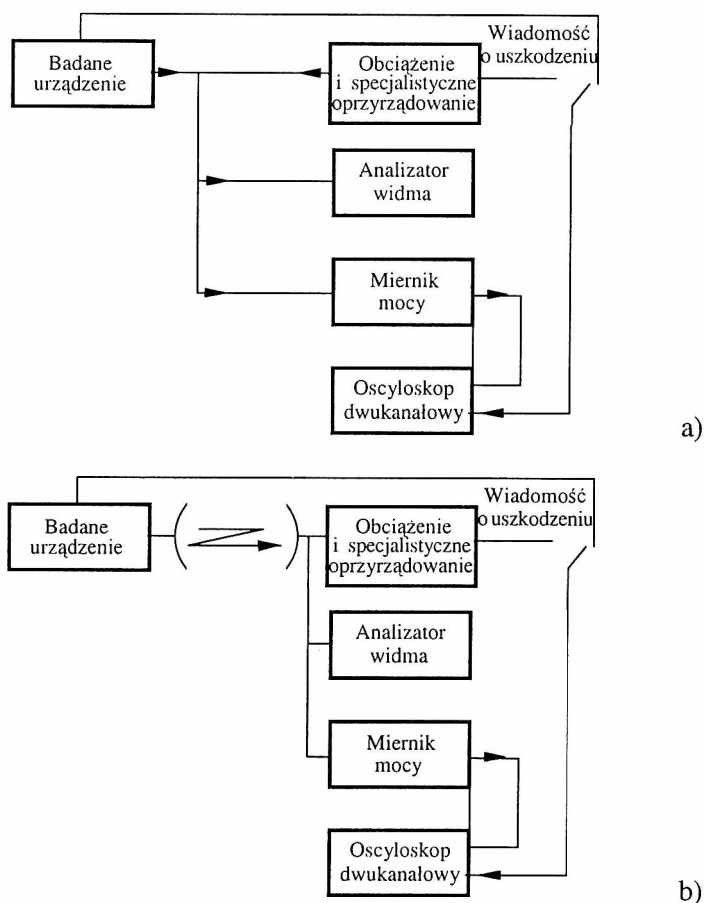
Tabela 12.1. Maksymalne czasy do blokady transmisji po zaistnieniu określonych zdarzeń

Typ zdarzenia	Maksymalny czas do blokady transmisji, s
Wykrycie niesprawności w kanale sygnalizacyjnym	33
Niemожność potwierdzenia poprawności kodu autoryzacji kanału sygnalizacyjnego	63
Wykrycie niesprawności procesora	33
Wykrycie niesprawności podsystemu nadawczego	8
Brak potwierdzenia prawidłowego odbioru wiadomości	660
Odbiór wiadomości CCD z centrum CCMF	3
Wyzerowanie rejestrów	3

12.4. SPRAWDZANIE SYSTEMU STEROWANIA I NADZORU

System sterowania i nadzoru bada się tylko dla nadawczych terminali VSAT. Badanym urządzeniem jest część domowa terminalu oraz część zewnętrzna, aż do wejścia anteny. Pomiar zastępczej mocy promieniowanej izotropowo *EIRP* należy ograniczyć do pomiaru widmowej gęstości mocy na osi głównej wiązki promieniowania w większym z pasm wyznaczonych przez pasmo nominalne lub pasmo o szerokości 10 MHz rozłożone symetrycznie względem sygnału nośnego.

Pomiary należy wykonać w układzie pomiarowym pokazanym na rysunku 12.2a, jeśli można analizować sygnał na wejściu anteny, lub na rysunku 12.2b, jeśli wejście anteny jest zintegrowane z pozostałą częścią terminalu.



Rys. 12.2. Stanowisko pomiarowe do badania systemu sterowania i nadzoru:

a) gdy dostępne jest wejście antenowe, b) gdy wejście antenowe jest zintegrowane z terminaliem

Podczas badań terminal VSAT musi nadawać sygnał nośnej. Oscyloskop dwukanałowy służy do pomiaru czasu opóźnienia reakcji terminalu VSAT na komendy lub sztucznie wywołane stany niesprawności. Analizator widma i miernik mocy mierzą poziom sygnału wyjściowego.

12.4.1. SPRAWDZENIE KANAŁU STERUJĄCEGO CC

Przed badaniami należy wpisać do sprawozdania rodzaj kanału sterującego (wewnętrzny lub zewnętrzny). W przypadku kanału zewnętrznego należy również podać sposób jego realizacji: typy interfejsów i protokołów.

Jeśli terminal VSAT jest wyposażony w wewnętrzny kanał sterujący, to należy zastosować następującą procedurę pomiarową:

- a) spowodować błędne zadziałanie systemu odbioru sygnałów z kanału sterującego,
- b) powinno to spowodować zmianę zawartości zmiennej SMV na SMF,
- c) w przedziale czasu do 33 s od chwili wystąpienia błędu terminal powinien zablokować nadawanie,
- d) na analizatorze widma oraz mierniku mocy musi zostać zaobserwowany spadek poziomu sygnału; terminal musi przejść do stanu, w którym niedozwolone jest nadawanie,
- e) należy doprowadzić system odbioru sygnałów z kanału sterującego do sprawności i sprawdzić, czy po odebraniu z centrum CCMF wiadomości o sprawności kanału sterującego CCE terminal jest przygotowany do nadawania,
- f) usunąć unikatowy kod identyfikacyjny terminalu z sygnałów nadawanych poprzez kanał sterujący,
- g) powinno to spowodować zmianę zawartości zmiennej SMV na SMF,
- h) w przedziale czasu do 63 s od chwili usunięcia kodu identyfikacyjnego terminalu powinien on zablokować nadawanie,
- i) na analizatorze widma oraz mierniku mocy musi zostać zaobserwowany spadek poziomu sygnału; terminal musi przejść do stanu, w którym niedozwolone jest nadawanie,
- j) włączyć ponownie nadawanie kodu identyfikacyjnego terminalu i sprawdzić, czy po odebraniu z centrum CCMF wiadomości o sprawności kanału sterującego CCE terminal jest przygotowany do nadawania,
- k) usunąć unikatowy kod identyfikacyjny kanału sterującego z sygnałów nadawanych poprzez kanał sterujący,
- l) powinno to spowodować zmianę zawartości zmiennej SMV na SMF,
- m) w przedziale czasu do 63 s od chwili usunięcia kodu identyfikacyjnego kanału sterującego terminal powinien zablokować nadawanie,
- n) na analizatorze widma oraz mierniku mocy musi zostać zaobserwowany spadek poziomu sygnału; terminal musi przejść do stanu, w którym niedozwolone jest nadawanie,
- o) włączyć ponownie nadawanie kodu identyfikacyjnego kanału sterującego i sprawdzić, czy po odebraniu z centrum CCMF wiadomości o sprawności kanału sterującego CCE terminal jest przygotowany do nadawania.

12.4.2. SPRAWDZENIE SYSTEMU NADZORU PROCESORÓW

Metoda badania prawidłowości reakcji systemu sterowania i nadzoru na awarię procesora jest następująca:

- a) należy po kolei spowodować awarię każdego z procesorów terminalu VSAT,
- b) rozpoznanie każdej awarii powinno spowodować zmianę zawartości zmiennej SMV na SMF,
- c) w czasie do 33 s po zaistnieniu każdej awarii terminal powinien zablokować nadawanie,
- d) na analizatorze widma oraz mierniku mocy musi zostać zaobserwowany spadek poziomu sygnału; terminal musi przejść do stanu, w którym niedozwolone jest nadawanie,
- e) procesor, w którym wywołano awarię, należy przywrócić do normalnej pracy; przed wywołaniem awarii kolejnego procesora terminal powinien normalnie pracować.

12.4.3. SPRAWDZENIE SYSTEMU NADZORU PODSYSTEMU NADAWCZEGO

Metoda badania prawidłowości reakcji systemu sterowania i nadzoru na awarię podsystemu nadawczego jest następująca:

- a) należy spowodować błędne działanie podsystemu nadawczego związane ze stabilnością częstotliwości i parametrami sygnału na wyjściu,
- b) rozpoznanie przez system nadzoru każdego błędnego zadziałania podsystemu nadawczego powinno spowodować zmianę zawartości zmiennej SMV na SMF,
- c) w przedziale czasu do 8 s od chwili wystąpienia błędu terminal powinien zablokować nadawanie,
- d) na analizatorze widma oraz mierniku mocy musi zostać zaobserwowany spadek poziomu sygnału; terminal musi przejść do stanu, w którym niedozwolone jest nadawanie,
- e) ustawić prawidłową częstotliwość nadawania oraz normalne warunki pracy terminalu przed wywołaniem kolejnego błędnego zadziałania.

12.4.4. SPRAWDZENIE PRAWIDŁOWOŚCI TRANSMISJI W SYSTEMIE NADZORU

Jeśli terminal VSAT stosuje wewnętrzny kanał sterujący i otrzymuje potwierdzenia prawidłowości transmisji z centrum CCMF, to procedura sprawdzania systemu nadzoru poprawności transmisji jest następująca:

- a) terminal VSAT musi być w stanie pracy i otrzymać z centrum CCMF poprzez kanał sterujący CC żądanie wysłania wiadomości o stanie terminalu,

13. ODPORNOŚĆ NA ZAKŁÓCENIA

Wszystkie pomiary odporności terminalu VSAT na zakłócenia dla częstotliwości poniżej 1 GHz należy wykonać zgodnie z normą ETS 300 339 [35]; jest ona normą podstawową dotyczącą badania sprzętu radioelektronicznego i stanowi rozszerzenie normy europejskiej EN 50082-1 [20], dotyczącej odporności na zakłócenia.

Odporność urządzenia na zakłócenia określa jego zdolność do niezakłóconej pracy w polu elektromagnetycznym. Badanym urządzeniem są części zewnętrzna i domowa terminalu VSAT połączone przewodem o minimalnej długości 10 m. Podczas badania terminalu pracującego z włączoną nośną należy nadawać sygnał w sposób ciągły. Moc sygnału, którą należy emitować, zależy od podanego przez producenta punktu pracy terminalu w następujący sposób:

jeden punkt pracy poniżej maksimum	– nadawać sygnał z mocą określoną przez podany punkt pracy,
określony zakres mocy wyjściowej	– nadawać sygnał z mocą w pobliżu średniej z podanego zakresu,
nieokreślony zakres mocy wyjściowej	– nadawać sygnał z mocą o 3 dB niższą od maksymalnej,
jeden punkt pracy określający moc maksymalną	– nadawać sygnał z mocą o 3 dB niższą od maksymalnej.

Poniżej częstotliwości 1 GHz terminal VSAT powinien zapewnić odpowiedni poziom odporności wewnętrznej na zakłócenia i pracować w zamierzony sposób w polu elektromagnetycznym o natężeniu określonym w tabeli 13.1.

Tabela 13.1. Wymagany poziom odporności wewnętrznej

Poziom, V/m	Zakres częstotliwości, MHz
3	80÷1000

W zakresie częstotliwości od 150 kHz do 80 MHz należy stosować wymagania zawarte w normie ETS 300 339 [35], w której znajduje się również opis procedury pomiaru odporności wewnętrznej.

W zakresie częstotliwości od 1,0 do 2,0 GHz terminal VSAT powinien zapewnić odpowiedni poziom odporności wewnętrznej na zakłócenia i pracować w zamierzony sposób w polu elektromagnetycznym o natężeniu określonym w tabeli 13.2.

Tabela 13.2. Wymagany poziom odporności wewnętrznej

Poziom, V/m	Zakres częstotliwości, MHz
3	1000÷2000

Producent może wymagać pomiarów odporności wewnętrznej terminalu VSAT w zakresie częstotliwości od 2,0 do 3,0 GHz. W zakresie tym nie obowiązują dotychczas żadne wymagania dotyczące poziomu odporności, są natomiast zalecenia.

W zakresie częstotliwości od 2,0 do 3,0 GHz zaleca się, aby terminal VSAT zapewnił odpowiedni poziom odporności wewnętrznej na zakłócenia i pracował w zamierzony sposób w polu elektromagnetycznym o natężeniu określonym w tabeli 13.3.

Tabela 13.3. Zalecany poziom odporności wewnętrznej

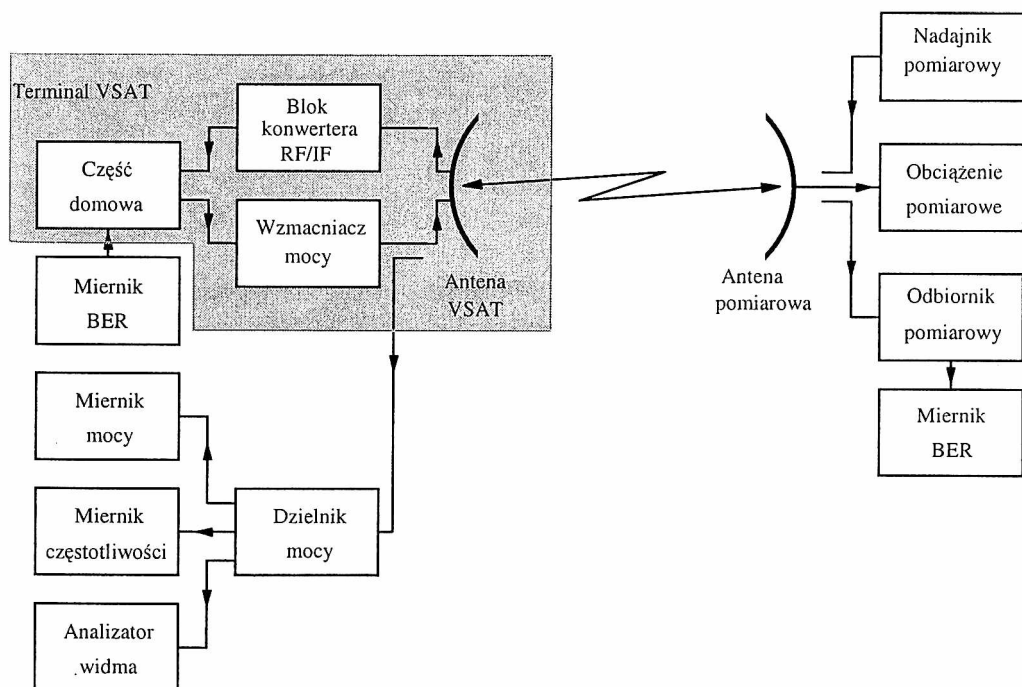
Poziom, V/m	Zakres częstotliwości, MHz
3	2000÷3000

Pomiary terminalu VSAT wykonuje się w symulatorze wytwarzającym jednorodne pole elektryczne o określonym natężeniu. Pole elektryczne powinno być modulowane do głębokości 80% przez sinusoidalny sygnał foniczny o częstotliwości 1 kHz. Częstotliwość sygnału pomiarowego zmienia się z określonym krokiem w granicach badanego pasma.

Pole elektryczne można uznać za jednorodne, jeśli amplituda nie zmienia się więcej niż 6 dB od wartości nominalnej w 75% obszarze pomiarowym.

Metoda pomiaru jest następująca:

1. Zestawić stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 13.1.



Rys. 13.1. Stanowisko do pomiaru odporności na zakłócenia

2. Podczas prowadzenia pomiarów nadawczych terminali VSAT należy sprawdzić możliwość włączania i wyłączania nośnej za pomocą sygnałów nadawanych z nadajnika pomiarowego (zdalne włączanie i wyłączanie).

3. Urządzenia pomiarowe są stosowane do sprawdzenia poprawności pracy terminalu VSAT:

a) miernik mocy mierzy moc wyjściową i sprawdza stan terminalu włączona (wyłączona) nośna oraz stałość mocy wyjściowej,

b) miernik częstotliwości mierzy częstotliwość promieniowanej nośnej przy braku modulacji,

c) analizator widma mierzy szerokość pasma transmisji,

d) odbiornik pomiarowy stosuje się do demodulacji transmitowanego sygnału,

e) dwa mierniki elementowej stopy błędów BER stosuje się do pomiaru jakości transmisji i do stwierdzenia braku obniżenia jakości przy narażaniu terminalu,

f) nadajnik pomiarowy stosuje się do sprawdzenia automatycznego włączania (wyłączania) nośnej podczas nadawania komend centralnego sterowania i nadzoru.

4. Odczyty z aparatury pomiarowej przy wyłączeniu jednorodnego pola elektrycznego podczas pracy terminalu z włączoną i wyłączoną nośną powinny być zanotowane w celu późniejszego porównania.

5. Takie same pomiary należy wykonać przy włączonym jednorodnym polu elektrycznym dla każdej krokowo zmienianej częstotliwości.

6. Dwa zbiory wyników należy porównać w celu stwierdzenia wpływu jednorodnego pola elektrycznego na pracę terminalu VSAT.

7. Uzyskane wyniki należy odnieść do następujących wymagań:

a) jakość obserwowanej transmisji jest nie gorsza od najniższej akceptowanej i deklarowanej przez producenta,

b) terminal VSAT znajdujący się w jednorodnym polu elektrycznym musi włączać i wyłączać nośną zgodnie z komendami wydawanymi przez centralny system sterowania i nadzoru CCMF,

c) podczas pracy terminalu VSAT z wyłączoną nośną nie może ulegać zmianie poziom sygnału,

d) podczas pracy terminalu VSAT z włączoną nośną nie może ulegać zmianie poziom sygnału i częstotliwość.

14. WYMAGANIA MECHANICZNE

Właściwości mechaniczne terminali nadawczych VSAT muszą być sprawdzane zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie [65]. Terminale odbiorcze mogą być również sprawdzane na życzenie producenta.

Badanym urządzeniem jest część zewnętrzna terminalu VSAT.

14.1. STABILNOŚĆ WYCELOWANIA ANTENY

Część zewnętrzna terminalu VSAT nie powinna wykazywać żadnych stałych odkształceń ani wymagać powtórnego wycelowania przy obciążeniu wiatrem o maksymalnej prędkości 100 km/h z porywami trwającymi 3 s o prędkości 130 km/h.

Zgodność terminalu z wymienionymi wymaganiami sprawdza się podczas pomiarów odporności konstrukcji na wiatr.

14.2. DOKŁADNOŚĆ WYCELOWANIA ANTENY

Konstrukcja anteny musi umożliwić wycelowanie osi głównej wiązki promieniowania anteny w kierunku orbity geostacjonarnej z błędem nie większym niż błąd wycelowania powodujący spadek zysku energetycznego anteny o 1 dB dla wszystkich częstotliwości z pasma pracy terminalu i w całym zakresie zmienności azymutu i kąta elewacji dostępnym dla anteny. Dla anten z niesymetryczną wiązką dokładność ustawienia osi obrotu względem osi głównej wiązki musi być lepsza niż $0,5^\circ$. Nie ma szczegółowych wymagań dotyczących stanowiska pomiarowego. Metoda weryfikacji jest następująca:

- a) należy sprawdzić czy terminal jest wyposażony w elementy służące do precyzyjnego ustawienia osi azymutu (zgrubne wycelowanie umożliwiają elementy mocujące),
- b) sprawdzić elementy regulacyjne służące do ustawienia i aretowania azymutu.
- c) sprawdzić stałość aretowania,
- d) powtórzyć badanie dla osi elewacji.

14.3. USTAWIANIE POLARYZACJI

Terminal powinien umożliwić ustawienie kąta polaryzacji w zakresie minimalnym 180° . Błąd ustawienia kąta polaryzacji w tym zakresie nie powinien być większy niż 1° . Nie ma szczegółowych wymagań dotyczących stanowiska pomiarowego.

Metoda weryfikacji jest następująca:

- a) sprawdzić elementy służące do ustawienia i aretowania kąta polaryzacji,
- b) sprawdzić stałość elementów służących do aretowania.

15. KOORDYNACJA MIEJSCA I CZĘSTOTLIWOŚCI TERMINALI VSAT

Naziemne stacje satelitarne VSAT oraz naziemne stacje satelitarne służby reporterskiej SNG podlegają w większości krajów europejskich zliberalizowanym wymaganiom związanym z koordynacją miejsca i częstotliwości. Dlatego stwierdzenie, często wykorzystywane do reklamowania tych systemów, o możliwości instalowania ich w dowolnym miejscu nie odpowiada w pełni istniejącej sytuacji.

Obecnie trwają intensywne badania związane z opracowaniem obowiązujących w Europie wymagań dotyczących ochrony urządzeń elektronicznych i awioniki instalowanej na pokładzie statków powietrznych przed zakłóceniami pochodzącymi od terminali VSAT oraz SNG instalowanymi w pobliżu lotnisk. Na spotkaniu Grupy Roboczej Inżynierii Widma WG-SE Europejskiego Komitetu Radiokomunikacyjnego ERC, które odbyło się w Sesimbra w styczniu 1997 roku postanowiono, że administracja duńska zajmie się zbieraniem wszelkich informacji związanych z dotychczasowymi sposobami zabezpieczenia statków powietrznych przed wpływem zakłóceń wytwarzanych przez terminale VSAT i SNG. Ponadto administracje krajów europejskich zostały poproszone o nawiązanie kontaktu z krajowymi oddziałami administracji lotnictwa cywilnego i uzyskanie informacji na temat prowadzonych analiz i pomiarów. Większość administracji ma dotychczas niewielkie doświadczenie i organizuje systemy zbierania danych o występujących zakłóceniach w systemach elektronicznych zainstalowanych na pokładzie statków powietrznych. Ze względu na fakt, że część lotnisk w Europie jest zlokalizowana w pobliżu granic, problem musi być rozwiązany na szczeblu międzynarodowym na forum Międzynarodowej Organizacji Lotnictwa Cywilnego ICAO. Jedynie duńska administracja podjęła konkretne działania i zabroniła instalować terminale satelitarne w określonych obszarach wokół lotniska w Kopenhadze. Odległość pomiędzy statkiem powietrznym a terminalem satelitarnym nie może być mniejsza niż 500 m. Przyjęto dopuszczalny poziom natężenia pola elektrycznego sygnału zakłócającego równy 50 V/m.

W Wielkiej Brytanii Agencja Radiokomunikacyjna opracowała specjalne procedury oraz wymagania związane z upoważnieniem danej naziemnej stacji satelitarnej do nadawania [69]. Procedury te dotyczą warunków niezbędnych do uzyskania upoważnienia do nadawania przez przenośną naziemną stację satelitarną (ang. *transportable satellite earth station*) i ziemski ruchomy terminal satelitarny (ang. *land mobile satellite terminal*). Polegają one na koordynacji miejsca (*site clearance*) i częstotliwości (*frequency clearance*).

15.1. KOORDYNACJA MIEJSCA

W celu zapewnienia bezpiecznej pracy przenośnych stacji satelitarnych nadających w zakresie częstotliwości 14,0÷14,5 GHz i ochrony innych użytkowników widma elektromagnetycznego należy zwrócić uwagę na spełnienie pewnych wymagań:

1. Antena musi być ustawiona w taki sposób, aby kąt pomiędzy wszelkimi dostępnymi dla ludności miejscami a główną wiązką był większy niż 5° .

2. Antena musi być ustawiona w taki sposób, aby kąt pomiędzy wszelkimi masztami, na których zainstalowano sprzęt telekomunikacyjny, a główną wiązką był większy niż 10° .

3. Antena musi mieć wbudowany mechanizm uniemożliwiający ustawienie jej pod kątem elewacji mniejszym niż 10° lub uniemożliwiający transmisję, gdy kąt ten jest mniejszy niż 10° .

4. Przenośna naziemna stacja satelitarna nie może być usytuowana bliżej niż 100 m od wszelkich instalacji radiowych pracujących na częstotliwościach różniących się od częstotliwości nośnej stacji lub terminalu o mniej niż ± 250 MHz; jeśli instalacje te znajdują się w sektorze kątów mniejszych niż $\pm 45^\circ$ od osi głównej wiązki stacji lub terminalu, to minimalna odległość wzrasta do 200 m.

5. Naziemna stacja nie może być usytuowana pod liniami energetycznymi.

6. Obsługa musi zapewnić takie warunki pracy stacji, aby obszary, w których gęstość mocy pola elektromagnetycznego przekracza 100 W/m^2 (strefa niebezpieczna) były niedostępne dla ludności.

7. Obsługa powinna unikać lokalizowania stacji lub terminalu w pobliżu lądowisk dla śmigłowców.

8. Jeśli stacja satelitarna jest zlokalizowana w pobliżu stacji linii radiowych, to należy ją umieścić od strony południowej tak, aby wiązka promieniowana w kierunku satelity była odległa od linii radiowej.

Ponadto wskazane jest zwrócenie uwagi na:

1. Możliwość nieoczekiwanego zapłonu łatwopalnych gazów na skutek promieniowania elektromagnetycznego [10].

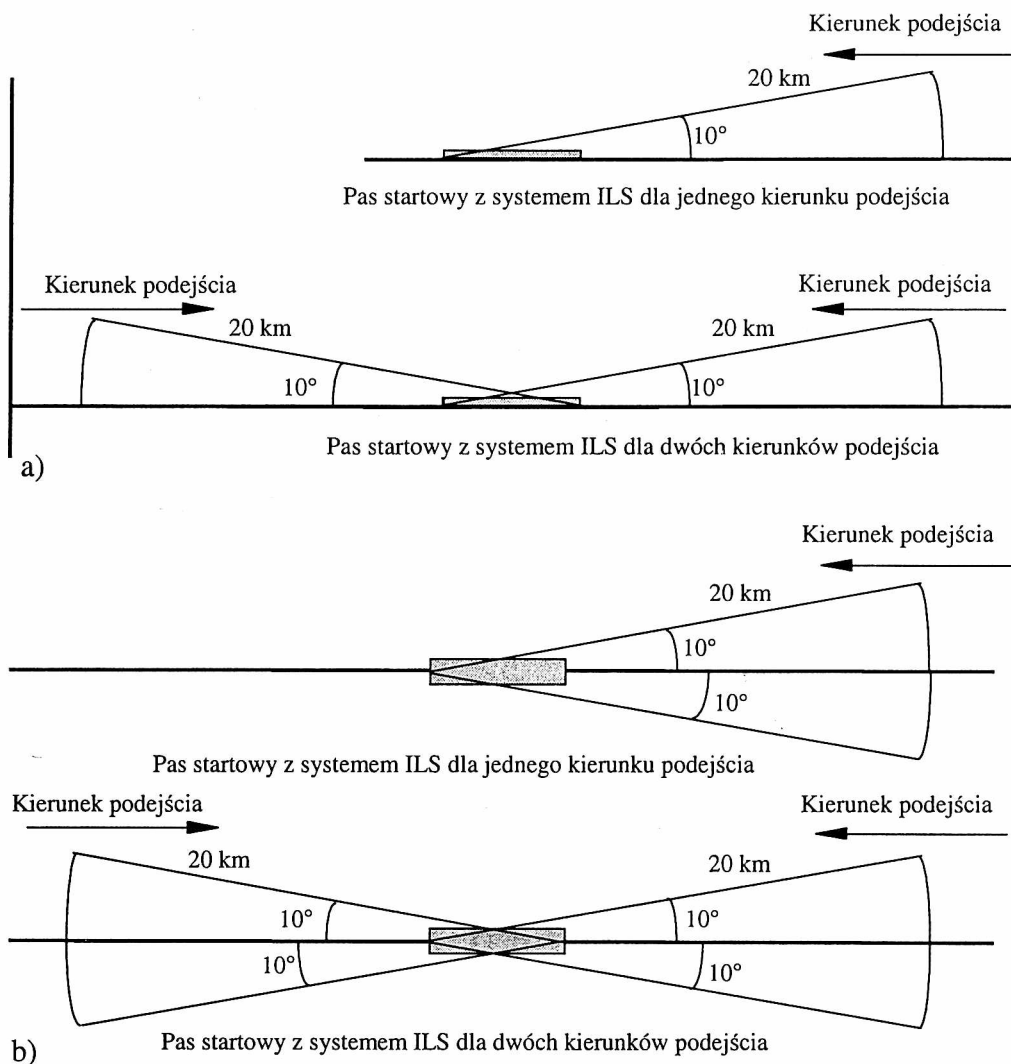
2. Możliwość nieoczekiwanego zapłonu urządzeń wybuchowych o zapłonie elektrycznym na skutek promieniowania elektromagnetycznego [11].

3. Praktykę inżynierską dotyczącą miejsc lokalizacji stacji satelitarnych zawartą w publikacji [68].

Dla przenośnych stacji satelitarnych istnieją dodatkowe, specyficzne wymagania związane z pracą w obszarze i w pobliżu lotnisk cywilnych. Przede wszystkim wymaga się powiadomienia odpowiednich służb o planowanym działaniu takiej stacji, jeśli jest ona zlokalizowana w odległości mniejszej niż 20 km od punktu odniesienia lotniska wyposażonego w system lądowania ILS. Stacja satelitarna VSAT nie może rozpocząć nadawania bez wcześniejszego powiadomienia osoby wyznaczonej do tego celu przez władze lotniska. Powiadomienie powinno zawierać co najmniej następujące informacje:

- a) pozycję, w której umiejscowiona jest stacja,
- b) azymut i kąt elewacji głównej wiązki promieniowania,
- c) przewidziany termin i czas transmisji.

Lotnisko może nie zaakceptować zgłoszonych warunków pracy terminalu. W takim przypadku operator jest w pełni odpowiedzialny za pracę terminalu i wszelkie dające się przewidzieć zjawiska z tym związane.



Rys. 15.1. Przekrój pionowy (a) i poziomy (b) przestrzeni chronionej dla pasa startowego z systemem ILS dla jednego kierunku podejścia i pasa startowego z systemem ILS dla obu kierunków podejścia

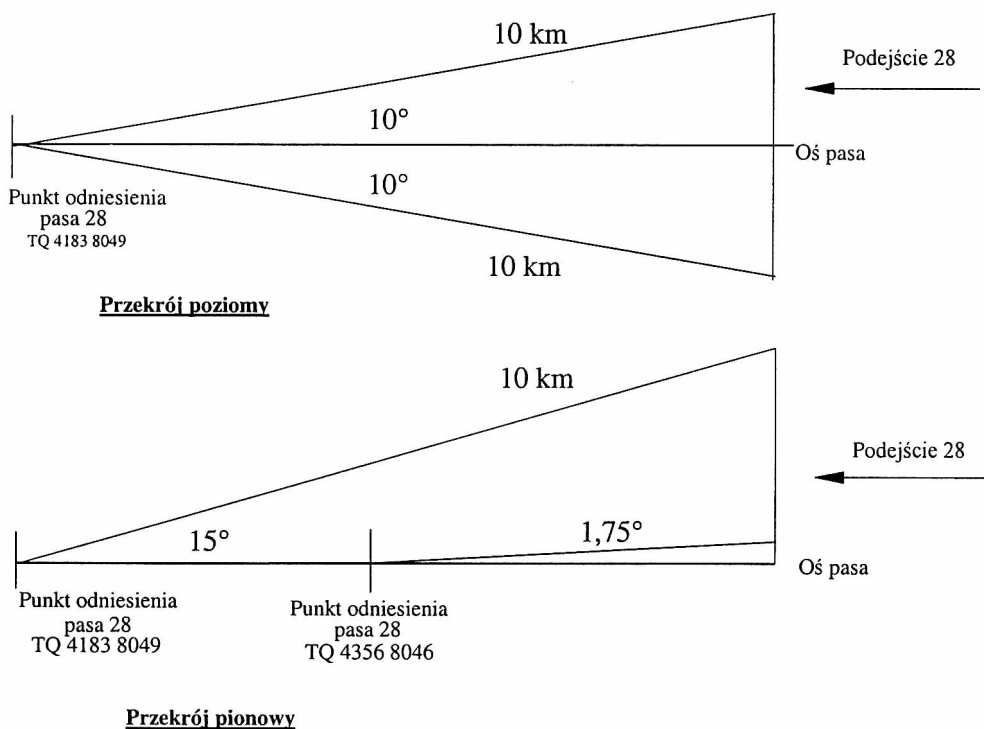
Wokół każdego lotniska wyposażonego w system lądowania ILS znajduje się tzw. przestrzeń chroniona. W zależności od miejsca lokalizacji stacji w stosunku do lotniska, transmitowana wiązka przechodzi lub nie przechodzi przez przestrzeń chronioną. W celu sprawdzenia tego należy wcześniej powiadomić odpowiednią osobę wyznaczoną przez władze lotniska. Powiadomienie powinno zawierać co najmniej następujące informacje:

- pozycję, w której umiejscowiona jest stacja,
- azymut i kąt elewacji głównej wiązki promieniowania,
- przewidziany termin i czas transmisji.

Pozwala to operatorowi oraz przedstawicielowi lotniska na analizę sytuacji i określenie, czy istnieje zagrożenie dla samolotów. Zainteresowane lotnisko ma możliwość opiniowania proponowanej pracy terminalu i wywołanych tą pracą zagrożeń. Lotnisko może nie zaakceptować zamierzonej pracy terminalu.

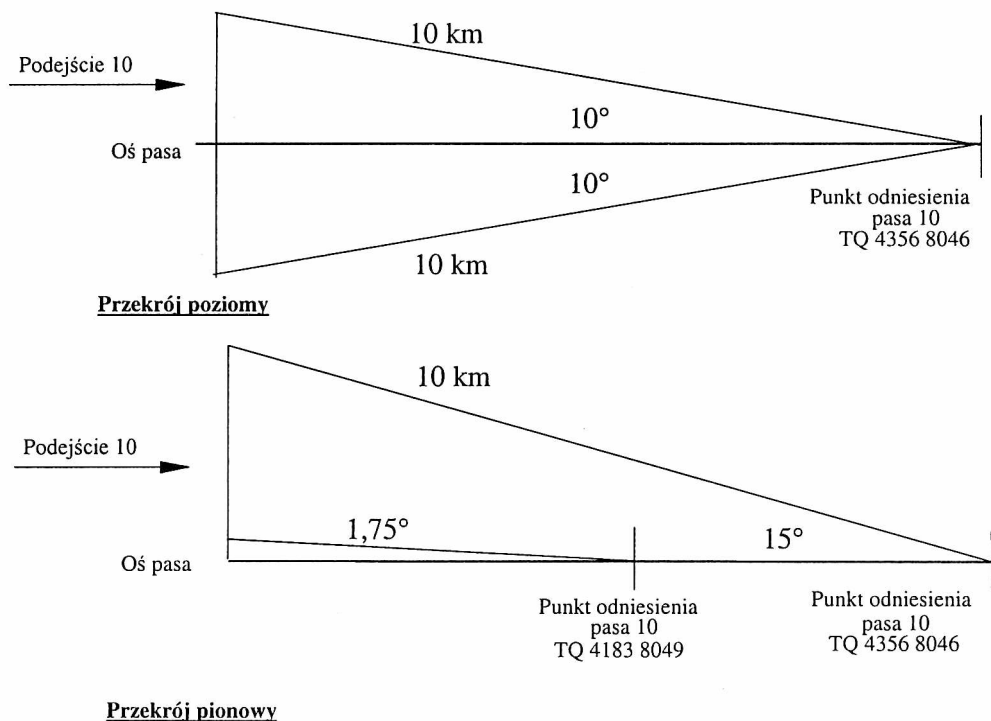
Przestrzeń chroniona jest wyznaczona w płaszczyźnie poziomej przez kąty $\pm 10^\circ$ od osi pasa startowego o wierzchołkach na końcu(ach) pasa startowego i rozszerzające się w kierunku podejścia (podejść) samolotu do odległości 20 km, a w płaszczyźnie pionowej ogranicza ją kąt (lub kąty) o nachyleniu 10° do poziomu rozszerzający się w kierunku podejścia samolotu do odległości 20 km. Tak zdefiniowaną przestrzeń chronioną pokazano na rysunkach 15.1 i 15.2.

Dla niektórych lotnisk definicja przestrzeni chronionej jest nieco zmodyfikowana. Jako przykład pokazano na rysunkach 15.2 i 15.3 definicję przestrzeni chronionej dla lotniska London City.



Rys. 15.2. Kształt przestrzeni chronionej dla pasa startowego 28 lotniska London City

Praca terminali VSAT nie może zakłócać pracy innych urządzeń radiokomunikacyjnych znajdujących się w pobliżu lotniska lub stanowiących elementy innych systemów radiowych. W przypadku Londynu należy zapewnić niezakłóconą pracę radaru portowego pracującego w zakresie częstotliwości 14,0÷14,3 GHz i zlokalizowanego w Corytown (w porcie nad Tamizą).



Rys. 15.3. Przestrzeń chroniona dla pasa startowego 10 lotniska London City

15.2. KOORDYNACJA CZĘSTOTLIWOŚCI

Dla wszystkich stacji naziemnych agencja dopuszcza stosowanie częstotliwości nadawczych w zakresie $1625,5 \div 1645,5$ MHz i $14,0 \div 14,25$ GHz. Można również uzyskać bez większych problemów zezwolenie na pracę w zakresie od 14,25 do 14,5 GHz pod warunkiem, że zgłoszenie zostanie nadesłane z miesięcznym wyprzedzeniem.

15.3. UPOWAŻNIENIE DO TRANSMISJI

Agencja Radiokomunikacyjna Wielkiej Brytanii opracowała specjalne procedury umożliwiające uzyskanie upoważnienia do transmisji za pomocą naziemnych przenośnych i ruchomych stacji satelitarnych. Procedury te w znaczny sposób skracają czas oczekiwania na licencję. W procesie przydziału licencji brane są pod uwagę następujące zagrożenia:

- zakłócanie lotniczych systemów ILS oraz elektronicznych urządzeń pokładowych na śmigłowcach podczas lądowania,

- możliwość wywołania zapłonu łatwo palnych gazów,
- możliwość wywołania zapłonu urządzeń wybuchowych o zapłonie elektrycznym,
- możliwość zakłócania innych urządzeń radiokomunikacyjnych,
- powstanie strefy niebezpiecznej, w której gęstość promieniowania przekracza 100 W/m^2 i w której zabronione jest przebywanie ludzi,
- możliwość zakłócania linii radiowych,
- możliwość przebywania ludzi w polu o gęstości przekraczającej normy bezpieczeństwa.

Opracowane procedury szczegółowo opisują czynności, które jest obowiązany wykonać ubiegający się o licencję. Narzucają one również ramy czasowe, w których rozpatrzone powinno być jego zgłoszenie. Ułatwia to znacznie planowanie i umożliwia szerokie rozpowszechnienie usług związanych z transmisją satelitarną.

16. KOMPATYBILNOŚĆ NAZIEMNYCH STACJI SATELITARNYCH VSAT Z SYSTEMAMI LOTNICZYMI

Naziemne stacje satelitarne DB VSAT oraz stacje reporterskie SNG mogą stanowić zagrożenie dla systemów lotniczych, dlatego też niezwykle ważne jest przeanalizowanie wpływu tych stacji na systemy lotnicze, w tym głównie na system ILS.

Piloci samolotów wyposażonych w elektroniczne systemy sterowania i nawigacji zauważyli nieprawidłową pracę tych systemów (czasem powodującą poważne problemy) w czasie przelatywania w pobliżu telewizyjnych i radiofonicznych stacji nadawczych dużej mocy. Informacje zbierane w organizacjach zajmujących się bezpieczeństwem lotów samolotów cywilnych, np. CAA, pokazują, że nieprawidłowości w pracy elektronicznych instrumentów pokładowych w pewnych obszarach są tak częste, że nie są one formalnie zgłaszane odpowiednim władzom. W niektórych krajach doprowadziło to do wydzielenia obszarów o dużej intensywności transmisji radiowych, w których są zakazane loty samolotów. Przykładem może być Wielka Brytania, w której takie obszary – określane skrótem HIRTA – zostały wydzielone przez Ministerstwo Obrony. Nie zezwala ono na loty samolotów wojskowych w tych obszarach, które są zazwyczaj ograniczone bliską strefą promieniowania anteny.

Szybki rozwój systemów stosujących naziemne przewoźne stacje satelitarne SNG i terminale satelitarne VSAT zmusił Ministerstwo Obrony i Inspektorat Lotnictwa Cywilnego w Wielkiej Brytanii do współpracy z Agencją Radiokomunikacyjną i zajęcia się problemem kompatybilności elektromagnetycznej pomiędzy małymi naziemnymi stacjami satelitarnymi a systemem ILS. Agencja Radiokomunikacyjna opracowała dokument określający praktyczne zasady postępowania w pobliżu lotnisk oraz określiła przestrzeń chronioną dla lotnisk cywilnych. Dokument ten omówiono w poprzednim rozdziale. Agencja Radiokomunikacyjna odpowiada za wydanie upoważnienia do nadawania, dlatego też, jeśli transmisja musi odbywać się w przestrzeni chronionej, to Agencja musi się skonsultować i uzyskać pozwolenie na wydanie upoważnienia zarówno w Ministerstwie Obrony, jak i Inspektoracie Lotnictwa Cywilnego.

W niektórych krajach europejskich o niskim zaludnieniu można dopuścić ryzyko związane ze swobodnym przemieszczaniem terminali VSAT i SNG. Wielka Brytania nie zalicza się jednak do tej kategorii krajów. Ponadto obszary, w których samoloty wojskowe mogą latać na niskich pułapach, są już zagrożone i dalsze restrykcje związane z promieniowaniem elektromagnetycznych naziemnych stacji satelitarnych mogą w znacznym stopniu utrudnić planowanie lotów i powodować zwiększenie ich uciążliwości dla zamieszkujących rejony, gdzie takie loty są jeszcze dozwolone.

Komisja Unii Europejskiej opracowuje propozycje swobodnego przemieszczania terminali VSAT i SNG na obszarze Unii jako konsekwencję prawa europejskiego (*Single European Act*). Dlatego też celem analizy jest dostarczenie informacji umożli-

liwiającej opracowanie odpowiedniej metodyki postępowania związanej ze stosowaniem terminali VSAT i SNG.

16.1. PODATNOŚĆ APARATURY ELEKTRONICZNEJ ZAINSTALOWANEJ NA POKŁADZIE STATKU POWIETRZNEGO

Podatność aparatury pokładowej na promieniowanie elektromagnetyczne od dawna stanowi przedmiot wielu norm międzynarodowych i narodowych. Wśród nich najważniejsze z punktu widzenia polskiej administracji są normy europejskie, normy opracowane przez NATO, jak również szczegółowe normy Inspektoratu Lotnictwa Cywilnego (CAA) związane z systemem wspomagania lądowania ILS.

16.1.1. NORMY EUROPEJSKIE

Norma europejska EUROCAE 14 [39, 40, 55] ulegała kolejnym modyfikacjom. W wydaniu z 1984 roku tzw. ED-14B urządzenia podzielono na trzy kategorie: Z, A i B. Do urządzeń kategorii Z zalicza się urządzenia, dla których pożądane jest zapewnienie pracy w niezakłóconych warunkach. Dla urządzeń kategorii A i B zakłócenia powinny być poniżej tolerowanych poziomów.

W zakresie częstotliwości od 960 do 1215 MHz podatność określana jest w stosunku do sygnału modulowanego z głębokością 30% o poziomie zależnym od kategorii badanego urządzenia:

klasa Z	1 V/m,
klasa A	125 mV/m,
klasa B	35,5 mV/m.

W grudniu 1989 roku przyjęta została norma EUROCAE ED-14C, która zastąpiła wcześniejszą normę EUROCAE ED-14B. W nowej wersji wyróżniono następujące kategorie sprzętu lotniczego:

W i Y – stosowany w warunkach, kiedy mogą wystąpić silne pola elektromagnetyczne lub na statkach powietrznych zbudowanych z niemetalicznych materiałów (*severe environments or non metallic aircraft*),

V – stosowany w przeciętnych polach elektromagnetycznych (*moderate*),

U – stosowany w środowisku częściowo zabezpieczonym przed promieniowaniem elektromagnetycznym (*partially protected environment*),

T – stosowany w środowisku dobrze zabezpieczonym przed promieniowaniem elektromagnetycznym (*well protected environment*),

X – stosowany w środowisku, w którym efekty spowodowane promieniowaniem elektromagnetycznym są nieistotne lub nie mają zastosowania (*insignificant or non applicable em effects*).

Dla wcześniej wymienionych kategorii obowiązują minimalne poziomy wrażliwości, które bada się za pomocą sygnału modulowanego do głębokości > 90% przebiegiem prostokątnym o częstotliwości 1 kHz. Poziomy te są następujące:

- kat. Y – 200 V/m dla częstotliwości do 18 GHz,
- kat. W – 100 V/m dla częstotliwości do 18 GHz,
- kat. V – 50 V/m dla częstotliwości do 1,215 GHz,
- kat. U – 20 V/m dla częstotliwości do 1,215 GHz,
- kat. T – 5 V/m dla częstotliwości do 1,215 GHz.

Wzrastająca liczba transmisji radiowych cechujących się wysoką intensywnością promieniowania spowodowała wzrost liczby odnotowanych zakłóceń elektronicznej aparatury pokładowej, dlatego w ramach dwóch międzynarodowych organizacji normalizacyjnych EUROCAE i SAE utworzono grupy robocze mające na celu weryfikację istniejących poziomów i określenie aktualnego zagrożenia elektromagnetycznego dla lotniczych systemów elektronicznych. Kluczowym zagadnieniem stało się określenie odpowiednich poziomów promieniowania, dobrze odzwierciedlających rzeczywiste zagrożenia, przy których aparatura lotnicza będzie prawidłowo pracowała. Poziomy te określono dla trzech rodzajów środowiska (*environmental conditions*) stosowanych podczas badania aparatury pokładowej:

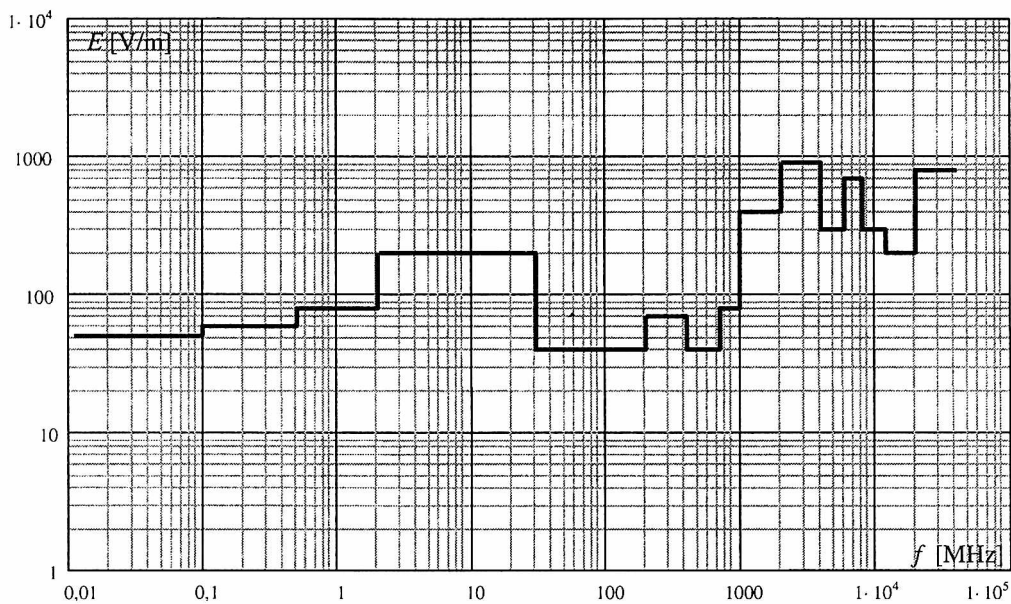
- środowisko, w którym występują silne pola elektromagnetyczne (*severe environment*),
- środowisko służące do certyfikacji (*certification environment*),
- środowisko przeciętne (*normal environment*).

Dla każdego rodzaju środowiska podano dopuszczalne wartości szczytowe oraz średnie natężenia pola elektromagnetycznego w funkcji częstotliwości. Wartości szczytowe dotyczą podatności na zakłócenia od systemów pracujących impulsowo, np. radarów. Na podkreślenie zasługuje fakt, że przy wyborze poziomów uwzględniono promieniowanie wytwarzane przez pracujące terminale VSAT oraz SNG. Prezentowane wartości stanowią propozycję JAA i są zawarte w raporcie z prac komisji z dnia 18 stycznia 1993 roku. Po akceptacji włączone zostaną do normy europejskiej EUROCAE ED-14 [39, 40].

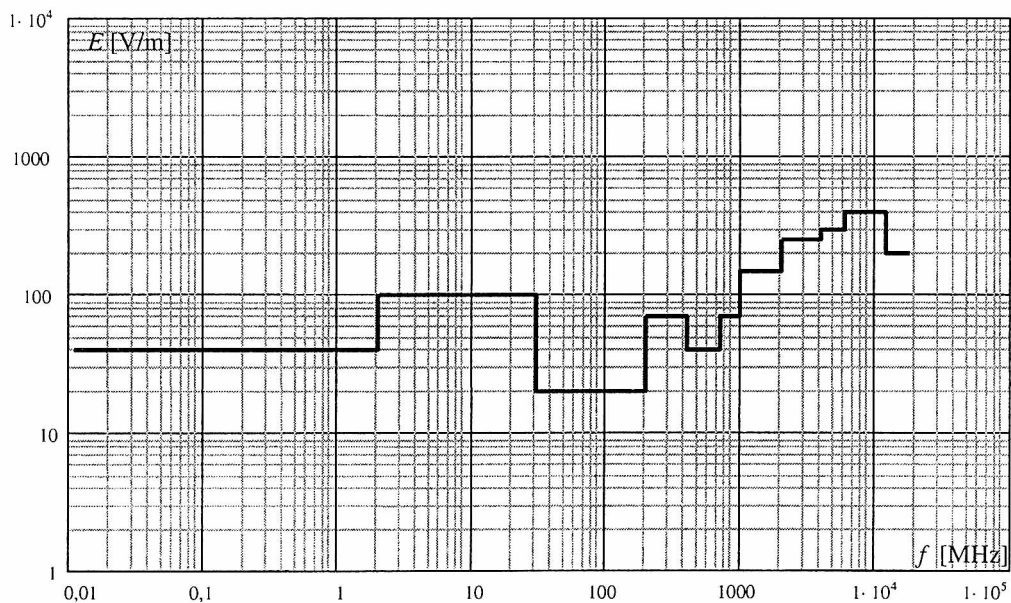
W zakresie częstotliwości od 14 do 14,5 GHz, w którym pracują w Europie terminale VSAT i SNG, dopuszczalne wartości natężenia pola przedstawiono w tabeli 16.1.

Tabela 16.1. Zestawienie dopuszczalnych poziomów natężenia pola w paśmie 14÷14,5 GHz według EUROCAE

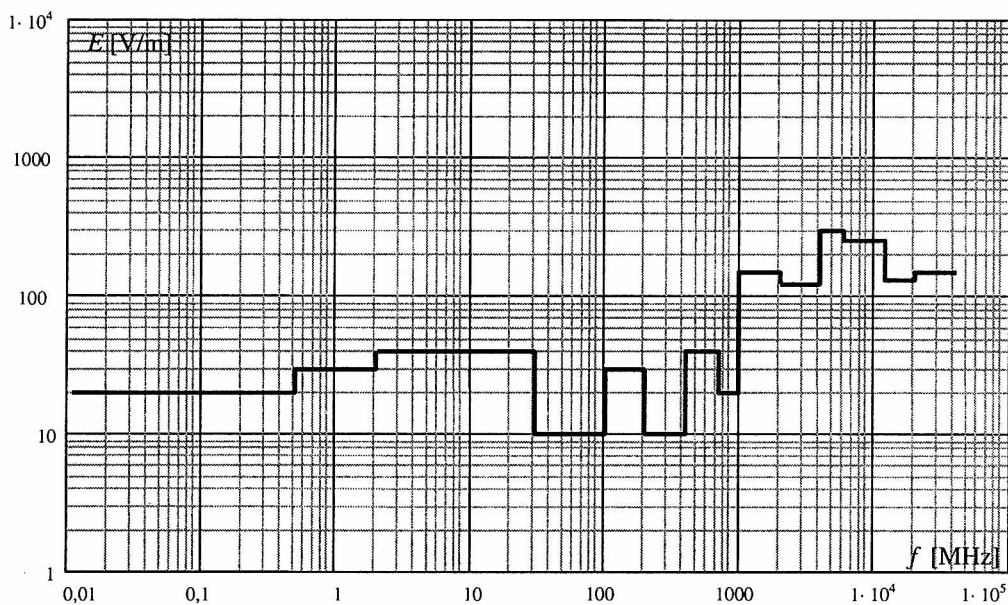
Rodzaj środowiska	Wartość szczytowa V/m	Wartość średnia V/m
Silne pola	4000	200
Środowisko do certyfikacji	2000	200
Środowisko przeciętne	700	130



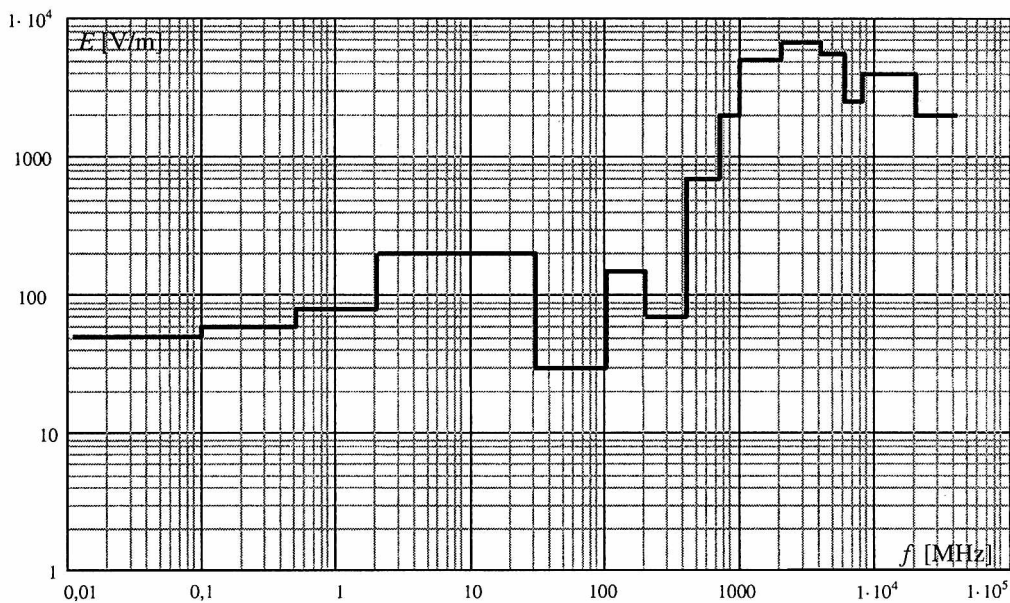
Rys. 16.1. Dopuszczalne średnie wartości natężenia pola elektromagnetycznego (środowisko, w którym występują silne pola) dla sprzętu lotniczego według EUROCAE JAA (93-01-18)



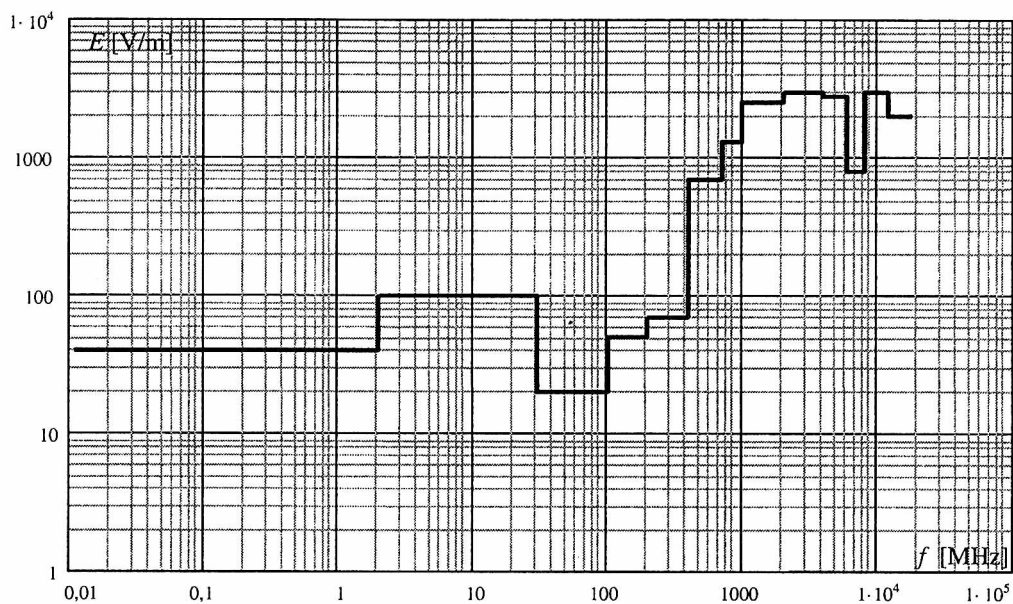
Rys. 16.2. Dopuszczalne średnie wartości natężenia pola elektromagnetycznego (środowisko stosowane do certyfikacji) dla sprzętu lotniczego według EUROCAE JAA (93-01-18)



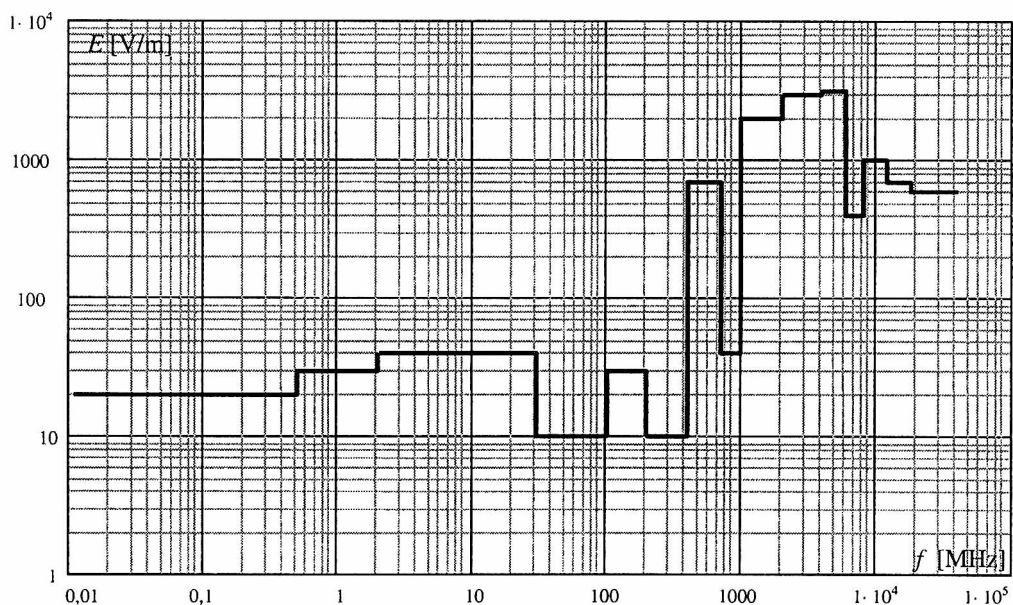
Rys. 16.3. Dopuszczalne średnie wartości natężenia pola elektromagnetycznego (środowisko przeciętne) dla sprzętu lotniczego według EUROCAE JAA (93-01-18)



Rys. 16.4. Dopuszczalne szczytowe wartości natężenia pola elektromagnetycznego (środowisko, w którym występują silne pola) dla sprzętu lotniczego według EUROCAE JAA (93-01-18)



Rys. 16.5. Dopuszczalne szczytowe wartości natężenia pola elektromagnetycznego (środowisko stosowane do certyfikacji) dla sprzętu lotniczego według EUROCAE JAA (93-01-18)



Rys. 16.6. Dopuszczalne szczytowe wartości natężenia pola elektromagnetycznego (środowisko przeciętne) dla sprzętu lotniczego według EUROCAE JAA (93-01-18)

16.1.2. NORMY OPRACOWANE PRZEZ NATO

Normalizacyjne uzgodnienia związane z kompatybilnością elektromagnetyczną w ramach krajów NATO są zawarte w dokumentach STANAG. Zawierają one jedynie podstawowe kryteria, których kraje członkowskie zgodziły się przestrzegać i które znajdują swoje odzwierciedlenie w narodowych dokumentach normalizacyjnych i zaleceniach kompatybilnościowych związanych zazwyczaj z obronnością. Pierwszy dokument STANAG 3516 [59] związany z kompatybilnością elektromagnetyczną aparatury elektrycznej i elektronicznej instalowanej na pokładzie statków powietrznych ukazał się w 1977 roku. W dokumencie tym określono wytrzymałość na narażenia elektromagnetyczne aparatury instalowanej na zewnątrz i wewnątrz statku powietrznego:

20 V/m – dla aparatury instalowanej na zewnątrz,

10 V/m – dla aparatury instalowanej wewnątrz statku powietrznego,

200 V/m – dla specyficznej aparatury.

Poziomy te obowiązywały w zakresie częstotliwości od 10 kHz do 12,4 GHz.

Sygnałem testowym w zakresie częstotliwości od 200 MHz do 12,4 GHz był sygnał z modulacją impulsową o szerokości impulsu 10 μ s i o częstotliwości powtarzania 400 lub 1000 Hz. Dopuszczono również do badania sygnał z modulacją amplitudy o głębokości 80% przebiegiem sinusoidalnym o częstotliwości 400 lub 1000 Hz.

W 1983 roku ukazała się nowa, poprawiona wersja normy STANAG 3516, w której do testowania stosuje się sygnał z modulacją impulsową o szerokości impulsu 1 μ s i częstotliwości powtarzania 1 kHz w zakresie częstotliwości od 1 do 40 GHz.

W 1987 roku ukazała się norma STANAG 3614 [60] dotycząca kompatybilności elektromagnetycznej systemów lotniczych. Norma ta określała środowisko elektromagnetyczne w następujący sposób:

lotniska cywilne w USA typowe środowisko o charakterze impulsowym

10 kV/m – dla częstotliwości od 1 do 3 GHz,

1 kV/m – dla częstotliwości od 3 do 30 GHz,

okręty (*naval*) środowisko o charakterze impulsowym (wartości szczytowe)

614 V/m – dla częstotliwości od 0,79 do 18 GHz,

195 V/m – dla częstotliwości od 18 do 40 GHz,

ciągłe pola zakłócające 200 V/m – dla częstotliwości od 0,4 do 2 GHz,

(*cw rf fields*) 2 kV/m – dla częstotliwości od 2 do 40 GHz.

16.1.3. WOJSKOWE NORMY AMERYKAŃSKIE MIL-STD-461

Normy amerykańskie ulegały kilkakrotnym modyfikacjom w okresie od 1986 roku. W pierwotnej normie (1986) określono jedynie, że poziom podatności (odporności) w zakresie częstotliwości od 14 kHz do 10 GHz wynosi 1 V/m. Wraz z wprowadzaniem nowych systemów poziom ten okazał się niewystarczający. W wydaniu C normy z 1986 roku aparatura została podzielona ze względu na zastosowanie. Dla

klasy A1b, do której należy aparatura instalowana na pokładzie statków powietrznych z metalowym kadłubem, poziomy są następujące:

20 V/m dla częstotliwości od 14 kHz do 2 MHz,

20 V/m dla częstotliwości od 2 MHz do 10 GHz,

20 V/m dla częstotliwości powyżej 10 GHz.

Poziom 200 V/m obowiązuje w całym rozważanym zakresie częstotliwości dla aparatury instalowanej wewnątrz statków powietrznych wykonanych z niemetalicznych materiałów oraz dla aparatury instalowanej na zewnątrz.

16.1.4. NORMA CAP 208 DOTYCZĄCA RADIOWEJ APARATURY POKŁADOWEJ

Norma CAP 208 [24] powstała w 1978 roku i podlegała kolejnym modyfikacjom. Zawiera jedynie wymagania podstawowe dotyczące elementów stanowiących część systemu wspomagania lądowania ILS. Do elementów tych należy wskaźnik lokalizacji (*ILS localiser*), radiowy miernik odległości i radiowy miernik wysokości. Norma CAP 208 opiera się, w odniesieniu do wymagań kompatybilnościowych, głównie na wcześniej przedstawionej normie ED-14. Poczynione zmiany są związane z lepszym dopasowaniem niektórych kryteriów do charakterystyk operacyjnych badanych elementów.

Wskaźnik lokalizacji pracuje w zakresie częstotliwości od 108 do 112 MHz. Poziom wejściowy sygnał powinien zawierać się w zakresie od 50 do 1000 μV . Odpowiedź wskaźnika lokalizacji na sygnały niepożądane o częstotliwościach od 90 kHz do 1500 MHz (z wyłączeniem pasma użytecznego od 108 do 112 MHz) powinna być o 60 dB niższa niż dla sygnału użytecznego zmodulowanego do głębokości 30% przebiegiem o częstotliwości 150 Hz.

Urządzenie ścieżki podejścia (*glidepath element*) pracuje w zakresie częstotliwości od 328,6 do 335,4 MHz, powinno wykazywać taką samą odporność na sygnały niepożądane jak wskaźnik lokalizacji.

Mikrofalowy system wspomagania lądowania MLS, który w przyszłości może zastąpić system ILS, pracuje w zakresie częstotliwości od 5031 do 5090 MHz. System ten nadaje dane z szybkością 15 625 b/s. Czas trwania bitu wynosi zatem 64 μs . Poziomy podatności dla tego systemu podano w normie ED-14.

Radiowy miernik odległości powinien spełniać wymagania związane z poziomem podatności na zakłócenia o charakterze ciągłym w zakresie częstotliwości od 90 kHz do 10 GHz. Wrażliwość miernika nie powinna pogorszyć się o więcej niż 3 dB przy obecności na wejściu ciągłego sygnału sinusoidalnego o poziomie -40 dBm (odpowiada to 100 nW lub 2,25 mV na 50-omowym wejściu).

Radiowy miernik wysokości jest zbudowany z nadajnika i odbiornika. Pracuje w zakresie częstotliwości od 4,2 do 4,4 GHz. Urządzenie to powinno mieć zdolność tłumienia sygnałów pozapasmowych w zakresie częstotliwości, w którym pracują terminale VSAT i SNG do poziomu wynoszącego -25 dBm (odpowiada to 3,2 μW lub 12,5 mV na 50-omowym wejściu).

16.1.5. TENDENCJE W USTALANIU POZIOMÓW PODATNOŚCI APARATURY ELEKTRONICZNEJ NA POKŁADZIE STATKU POWIETRZNEGO

Przegląd i analiza standardów i zaleceń kompatybilnościowych pokazuje, że do 1967 roku nie było, a w najlepszym razie były bardzo ograniczone i słabo zdefiniowane kryteria podatności na promieniowane sygnały zakłócające. W latach osiemdziesiątych poziom podatności aparatury pokładowej wynoszący dla lotnictwa cywilnego 1 V/m rozszerzono do zakresu częstotliwości 1215 MHz. W przypadku lotnictwa wojskowego można zauważyć taką samą tendencję ewolucji poziomów podatności i górnych ograniczeń częstotliwości. Jedyna różnica polega na tym, że wymagania wojskowe startowały od wyższych wartości. W 1989 roku poziomy podatności na zakłócenia dla aparatury pokładowej w lotnictwie cywilnym przekroczyły odpowiednie poziomy dla lotnictwa wojskowego. Zmiany w poziomach podatności aparatury pokładowej w lotnictwie na przestrzeni kilkunastu ostatnich lat pokazano w tabeli 16.2.

Tabela 16.2. Poziomy podatności na zakłócenia aparatury pokładowej w lotnictwie

Rok	Lotnictwo cywilne	Lotnictwo wojskowe	
		UK	USA
1950	–	–	–
1967	3,7 mV/m, 1 GHz	0,82 V/m, 1 GHz	–
1968	–	–	1 V/m, 10 GHz
1971	–	–	5 V/m, 10 GHz 20 V/m, 40 GHz
1980	0,1 V/m, 1 GHz	5 V/m, 10 GHz cw 20 V/m, 18 GHz mod. 100 V/m rozs. 200 V/m	–
1984	1 V/m, 1,215 GHz	–	–
1986	–	–	20 V/m, 40 GHz rozs. 200 V/m
1989	200 V/m, 18 GHz	–	–
1992 ¹⁾	6,8 kV/m, 18 GHz ²⁾	Zostaną zdefiniowane ³⁾	Zostaną zdefiniowane ³⁾

¹⁾ Poziomy te przedstawiono na rysunkach 16.1–16.6.

²⁾ Uzgodnione w lutym 1992 roku poziomy szczytowe dla środowiska stosowanego do certyfikacji.

³⁾ Prawdopodobnie zostaną zaadaptowane poziomy wartości szczytowych odpowiadające środowisku, w którym występują silne pola.

Z tabeli 16.2 widać, że obecnie w lotnictwie cywilnym obowiązuje norma odpornościowa 6,8 kV/m. Ze względu jednak na fakt, że na pokładach samolotów znajduje się jeszcze aparatura spełniająca wymagania z 1989 roku, za wartość poziomu odporności przyjęto poziom 200 V/m w zakresie częstotliwości do 18 GHz.

Na podstawie prowadzonych w Wielkiej Brytanii pomiarów skuteczności ekranowania kadłubów samolotów i helikopterów [78] stwierdzono, że w badanym zakresie częstotliwości (12,5÷15 GHz) tłumienie sygnałów zakłócających zmienia się w zakresie od 6 do 4 dB dla metalowych kadłubów i może być mniejsze niż 0 dB dla kadłubów zbudowanych częściowo z nieprzewodzących materiałów (efekty rezonansowe).

16.1.6. WYMAGANIA STAWIANE ELEKTRONICZNEJ APARATURZE NA POKŁADZIE SAMOLOTU

W przypadku aparatury elektronicznej na pokładzie samolotu oprócz poziomu odporności, który określa natężenie pola zakłóceń nie powodującego uszkodzenia aparatury bardzo ważne jest określenie również poziomu podatności. Poziom podatności określa poziom zakłóceń, przy którym aparatura funkcjonuje prawidłowo. Powyżej tego poziomu mogą występować nieprawidłowości w funkcjonowaniu aparatury, które po ustaniu narażenia znikają i aparatura funkcjonuje poprawnie.

Aparatura pokładowa powinna pracować poprawnie w czasie przecinania przez samolot głównej wiązki promieniowania. Konieczne jest zatem określenie poziomu podatności aparatury elektronicznej znajdującej się na pokładzie samolotu. Po określeniu poziomu zakłóceń występujących w czasie przecinania przez samolot głównej wiązki promieniowania można wyznaczyć margines bezpieczeństwa.

Ze względu na fakt, że terminale VSAT oraz SNG, jak również stacje centralne systemów VSAT pracują w pasmie *Ku*, interesujące są dane związane z podatnością sprzętu pokładowego w zakresie częstotliwości od 12,5 do 15,0 GHz. Do oszacowania podatności sprzętu pokładowego korzystano z informacji udostępnionych przez Agencję Radiokomunikacyjną Wielkiej Brytanii, na której zlecenie firma ERA Technology przeprowadziła niezbędne testy i pomiary [25]. Generowanie zakłócającego pola elektromagnetycznego oraz pomiary oparto na ogólnie przyjętych do tego celu zaleceniach wojskowych i cywilnych, takich jak EFA SPE-J-000-E-1000 [38], angielskim standardzie wojskowym 59-41 [58] oraz EUROCAE [40, 55, 76, 77].

Pomiary prowadzono w podwójnie ekranowanej komorze o rozmiarach 7×5×3 m. Zestawiono specjalne stanowisko pomiarowe. Badane urządzenia znajdowały się w polu elektromagnetycznym promieniowanym z odpowiednich źródeł oddalonych o 1 m od urządzenia.

Badano cztery typy urządzeń stanowiących wyposażenie pokładowe samolotu:

- wysokościomierz radarowy (*RADALT radar altimeter – Smiths/Aerospatiale Puma*),
- urządzenie identyfikujące (*IFF transponder/identification friend or foe – Cossor 1520*),
- komputer pokładowy (*ADC air data computer – Elliot/Sepecat Jaguar*),
- odbiornik (nadajnik) (*VHF/UHF radio transceiver – Plessey PTR 1751*).

Każde z badanych urządzeń zostało zainstalowane w ekranującej obudowie razem z niezbędnym oprzyrządowaniem i okablowaniem symulującym warunki w samolo-

cie. Elementy każdego z systemów zgrupowano w jednym miejscu w celu poddania ich takim samym narażeniom elektromagnetycznym.

Badany sprzęt zasilano poprzez sieć sztuczną 5 μH LISN oraz kondensator przepustowy o wartości 10 μF . Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 16.3.

Tabela 16.3. Wyniki pomiarów wrażliwości wybranych urządzeń pokładowych w zakresie częstotliwości od 12,5 do 15,0 GHz

Rodzaj urządzenia Zastosowana modulacja	Poziom podatności V/m
Wysokościomierz RADALT	
Przebieg nośny	>500
1 kHz AM	>500
2 MHz impulsy	>500
Sygnał wizji	>500
Identyfikator IFF	
Przebieg nośny	300
1 kHz AM	110
2 MHz impulsy	>50
Sygnał wizji	>100
Komputer pokładowy	
Przebieg nośny	>200
1 kHz AM	>100
2 MHz impulsy	>100
Sygnał wizji	>100
Odbiornik (nadajnik)	
Przebieg nośny	>200
1 kHz AM	35
2 MHz impulsy	>200
Sygnał wizji	>100

Poza testami przeprowadzonymi dla czterech wymienionych urządzeń, uwzględniono rezultaty badań innych systemów pokładowych samolotu. Nowoczesne systemy pokładowe badano w ciągu ostatnich 5 lat. Każdy z systemów poddany został działaniu pola elektrycznego o natężeniu kilkuset voltów na metr. Badania te pokazały, że pola rzędu kilkuset voltów na metr są w stanie zakłócić pracę systemu. Dla małej grupy około 5% systemów wystąpiły zakłócenia w prawidłowej pracy przy polach o natężeniu mniejszym niż 100 V/m.

16.2. OKREŚLENIE NATĘŻENIA POLA WOKÓŁ SATELITARNEJ STACJI NADAWCZEJ

Stacje VSAT lub SNG, pracujące jako stacje nadawcze, wypromieniowują energię elektromagnetyczną do otoczenia. Wyróżnia się dwa obszary wokół stacji. Obszar

promieniowania pożądanego, obejmujący główną wiązkę charakterystyki promieniowania i obszar promieniowania niepożądanego – poza tą wiązką. Metody określania natężenia pola są inne dla obszaru promieniowania pożądanego i dla obszaru promieniowania niepożądanego. Podczas analizy stopnia zagrożenia systemów lotniczych należy wziąć pod uwagę jedynie obszar promieniowania pożądanego, obejmujący główną wiązkę promieniowania. Zagrożenia powodowane przez stację satelitarną w obszarze promieniowania niepożądanego w stosunku do systemów lotniczych nie są istotne. Należy je analizować jedynie w odniesieniu do obsługi stacji oraz ludzi znajdujących się w jej pobliżu (rozdz. 17.).

16.2.1. OKREŚLENIE POZIOMÓW PROMIENIOWANIA POŻĄDANEGO

W obszarze promieniowania pożądanego można w prosty sposób wyznaczyć gęstość promieniowanej mocy jedynie w strefie dalekiej. Granicę strefy dalekiej D_{sd} określa zależność

$$D_{sd} = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (16.1)$$

w której:

D – średnica apertury anteny,

λ – długość fali.

W odległości R większej niż D_{sd} gęstość strumienia mocy S jest określona wzorem

$$S = \frac{(EIRP)}{4\pi R^2} = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2}, \quad (16.2)$$

w którym:

$EIRP$ – zastępcza moc promieniowana izotropowo przez antenę,

P_t – moc doprowadzona do anteny,

G_t – zysk energetyczny anteny nadawczej.

Przy założeniu równomiernego rozkładu pola w aperturze (najgorszy przypadek), zysk energetyczny anteny G_t można wyznaczyć ze wzoru

$$G_t = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2, \quad (16.3)$$

w którym:

D – średnica apertury,

λ – długość fali.

Gęstość strumienia mocy S_{sd} w odległości D_{sd} można wyznaczyć po podstawieniu wyrażenia (16.3) do (16.2)

$$S_{sd} = P_t \frac{\pi}{16D^2}. \quad (16.4)$$

Zakładając, że w odległości D_{sd} energia jest rozłożona równomiernie na powierzchni koła o średnicy D_{ef} , można obliczyć gęstość strumienia mocy jako

$$S_{sd} = \frac{4P_t}{\pi D_{ef}^2}. \quad (16.5)$$

Z porównania wyrażeń (16.4) i (16.5)

$$\frac{4P_t}{\pi D_{ef}^2} = \frac{\pi P_t}{16D^2} \quad (16.6)$$

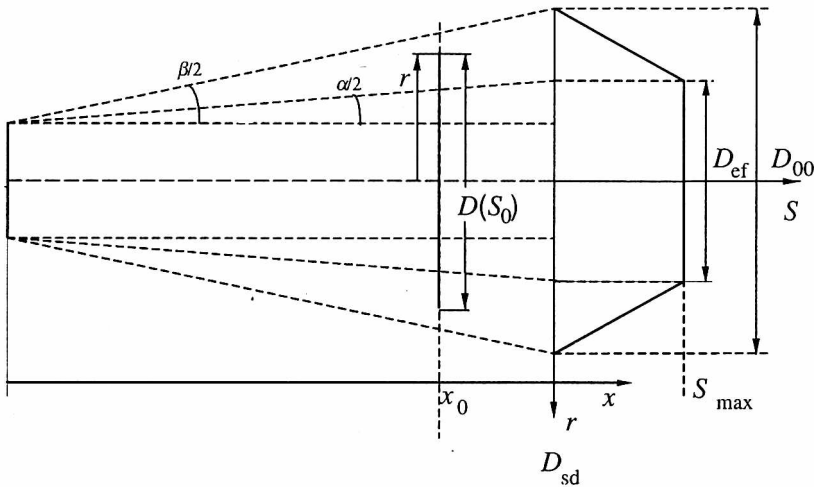
wynika, że

$$D_{ef} = \frac{8}{\pi} D. \quad (16.7)$$

Zakładając następnie, że jedynie część mocy głównej wiązki jest rozłożona równomiernie na kole o średnicy D_{ef} , znajdującym się w odległości D_{sd} od anteny, a pozostała moc jest transmitowana w obrębie kąta wyznaczonego przez pierwsze miejsce zerowe charakterystyki promieniowania i gęstość tej mocy maleje liniowo, możemy wyznaczyć rozkład gęstości mocy promieniowanej w dowolnym przekroju (rys. 16.7).

W odległości D_{sd} szerokość wiązki β między miejscami zerowymi

$$\beta = 2,44 \frac{\lambda}{D} \text{ (radianów)}. \quad (16.8)$$



Rys. 16.7. Model promieniowania anteny w strefie bliskiej

Średnica koła D_{00} wyznaczonego przez miejsca zerowe charakterystyki promieniowania anteny w odległości D_{sd} jest określona wzorem

$$D_{00} = D + 2 D_{sd} \tan\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (16.9)$$

W praktyce antenowej zakłada się, że 90% mocy promieniowanej jest w wiązce głównej. Oznaczając przez P moc doprowadzoną do anteny stwierdzamy, że moc wypromieniowana w wiązce głównej

$$P_{ef} = 0,9 P. \quad (16.10)$$

W odległości x od anteny ($x < D_{sd}$) możemy wyznaczyć $D_{ef}(x)$, $D_{00}(x)$ oraz maksymalną gęstość mocy w wiązce $S_{max}(x)$ ze wzorów:

$$D_{ef}(x) = D + 2x \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (16.11)$$

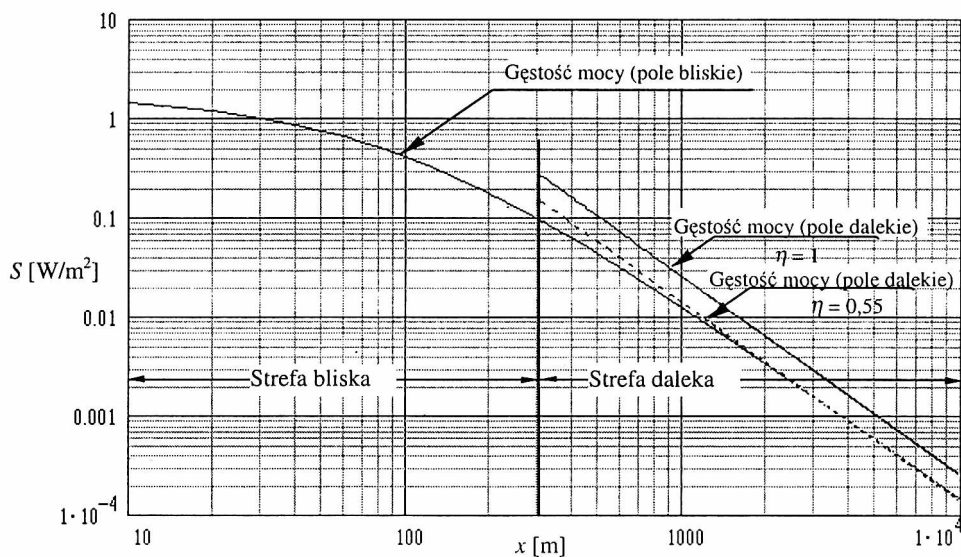
$$D_{00}(x) = D + 2x \tan\left(\frac{\beta}{2}\right), \quad (16.12)$$

$$S_{max}(x) = \frac{12}{\pi} \frac{P_{ef}}{D_{00}(x)^2 + D_{ef}(x) D_{00}(x) + D_{ef}(x)^2}. \quad (16.13)$$

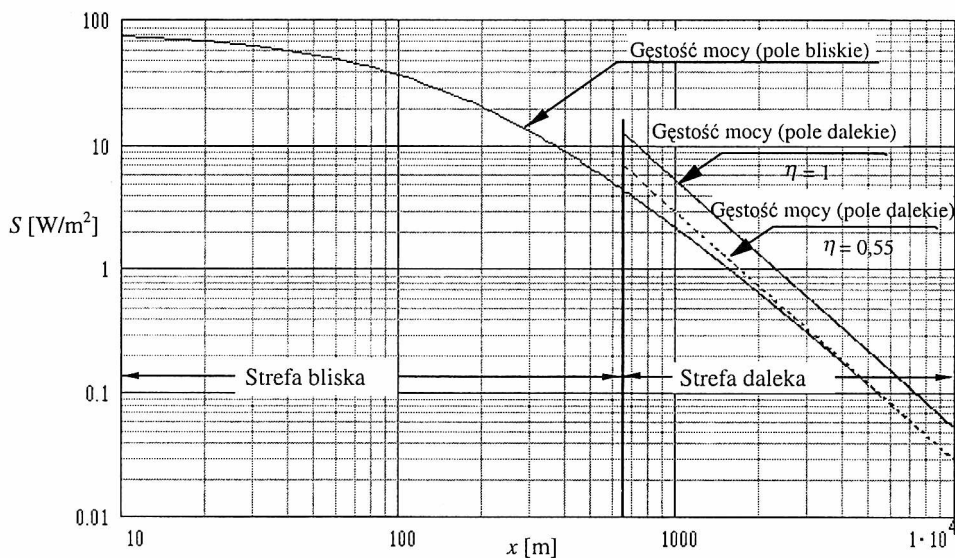
Na rysunkach 16.8–16.11 przedstawiono rozkład gęstości mocy dla stacji satelitarnych o parametrach reprezentujących typowy terminal VSAT, przenośną stację reporterską SNG, stację centralną systemu VSAT (hub) oraz stałą stację stosowaną do retransmisji sygnału telewizyjnego. Podstawowe parametry tych stacji przedstawiono w tabeli 16.4.

Tabela 16.4. Podstawowe parametry analizowanych stacji satelitarnych

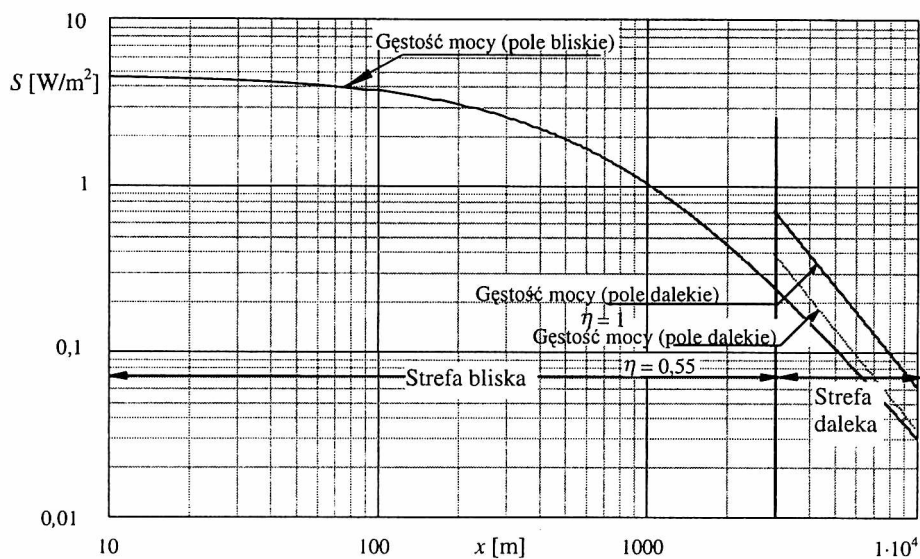
	Terminal VSAT (GTE Spacenet Corp. system Skystar Plus)	TES SNG (Dornier GmbH VMA -2.6/73/25)	Hub VSAT (TS S.A. system Skystar Plus)	Staća stacja TV (TVP)
Moc nadajnika P , W	5	490	125	700
Średnica apertury D , m	1,8	2,6	5,6	9,0
Częstotliwość f , MHz	14,125	14,125	14,125	14,125
Stosunek D/λ	85	122	264	424
Granica stref D_{sd} , m	305	637	2955	7633



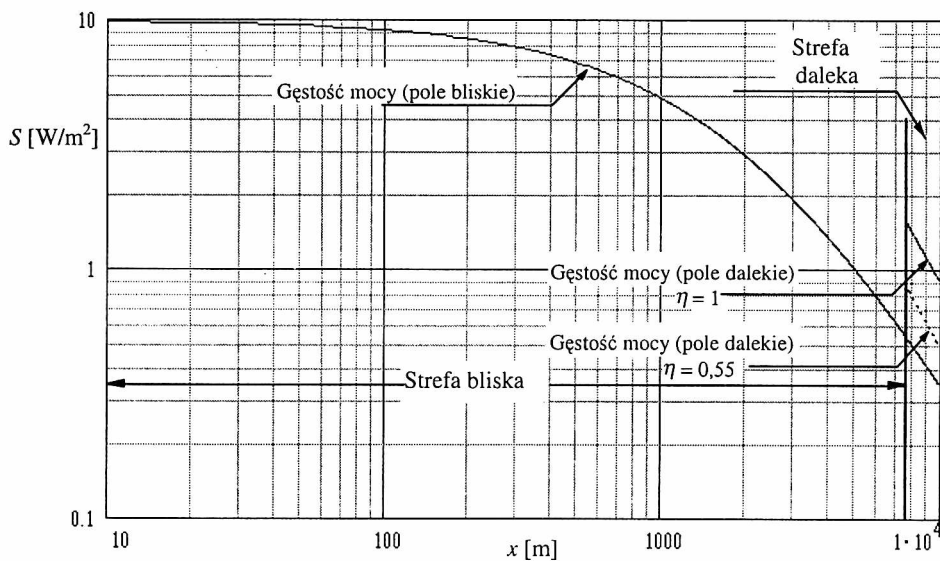
Rys. 16.8. Gęstość mocy w głównej wiązce promieniowania w funkcji odległości (terminal VSAT)



Rys. 16.9. Gęstość mocy w głównej wiązce promieniowania w funkcji odległości (satelitarna stacja reporterska SNG)



Rys. 16.10. Gęstość mocy w głównej wiązce promieniowania w funkcji odległości (centralna satelitarna stacja (hub) systemu VSAT)



Rys. 16.11. Gęstość mocy w głównej wiązce promieniowania w funkcji odległości (stała satelitarna stacja telewizyjna)

16.2.2. ROZKŁAD POŁA W ZADANEJ ODLEGŁOŚCI OD ANTENY

Przedstawiony wcześniej model matematyczny służący do wyznaczania pola elektromagnetycznego w obszarze głównej wiązki i w strefie bliskiej jest modelem uproszczonym. W strefie dalekiej lepszy opis uzyskuje się, przyjmując, że gęstość strumienia mocy jest proporcjonalna do drugiej potęgi unormowanej charakterystyki promieniowania anteny $F_{n,u}$, która dla apertury oświetlonej równomiernie wyraża się funkcją

$$F_{n,u}(u) = 2 \left| \frac{J_1(u)}{u} \right|, \quad (16.14)$$

gdzie

$$u = \frac{\pi D}{\lambda} \sin(\theta) \quad (16.15)$$

oraz:

$\frac{D}{\lambda}$ – stosunek średnicy apertury anteny do długości fali (elektryczny rozmiar anteny),

dla analizowanych anten stosunek ten podano w tabeli 16.4,

J_1 – funkcja Bessela pierwszego rzędu pierwszego rodzaju,

θ – kąt liczony od osi głównej wiązki.

Na granicy strefy bliskiej i dalekiej (w odległości $D_{sd} = 2D^2/\lambda$) strumień mocy, liczony za pomocą wzoru dla strefy bliskiej (16.13) oraz za pomocą wzoru dla strefy dalekiej (16.16)

$$S_{sd}(\theta) = \frac{G(\theta) P_{ef}}{4\pi D_{sd}^2}, \quad (16.16)$$

w którym:

$$G(\theta) = G_t F_{n,u}^2(\theta), \quad (16.17)$$

G_t – zysk anteny (wzór (16.3)),

powinien mieć taką samą wartość. Z uwagi na dodatkowe uwzględnienie obszaru o liniowo malejącej energii, wyniki obliczeń rozkładu strumienia mocy na granicy różnią się o 4,6 dB. Poziom równomiernie rozłożonej energii na kole o średnicy D_{ef} uległ zmniejszeniu wskutek uwzględnienia obszaru, w którym energia maleje liniowo.

Zarówno w normach ETSI [31, 32, 64], jak i ITU-R [18] poziom listków bocznych jest ograniczony przez podanie maksymalnych dopuszczalnych wartości dla obwiedni tych listków. Spełnienie tych norm wymaga stosowania w radiokomunikacji satelitarnej anten z nierównomiernym rozkładem pola w aperturze.

Jednym z możliwych rozwiązań jest stosowanie rozkładu pola w aperturze anteny opisanego wielomianem drugiego stopnia typu $1 - (2r/D)^2$ (rozkład paraboliczny), przy czym r jest odległością (po promieniu) od środka apertury kołowej. Dla

tego typu rozkładu unormowana charakterystyka promieniowania anteny $F_{n,p}$ wyraża się funkcją

$$F_{n,p}(u) = 8 \left| \frac{J_2(u)}{u^2} \right|, \quad (16.18)$$

gdzie:

J_2 – funkcja Bessela drugiego rzędu pierwszego rodzaju,

u – parametr wyznaczany z wzoru (16.15).

Funkcję $G(C)$ odpowiadającą zyskowi anteny na zadanym kierunku θ można zatem określić ze wzoru

$$G(\theta) = \eta G_t F_{n,p}^2(\theta), \quad (16.19)$$

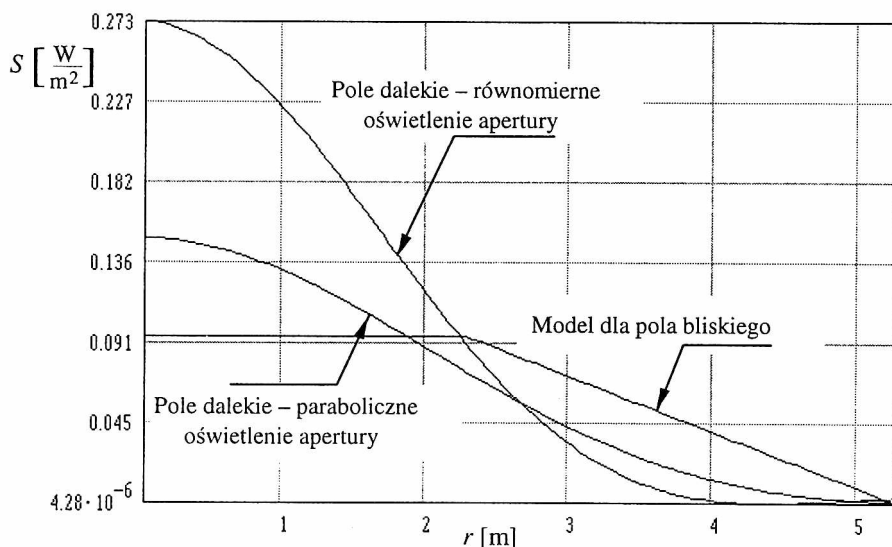
w którym:

η – sprawność anteny ($\eta < 1$),

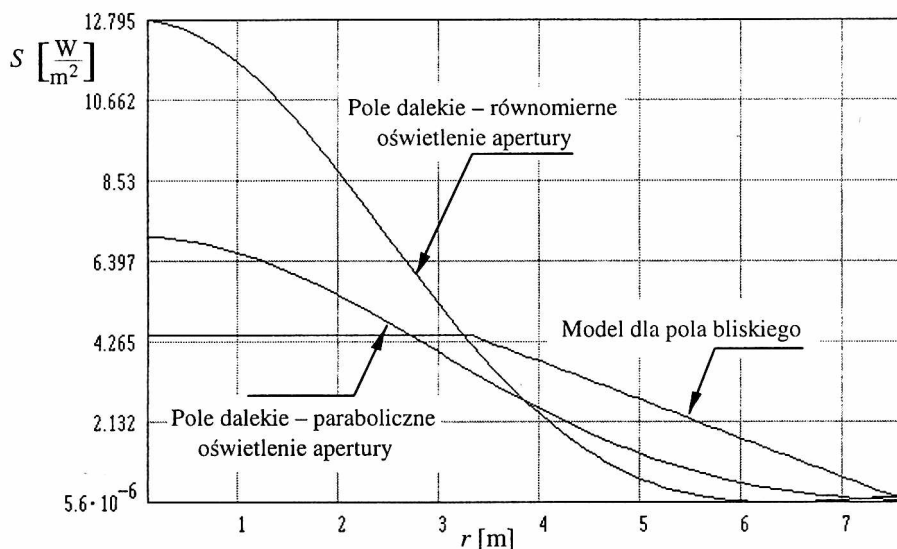
G_t – zysk anteny (wzór (16.3)).

Po podstawieniu zależności (16.19) do (16.16) uzyskujemy wzór określający strumień mocy S przy rozkładzie pola w aperturze opisanym wielomianem drugiego stopnia.

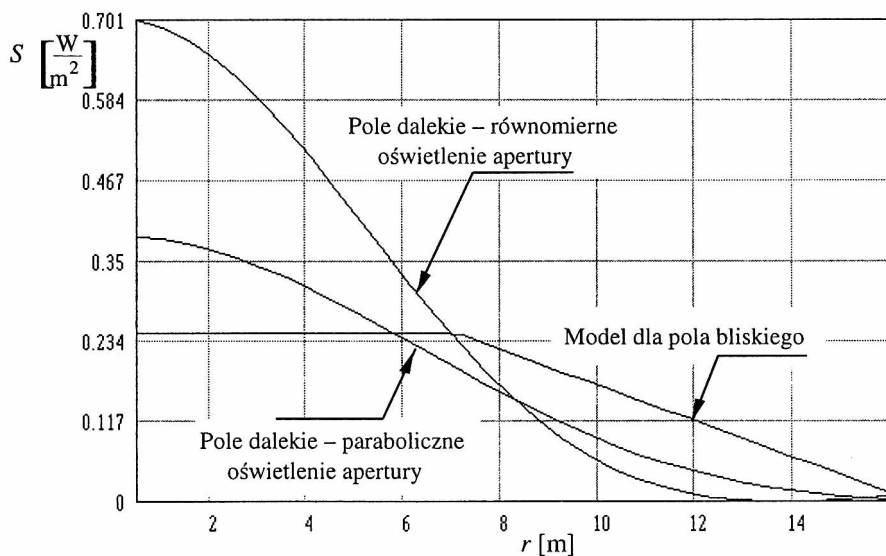
Na rysunkach 16.12–16.15 przedstawiono rozkład strumienia mocy na granicy stref w obrębie głównej wiązki promieniowania wyznaczony za pomocą wzoru dla strefy bliskiej (16.13) i dla strefy dalekiej (16.16). Przy obliczaniu rozkładu strumienia mocy za pomocą wzoru dla strefy dalekiej uwzględniono charakterystykę anteny o równomiernym i opisanym wielomianem drugiego stopnia (założono sprawność anteny $\eta = 0,55$) rozkładzie pola w aperturze.



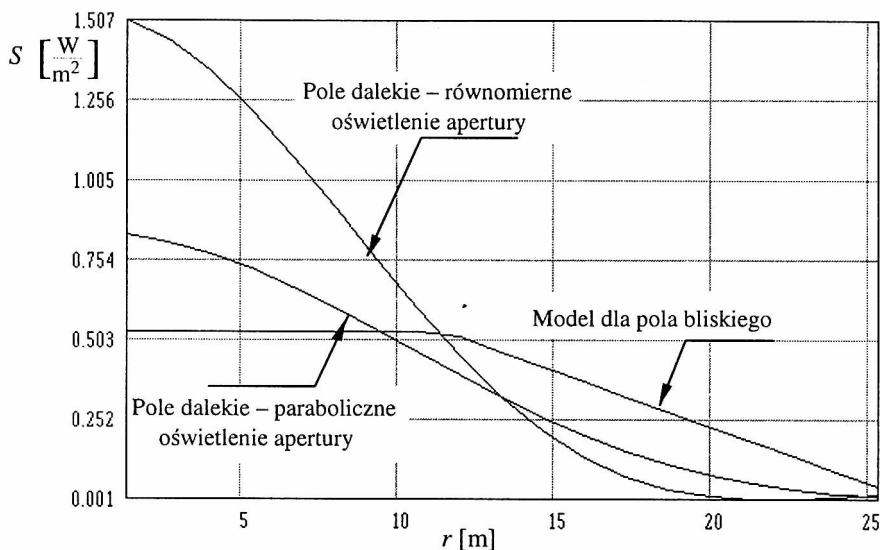
Rys. 16.12. Rozkład strumienia mocy S na granicy stref bliskiej i dalekiej ($D_{sd} = 305$ m) dla terminalu VSAT o parametrach jak w tabeli 16.4



Rys. 16.13. Rozkład strumienia mocy S na granicy stref bliskiej i dalekiej ($D_{sd} = 637$ m) dla satelitarnej stacji reporterskiej SNG o parametrach jak w tabeli 16.4



Rys. 16.14. Rozkład strumienia mocy S na granicy stref bliskiej i dalekiej ($D_{sd} = 2955$ m) dla centralnej satelitarnej stacji (hub) systemu VSAT o parametrach jak w tabeli 16.4



Rys. 16.15. Rozkład strumienia mocy S na granicy stref bliskiej i dalekiej ($D_{sd} = 7633$ m) dla stałej satelitarnej stacji telewizyjnej o parametrach jak w tabeli 16.4

Z przedstawionych na rysunkach 16.12–16.15 przebiegów widać, że źródłem powstałego błędu podczas przechodzenia od modelu anteny dla strefy bliskiej do modelu anteny dla strefy dalekiej jest sposób modelowania rozkładu strumienia mocy (całkowita moc P_{ef} promieniowana w obrębie głównej wiązki promieniowania jest dla wszystkich przebiegów taka sama). Ponadto widać, że model dla strefy bliskiej jest bardzo zbliżony do modelu opisującego antenę z rozkładem pola w aperturze określonym wielomianem drugiego stopnia i o sprawności 0,55. Model dla pola bliskiego można zatem również stosować w polu dalekim. Na rysunku 16.16 przedstawiono przebieg funkcji błędu wyznaczonej z wzoru

$$\delta S = 10 \log \left(\frac{S_1}{S_2} \right), \quad (16.20)$$

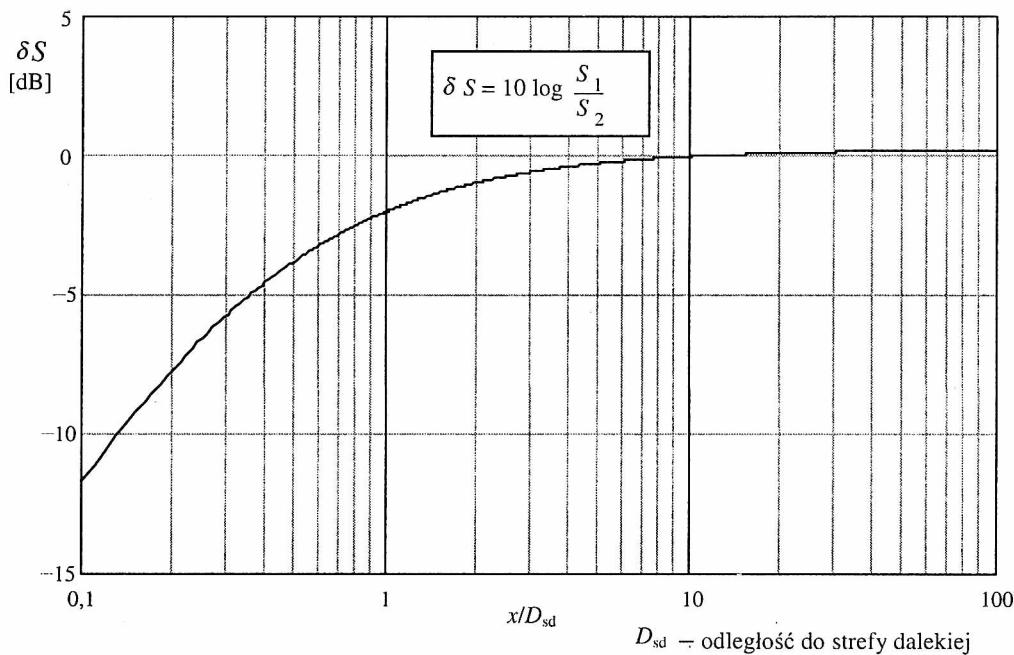
w którym:

S_1 – strumień mocy wyznaczony za pomocą wzoru dla pola bliskiego (16.13),

S_2 – strumień mocy wyznaczony za pomocą wzoru dla pola dalekiego dla anteny o sprawności $\eta = 0,55$.

Przebieg δS w funkcji unormowanej odległości x/D_{sd} nie zależy ani od rozmiarów ani od mocy analizowanej stacji. Z rysunku 16.16 można odczytać, że dla $x = D_{sd}$ różnica (w mierze logarytmicznej) pomiędzy wartością wyznaczoną z wzorów (16.13) i (16.16) wynosi -2 dB, natomiast dla $x = 0,5D_{sd}$ różnica ta wynosi $-3,8$ dB. Wynika z tego, że stosując do wyznaczenia strumienia mocy w strefie bliskiej wzór dla strefy dalekiej, uzyskujemy zawyżone wartości. Z punktu widzenia kompatybilności elek-

tromagnetycznej jest to korzystne, gdyż zawyżając poziom sygnału zakłócającego (analiza najgorszego przypadku), stwarzamy dodatkowy margines bezpieczeństwa.



Rys. 16.16. Błąd wyznaczenia strumienia mocy w strefie bliskiej przy zastosowaniu wzoru dla strefy dalekiej (wzór (16.13)) dla anteny o sprawności $\eta = 0,55$

Wielu autorów podczas analizy kompatybilności stosuje wzór wyznaczający strumień promieniowanej mocy obowiązujący dla strefy dalekiej ($x > D_{sd}$) do oszacowania tego strumienia w odległościach $x > 0,5D_{sd}$, a zatem w strefie bliskiej. Z wcześniejszych rozważań wynika słuszność tego typu postępowania. Zawyżanie jednak wartości natężenia pola elektrycznego w strefie bliskiej promieniowania, do którego prowadzi użycie wzorów dla strefy dalekiej, prowadzi do bardzo dużych rozbieżności pomiędzy teorią i praktyką. W granicznym przypadku można określić nawet strefę niebezpieczną tam, gdzie jej nigdy nie będzie. Dlatego też w strefie bliskiej do określenia gęstości strumienia mocy S autor zaleca stosowanie zależności (16.13), która umożliwia uzyskanie wyników bliższych rzeczywistości.

16.2.3. NATĘŻENIE POLA ELEKTRYCZNEGO W GŁÓWNEJ WIĄZCE ANTENY

Strumień mocy promieniowanej S (długość wektora Poyntinga) określa zależność

$$S = |S| = |\mathbf{E} \times \mathbf{H}|, \quad (16.21)$$

w której:

E – wektor natężenia pola elektrycznego,

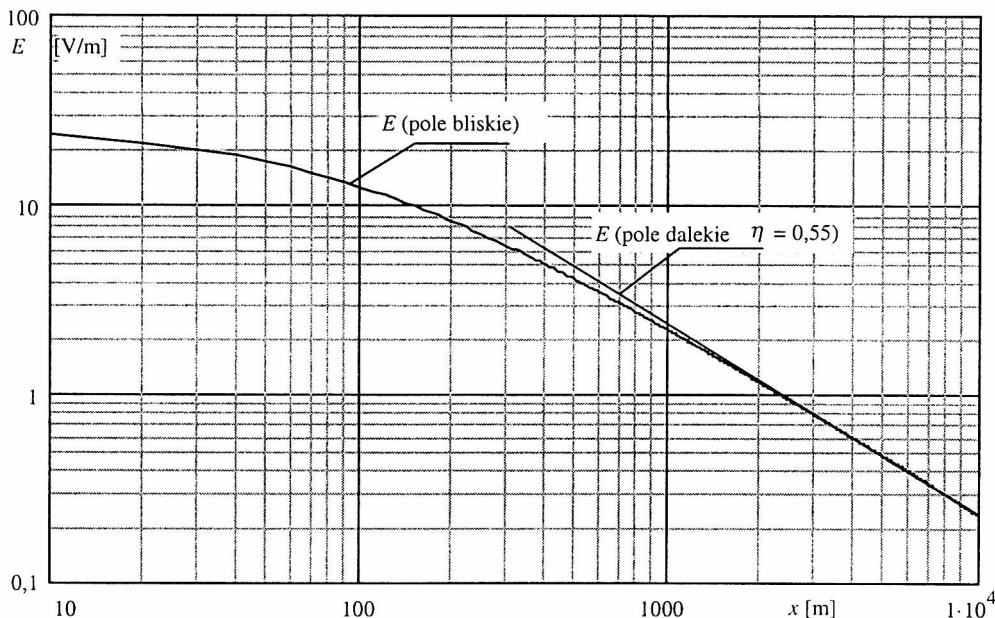
H – wektor natężenia pola magnetycznego.

Dla płaskiej fali elektromagnetycznej wektory E i H są prostopadłe do siebie i do kierunku rozchodzenia się fali. Stosunek długości tych wektorów równa się impedancji falowej ośrodka (ζ), w którym fala się rozchodzi. Dla próżni impedancja ta wynosi 120π . Jeśli więc założymy, że w danej odległości od anteny mamy falę płaską oraz przyjmimy impedancję falową ośrodka równą impedancji próżni, to uzyskamy następujące zależności między natężeniem pola elektrycznego a strumieniem mocy:

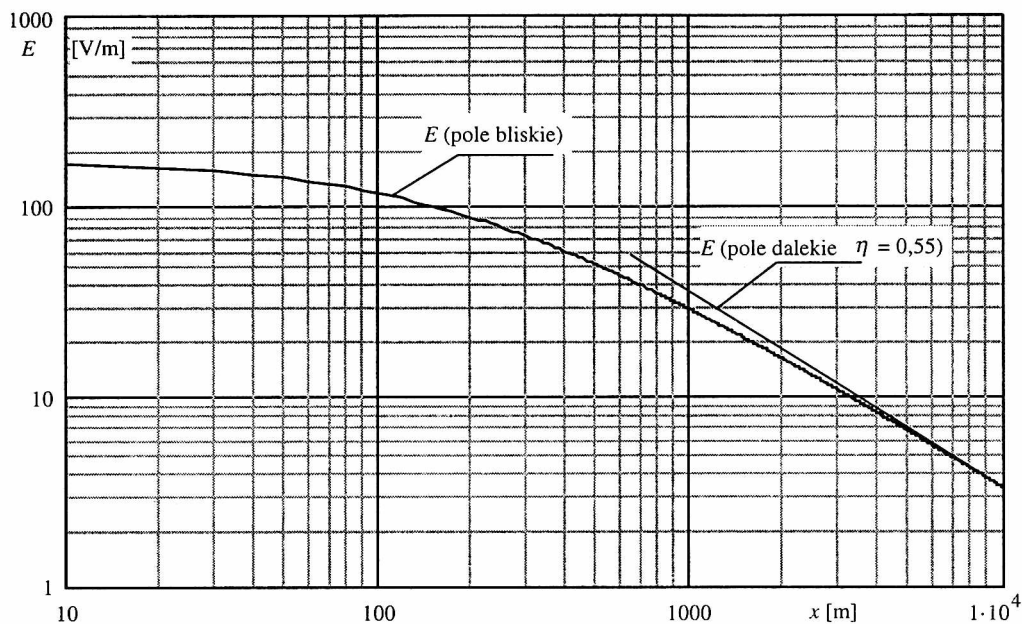
$$S = \frac{E^2}{120\pi}, \quad (16.22)$$

$$E = \sqrt{120\pi S}. \quad (16.23)$$

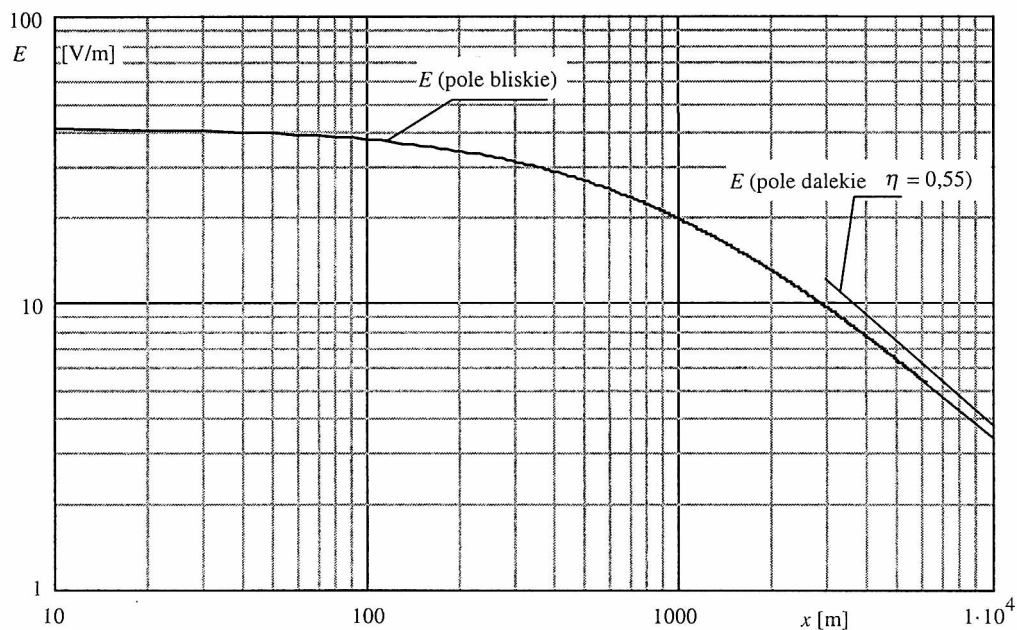
Na podstawie zależności (16.23) wyznaczono natężenie pola elektrycznego w głównej wiązce promieniowania anteny. Na rysunkach 16.17–16.20 przedstawiono przebieg natężenia pola elektrycznego, biorąc za podstawę strumień mocy wyznaczony przy użyciu modelu dla pola w strefie bliskiej oraz dla pola w strefie dalekiej, przy czym w drugim przypadku antena ma sprawność 0,55.



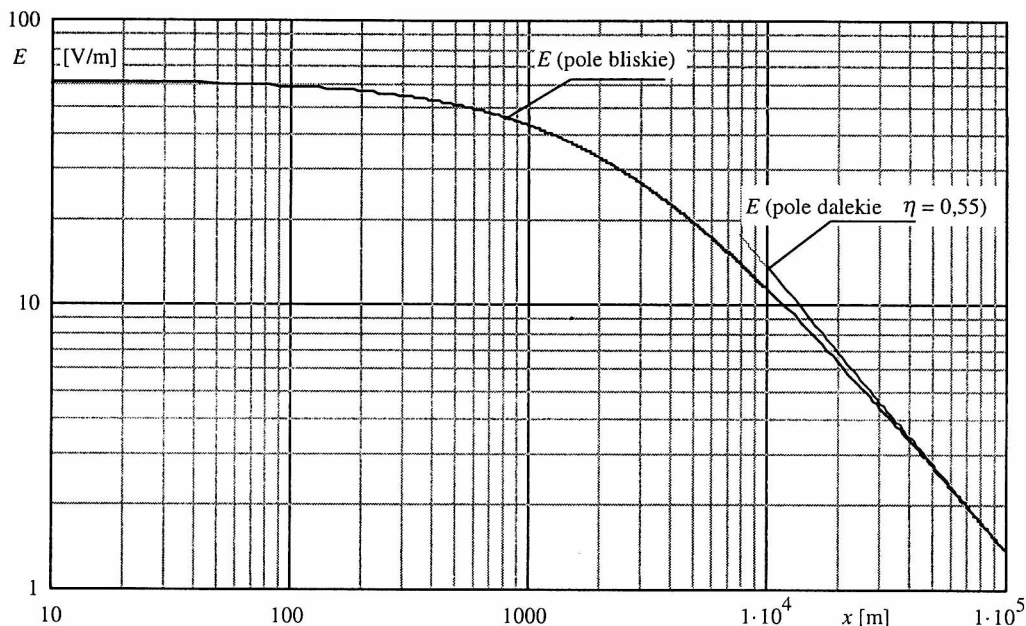
Rys. 16.17. Rozkład natężenia pola elektrycznego w głównej wiązce promieniowania anteny dla terminalu VSAT (o parametrach jak w tabeli 16.4)



Rys. 16.18. Rozkład natężenia pola elektrycznego w głównej wiązce promieniowania anteny dla stacji reporterskiej SNG (o parametrach jak w tabeli 16.4)



Rys. 16.19. Rozkład natężenia pola elektrycznego w głównej wiązce promieniowania anteny dla stacji centralnej VSAT (o parametrach jak w tabeli 16.4)



Rys. 16.20. Rozkład natężenia pola elektrycznego w głównej wiązce promieniowania anteny dla stałej stacji satelitarnej TV (o parametrach jak w tabeli 16.4)

Z rysunków zaprezentowanych wcześniej widać, w jak szerokich granicach zmienia się natężenie pola elektrycznego w zależności od parametrów stacji. Z punktu widzenia zagrożenia elektronicznej aparatury pokładowej istotne są również rozmiary obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego przekracza określoną wartość. Rozmiary tego obszaru można oszacować na podstawie zaprezentowanego wcześniej modelu dla strefy bliskiej promieniowania. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że przebieg strumienia mocy w funkcji odległości od osi r , obliczony przy zastosowaniu modelu dla strefy bliskiej, jest zbliżony do przebiegu wyznaczonego dla anteny o rozkładzie pola w aperturze opisanej wielomianem drugiego stopnia i sprawności 0,55 (rys. 16.12–16.15). Promień obszaru wyznaczony za pomocą modelu dla strefy bliskiej będzie nieznacznie zawyżony, co przy analizie kompatybilności oznacza branie tzw. najgorszego przypadku.

16.2.4. WYZNACZENIE SZEROKOŚCI WIĄZKI

Do określenia szerokości obszaru, wewnątrz którego natężenie pola przekracza daną wartość, będzie użyty model anteny dla strefy bliskiej. Ponieważ model ten dla odległości większych od D_{sd} daje wyniki zbliżone w stosunku do wyników wyznaczanych za pomocą wzorów dla strefy dalekiej, dlatego zastosowany zostanie w całym zakresie analizowanych odległości.

W danej odległości x_0 od anteny (liczonej wzdłuż osi głównej wiązki anteny) można wyznaczyć na podstawie wzoru (16.13) maksymalną wartość strumienia mocy $S_{\max}(x_0)$. Strumień mocy w odległości r od osi wiązki można wyznaczyć z wzorów:

$$S(x_0, r) = S_{\max}(x_0) \quad \text{dla } r \leq D_{\text{ef}}/2, \quad (16.24)$$

$$S(x_0, r) = 2 \frac{S_{\max}(x_0)}{D_{00}(x_0) - D_{\text{ef}}(x_0)} \left(\frac{D_{00}(x_0)}{2} - r \right) \quad \text{dla } D_{\text{ef}}/2 < r \leq D_{00}/2. \quad (16.25)$$

Dla $r > D_{00}/2$ punkt leży poza główną wiązką. Po przekształceniu zależności (16.25) otrzymujemy wyrażenie na promień obszaru, w którym strumień mocy przekracza zadaną wartość S_0

$$r(x_0, S_0) = -\frac{1}{2} \left(\frac{S_0}{S_{\max}(x_0)} - \frac{D_{00}(x_0)}{D_{00}(x_0) - D_{\text{ef}}(x_0)} \right) (D_{00}(x_0) - D_{\text{ef}}(x_0)). \quad (16.26)$$

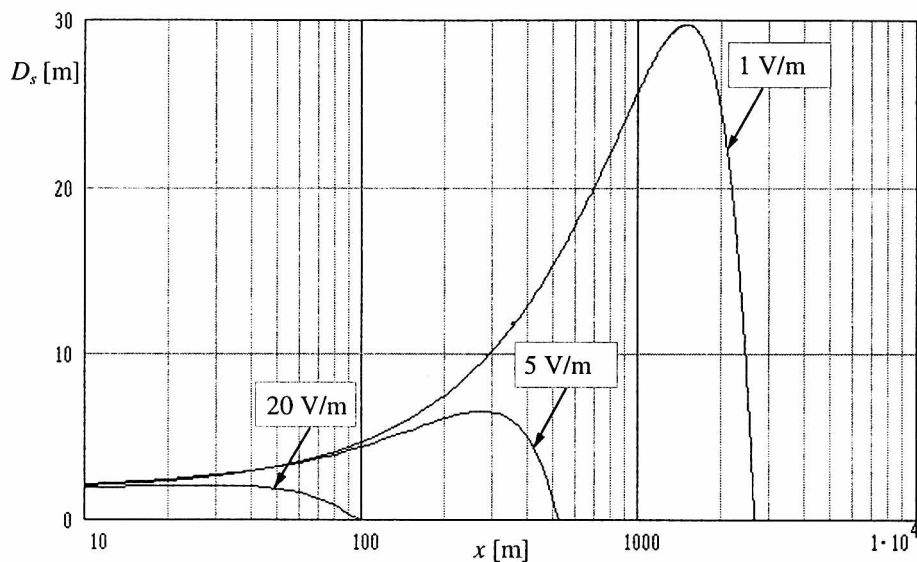
Z zastosowaniem zależności (16.26) dokonano obliczeń dla wymienionych w tabeli 16.4 (p. s. 197) naziemnych stacji satelitarnych. Jako wartości graniczne strumienia mocy wybrano wartości odpowiadające natężeniom pola elektrycznego wymienionym w tabeli 16.5.

Tabela 16.5. Natężenie pola elektrycznego a strumień mocy

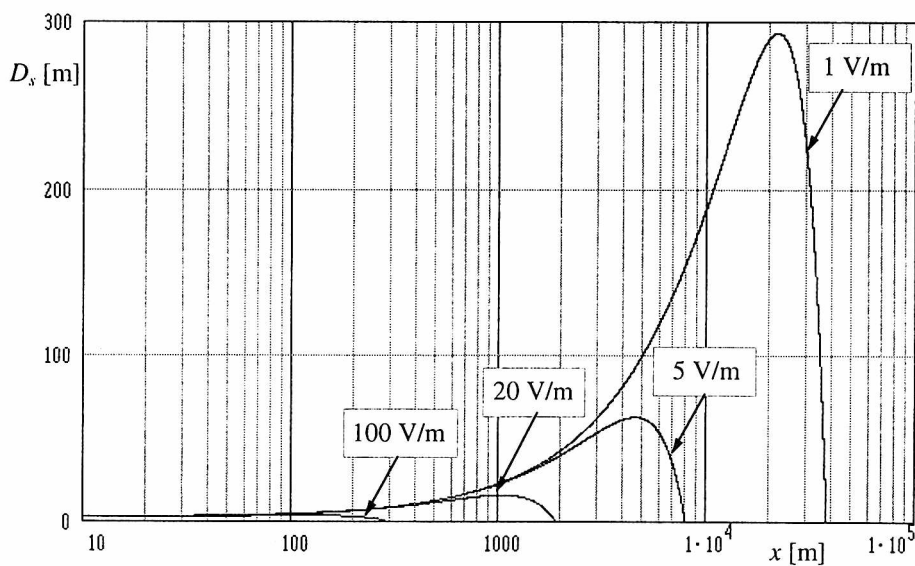
Natężenie pola elektrycznego V/m	1	5	20	100	200
Strumień mocy W/m ²	0,003	0,066	1,061	26,526	106,103

Natężenie pola 200 V/m nie jest przekraczane przez żadną z analizowanych stacji. Natężenie to jest wyższe od natężenia pola elektrycznego odpowiadającego strefie niebezpiecznej ($E = 194$ V/m lub $S = 100$ W/m²), w której obecność ludzi jest zabroniona. Pozostałe wartości z tabeli 16.5 zostały dobrane tak, by pokrywały się z poziomami podatności lotniczej aparatury pokładowej na promieniowanie elektromagnetyczne.

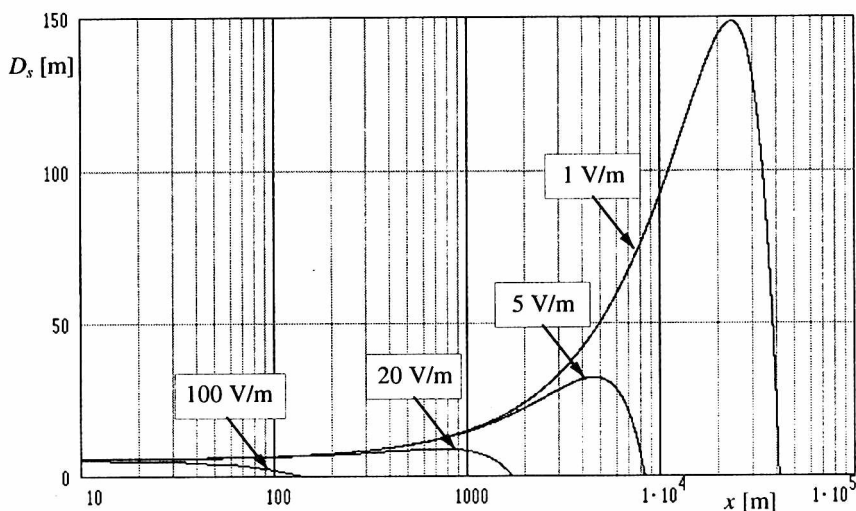
Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 16.21–16.24.



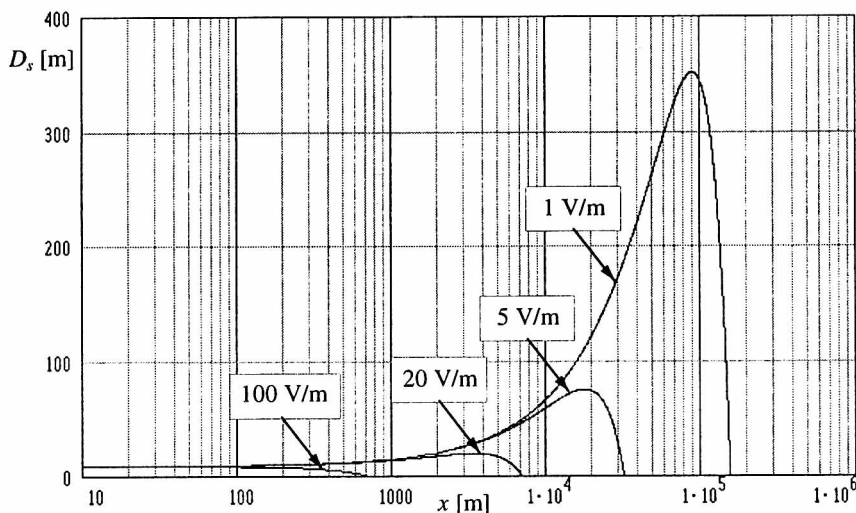
Rys. 16.21. Szerokości obszarów $D_s = 2r$, wewnątrz których natężenie pola przekracza zadaną wartość w funkcji odległości od anteny (terminal VSAT o parametrach jak w tabeli 16.4)



Rys. 16.22. Szerokości obszarów $D_s = 2r$, wewnątrz których natężenie pola przekracza zadaną wartość w funkcji odległości od anteny (stacja reporterska SNG o parametrach jak w tabeli 16.4)



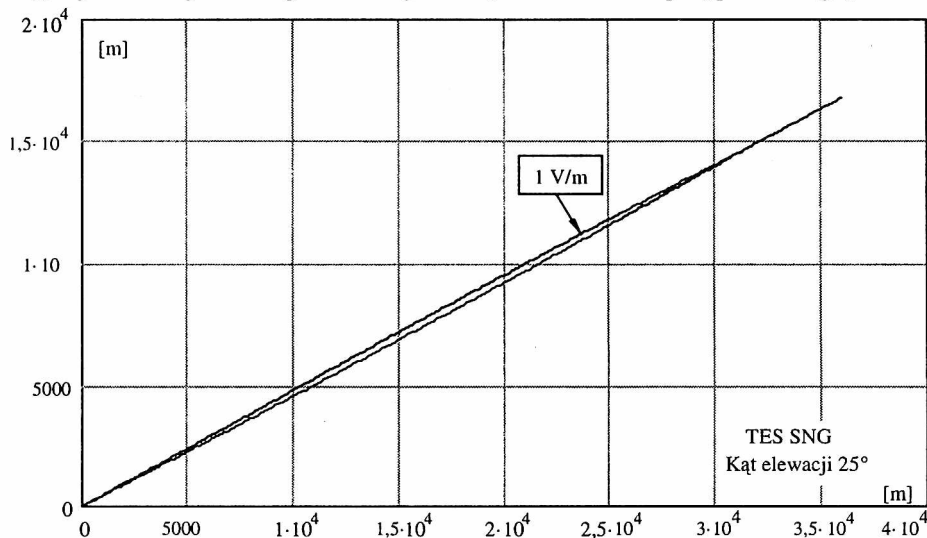
Rys. 16.23. Szerokości obszarów $D_s = 2r$, wewnątrz których natężenie pola przekracza zadaną wartość w funkcji odległości od anteny (stacja centralna systemu VSAT o parametrach jak w tabeli 16.4)



Rys. 16.24. Szerokości obszarów $D_s = 2r$, wewnątrz których natężenie pola przekracza zadaną wartość w funkcji odległości od anteny (stała stacja satelitarna TV o parametrach jak w tabeli 16.4)

Z przedstawionych wcześniej rysunków widać, jak zmieniają się szerokości obszarów w zależności od typu stacji i natężenia pola. Dane te należy traktować jako reprezentatywne dla danego typu stacji. Aby wyobrazić sobie kształt obszaru, wewnątrz którego natężenie pola przekracza określoną wartość, dokonano obliczeń dla satelitarnej stacji reporterskiej SNG o parametrach podanych w tabeli 16.4. Założono, że antena tej stacji jest ustawiona pod kątem elewacji 25° . Wyznaczony obszar określa minimalna

wartość natężenia pola wynosząca 1 V/m. Stację tę wybrano ze względu na stosunkowo szeroką strefę, w której natężenie pola przekracza 1 V/m. Wyniki przedstawiono na rysunku 16.25. Jak widać, w liniowym układzie współrzędnych, w którym oś x określa odległość od stacji liczoną wzdłuż powierzchni Ziemi, oś y wysokość punktów, w których natężenie pola wynosi 1 V/m od powierzchni Ziemi (nie uwzględniono krzywizny Ziemi), wyznaczony obszar jest niezwykle wąski i kształtem przypomina igłę.



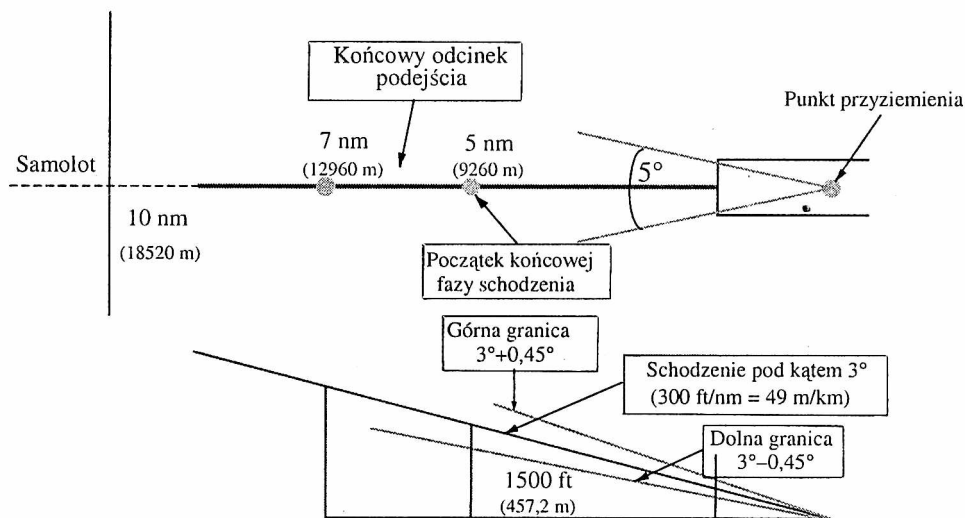
Rys. 16.25. Kształt obszaru, w którym $E \geq 1$ V/m dla satelitarnej stacji reporterskiej SNG z anteną ustawioną pod kątem elewacji 25°

16.2.5. PRZELOT SAMOŁOTU PRZEZ GŁÓWNĄ WIĄZKĘ

W celu określenia czasu przebywania samolotu w głównej wiązce anteny stacji naziemnej podczas lądowania należy określić szerokość tej wiązki (na rys. 16.27 jest to kąt 2γ), jak również znać ścieżkę podejścia samolotu do lądowania za pomocą systemu ILS. Dla danego typu stacji można precyzyjnie określić szerokość obszaru, w którym natężenie pola jest wyższe niż zadana wartość. Metodę wyznaczenia obszaru przedstawiono wcześniej. Szerokość wiązki można również oszacować ze wzoru (16.8), określającego miejsca zerowe charakterystyki promieniowania anteny z równomiernym rozkładem pola w aperturze. Ze względu jednak na potrzebę analizy najgorszego przypadku i uniezależnienie się od parametrów stacji do określenia szerokości obszaru promieniowania pożądanego można zastosować odpowiednie normy międzynarodowe. Zalecenie ITU-R 465-3 [48] dotyczące charakterystyki promieniowania anteny naziemnej stacji satelitarnej poza główną wiązką ogranicza kształt obwiedni tej charakterystyki od kąta 1° od osi wiązki. Obszar nie objęty tym zaleceniem o szerokości 2° jest zatem umownie przyjmowany jako obszar głównej wiązki. Zalecenie ITU-R 580-5 [49] rozszerza ten kąt dla anten o małym zysku. Obszar poza główną wiązką dla

anten o stosunku D/λ z zakresu od 35 do 100 zaczyna się od kąta $100/(D/\lambda)^\circ$. Norma ETS 300 159 [32] dotycząca terminali VSAT oraz prETS 300 327 [64] dotycząca reporterskich stacji satelitarnych SNG definiują obszar promieniowania pożądanego o szerokości 5° ($2,5^\circ$ od osi głównej wiązki). Jak zatem widać, przyjęcie na podstawie istniejących zaleceń jednej wartości określającej szerokość głównej wiązki jest trudne. Stanowi ono kompromis pomiędzy objęciem możliwie dużej liczby mogących wystąpić przypadków a jak najlepszym opisem rzeczywistej sytuacji. Z przedstawionych wcześniej rozważań wynika jednak, że niezależnie od tego, którą wartość zalecaną przyjmujemy, w rzeczywistości wiązka i tak będzie znacznie węższa.

Największe zagrożenie ze strony naziemnych stacji satelitarnych występuje podczas lądowania samolotu. W trakcie tej operacji samolot wykorzystuje elektroniczny system wspomagania lądowania ILS. System ten korzysta z różnych przyrządów pomiarowych i odbiorników, których zakłócenie może mieć katastrofalne skutki. Dlatego też analizie poddano tę fazę lotu samolotu. Na rysunku 16.26 pokazano typową ścieżkę podejścia samolotu do lądowania za pomocą systemu ILS.



Rys. 16.26. Ścieżka podejścia przy lądowaniu z wykorzystaniem ILS

Do analizy wybrano najczęściej stosowany kąt elewacji osi ścieżki podejścia ILS $\varphi = 3^\circ$. Niezależnie od typu samolotu w odległości od 18 do 13 km (10–7 mil morskich (nm – nautical mile)) powinien on się znaleźć we wiązce systemu ILS. Na wysokości $h_{kr} = 300$ m (1000 stóp (ft – foot)) pilot musi podjąć ostateczną decyzję, czy ląduje czy podrywa samolot do góry. Decyzji tej nie może już zmienić, dlatego wysokość ta jest najbardziej newralgicznym miejscem fazy lądowania, w którym uzyskanie błędnych danych z pokładowej części systemu ILS może prowadzić do katastrofy. Wysokość tę wybrano do analizy możliwości zakłócenia systemu ILS przez naziemną stację satelitarną. Dla uproszczenia analizę prowadzono dla lokalizacji stacji na przedłużeniu pasa startowego (rys. 16.27).

stąd

$$l = d \left(\frac{\sin(\varepsilon + \gamma)}{\sin(180^\circ - \varphi - \varepsilon - \gamma)} - \frac{\sin(\varepsilon - \gamma)}{\sin(180^\circ - \varphi - \varepsilon + \gamma)} \right). \quad (16.33)$$

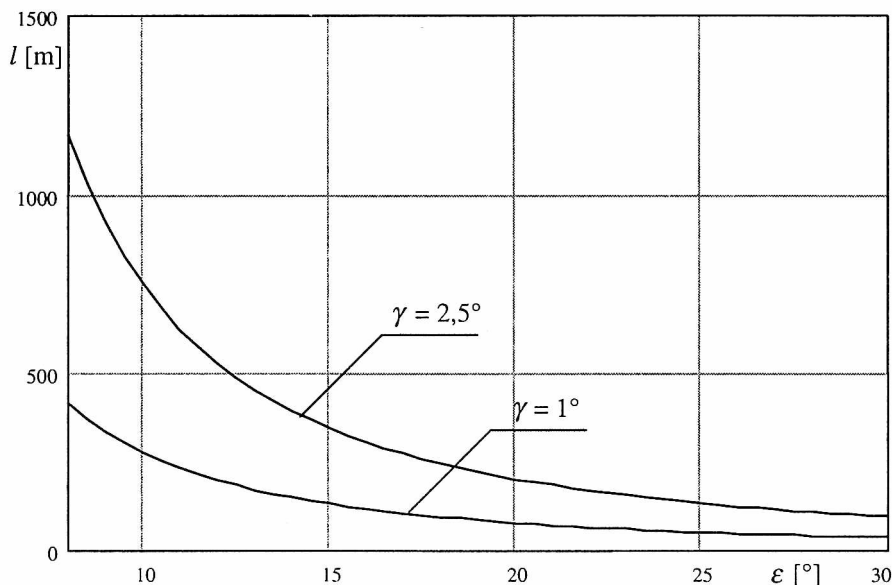
W celu wyznaczenia poziomu promieniowania w punkcie przecięcia ścieżki podejścia z osią głównej wiązki anteny należy określić odległość tego punktu od stacji satelitarnej AO , a następnie dla danego typu stacji na podstawie wcześniej przedstawionych przebiegów strumienia mocy lub natężenia pola w funkcji odległości odczytać odpowiednią wartość. Długość boku AO w trójkącie AOB można wyznaczyć z twierdzenia sinusów

$$AO = \frac{d \sin(\varphi)}{\sin(180^\circ - \varphi - \varepsilon)}. \quad (16.34)$$

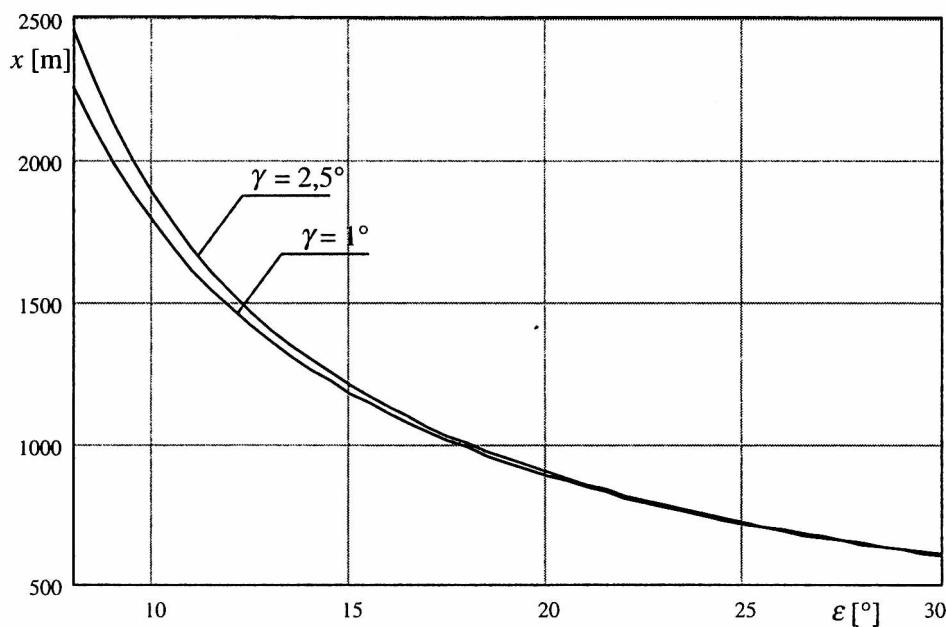
Czas przebywania samolotu w obszarze promieniowania pożądanego podczas podejścia do lądowania

$$t = \frac{l}{v}, \quad (16.35)$$

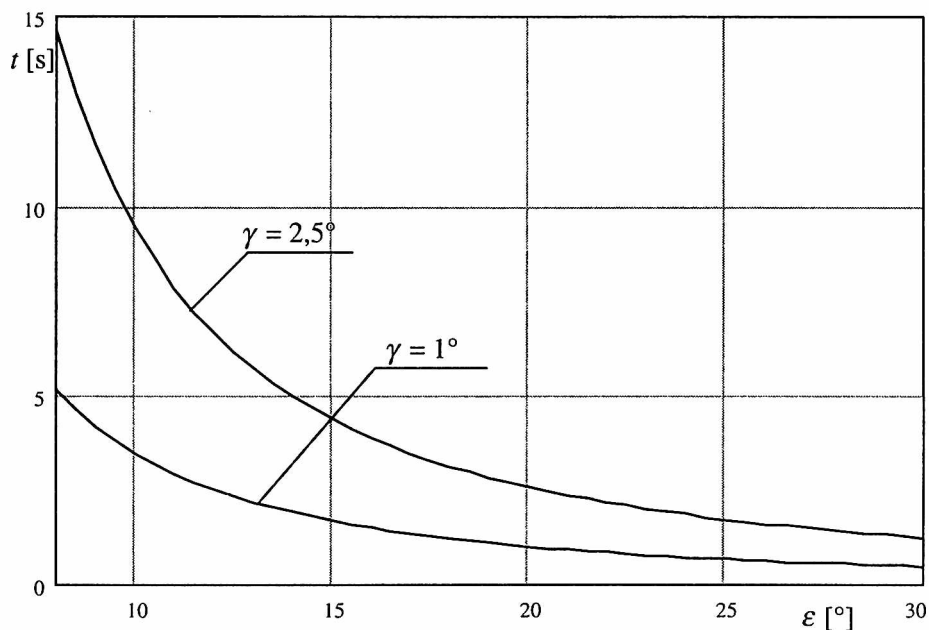
przy czym v jest prędkością samolotu podczas podejścia. Do celów analizy przyjęto prędkość $v = 77$ m/s (150 węzłów). Obliczenia prowadzono dla dwóch szerokości obszaru promieniowania pożądanego dla różnych wartości kąta elewacji anteny. Wyniki przedstawiono na rysunkach 16.28–16.30.



Rys. 16.28. Droga samolotu w obszarze promieniowania pożądanego o szerokości kątowej 2γ równej 2° (ITU-R) i 5° (ETSI) w funkcji kąta elewacji anteny stacji satelitarnej ε



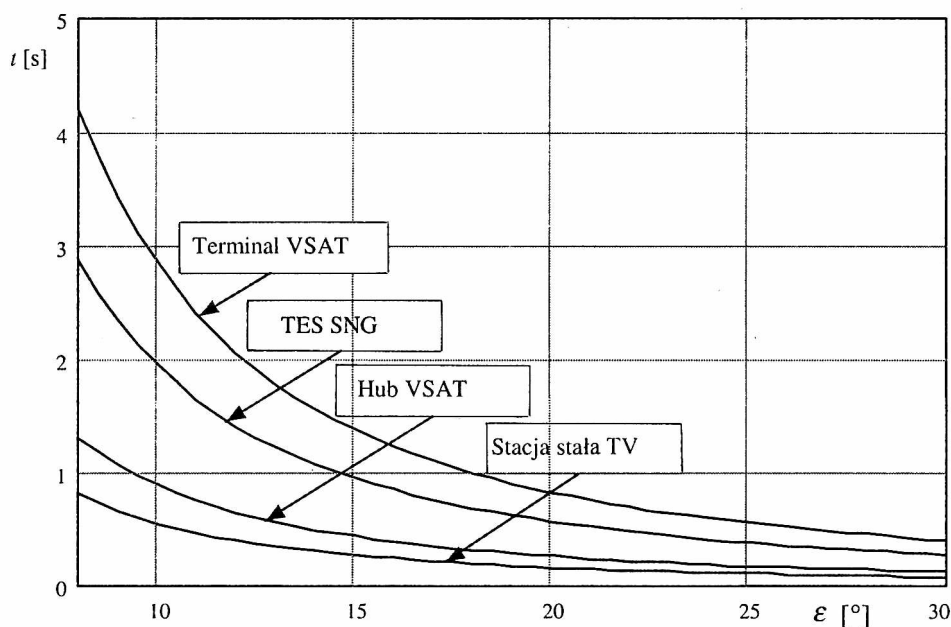
Rys. 16.29. Odległość stacji satelitarnej od punktu przecięcia głównej wiązki anteny ze ścieżką podejścia samolotu w funkcji kąta elewacji anteny stacji satelitarnej ε (dla szerokości obszaru promieniowania pożądanego równej 2° i 5°)



Rys. 16.30. Czas przebywania samolotu w obszarze promieniowania pożądanego naziemnej stacji satelitarnej w funkcji kąta elewacji anteny stacji satelitarnej ε (dla szerokości obszaru promieniowania pożądanego równej 2° i 5°)

Z obliczeń wynika, że samolot będzie przebywał w obszarze promieniowania pożądanego o szerokości 2° przez czas od około 0,5 s do około 5 s, a dla obszaru o szerokości 5° od około 1,25 s do 15 s.

Dokładniejsze określenie czasu, w jakim samolot przelatuje przez wiązkę główną anteny, wymaga uwzględnienia parametrów elektrycznych anteny (jej charakterystyki), które zależą od rodzaju stacji. Jako lepsze przybliżenie można przyjąć, że główną wiązkę anteny ograniczają miejsca zerowe charakterystyki. Szerokość β zdefiniowanej w ten sposób wiązki dla anteny z równomiernym rozkładem pola w aperturze można określić z zależności (16.8). Wykonano obliczenia dla stacji, których parametry zamieszczono w tabeli 16.4. Wyniki przedstawiono na rysunku 16.31.



Rys. 16.31. Czas przebywania samolotu w obszarze promieniowania pożądanego naziemnej stacji satelitarnej (o parametrach jak w tab. 16.4) w funkcji kąta elewacji ϵ anteny tej stacji (obszar promieniowania pożądanego ograniczony jest miejscami zerowymi charakterystyki promieniowania anteny)

16.2.6. OKREŚLENIE POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W GŁÓWNEJ WIĄZCE ANTENY ODDZIAŁUJĄCEGO NA SAMOŁOT PODCZAS PODEJŚCIA DO LĄDOWANIA

Kraje członkowskie Unii Europejskiej dążą do jak największego rozpowszechnienia systemów VSAT oraz satelitarnej służby reporterskiej przez daleko idącą liberalizację polityki licencyjnej. Polega ona na pozostawieniu operatorom świadczącym tego typu usługi prawie nieograniczonych praw do instalowania terminali VSAT i stacji reporterskich wszędzie, gdzie jest to możliwe. Systemy te są reklamowane jako sys-

P' w chwili $t = t_0 = 0$ w odległości $x(t_0)$ od stacji satelitarnej. Z trójkąta ABP' , stosując twierdzenie sinusów, możemy obliczyć tę odległość

$$x(t_0) = d \frac{\sin(\varphi)}{\sin\left(\pi - \varphi - \varepsilon - \frac{\beta}{2}\right)}. \quad (16.35)$$

Odległość d wyznaczamy z wzoru (16.29).

Odległość b punktu P' od punktu przyziemienia możemy wyznaczyć podobnie

$$b = x(t_0) \frac{\sin\left(\varepsilon + \frac{\beta}{2}\right)}{\sin(\varphi)}. \quad (16.36)$$

Wraz z upływem czasu odległość samolotu od stacji zmienia się. Można ją wyznaczyć w dowolnej chwili t za pomocą twierdzenia kosinusów do trójkąta ABX

$$x(t) = \sqrt{d^2 + (b - vt)^2 - 2d(b - vt)\cos(\varphi)}. \quad (16.37)$$

Kąt $\alpha(t)$ można obliczyć z twierdzenia sinusów dla trójkąta AXP'

$$\alpha(t) = \arcsin\left[vt \frac{\sin\left(\pi - \varepsilon - \frac{\beta}{2} - \varphi\right)}{x(t)}\right]. \quad (16.38)$$

Kąt $\delta\alpha(t)$ pomiędzy osią głównej wiązki anteny a kierunkiem wyznaczonym przez kąt $\alpha(t)$ można określić z warunków:

jeśli $\alpha(t) \leq \beta/2$ to $\delta\alpha(t) = \beta/2 - \alpha(t)$,

jeśli $\alpha(t) > \beta/2$ to $\delta\alpha(t) = -\alpha(t) - \beta/2$.

Mamy zatem wszystkie niezbędne dane do określenia natężenia pola w danym punkcie.

Strumień mocy w strefie dalekiej można obliczyć z zależności (16.16). Po podstawieniu zamiast odległości D_{sd} (granica pomiędzy strefą bliską i daleką promieniowania) odległości do analizowanego punktu $x(t)$ otrzymujemy wyrażenie

$$S(t)_d = \frac{G_u(t)P_{ef}}{4\pi x^2(t)}, \quad (16.39)$$

w którym:

$$G_u(t) = G_t F_{n,u}^2(t), \quad (16.40)$$

G_t jest zyskiem anteny wyznaczanym z wzoru (16.3), natomiast

$$F_{n,u}(t) = 2 \left| \frac{J_1(u(t))}{u(t)} \right| \quad (16.41)$$

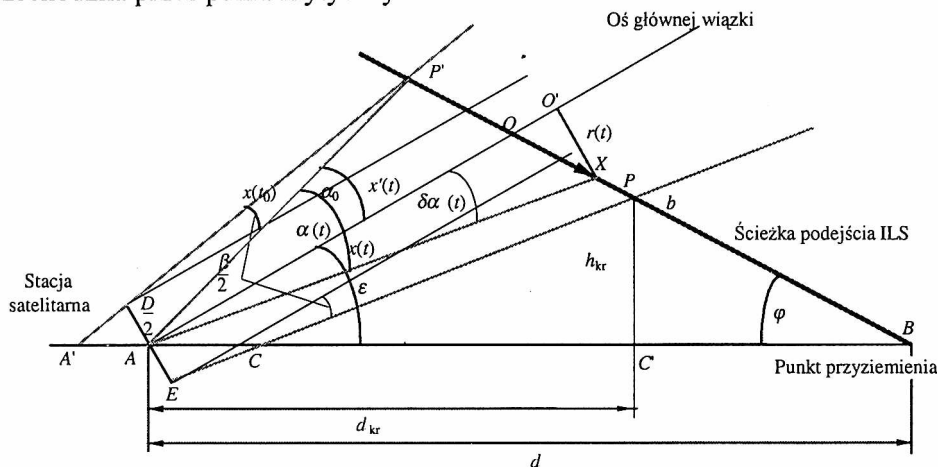
jest unormowaną charakterystyką promieniowania anteny. Funkcję $u(t)$ określa zależność

$$u(t) = \frac{\pi D}{l} \sin(\delta\alpha(t)). \quad (16.42)$$

Związek pomiędzy natężeniem pola w strefie dalekiej a strumieniem mocy podaje zależność (16.23).

16.2.6.2. ANALIZA ROZKŁADU NATĘŻENIA POLA W STREFIE BLISKIEJ

Geometrię układu, stosowaną do analizy amplitudy natężenia pola w znajdującym się w strefie bliskiej końcowym odcinku podejścia samolotu do lądowania, przedstawiono na rysunku 16.33. Niezmieniony pozostaje warunek, by dolna krawędź wiązki przechodziła przez punkt krytyczny P .



Rys. 16.33. Geometria układu w strefie bliskiej (antena o średnicy apertury D)

Odległość d pomiędzy stacją satelitarną a punktem przyziemienia samolotu jest sumą odległości AC , CB . Odległość AC można wyznaczyć, stosując twierdzenie sinusów do trójkąta ACE

$$AC = \frac{D}{2} \frac{\sin\left(\frac{\pi + \beta}{2}\right)}{\sin\left(\epsilon - \frac{\beta}{2}\right)}. \quad (16.43)$$

Dla zadanej wysokości h_{kr} odległość CB określa zależność

$$CB = \frac{h_{kr}}{\operatorname{tg}\left(\epsilon - \frac{\beta}{2}\right)} + \frac{h_{kr}}{\operatorname{tg}(\varphi)}. \quad (16.44)$$

Odległość AA' można obliczyć z wzoru

$$AA' = \frac{D}{2} \frac{\sin\left(\frac{\pi + \beta}{2}\right)}{\sin\left(\epsilon + \frac{\beta}{2}\right)}, \quad (16.45)$$

długości $a = A'P'$ i $b = BP'$ boków trójkąta $BP'A$ oblicza się natomiast z zastosowaniem twierdzenia sinusów:

$$a = (d + AA') \frac{\sin(\varphi)}{\sin\left(\pi - \varphi - \varepsilon - \frac{\beta}{2}\right)}, \quad (16.46)$$

$$b = (d + AA') \frac{\sin\left(\varepsilon + \frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\pi - \varphi - \varepsilon - \frac{\beta}{2}\right)}. \quad (16.47)$$

Odległość $x(t_0)$ punktu, w którym samolot wlatuje w obszar głównej wiązki promieniowania anteny, można określić za pomocą twierdzenia kosinusów do trójkąta $A'AP'$

$$x(t_0) = \sqrt{AA'^2 + a^2 - 2AA' a \cos\left(\varepsilon + \frac{\beta}{2}\right)}. \quad (16.48)$$

Kąt α_0 pomiędzy osią głównej wiązki promieniowania anteny a kierunkiem wyznaczającym punkt, w którym samolot wlatuje w obszar tej wiązki, można obliczyć, stosując twierdzenie sinusów do trójkąta ABP'

$$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{b}{x(t_0)} \sin(\kappa)\right). \quad (16.49)$$

Po zastosowaniu twierdzenia sinusów do trójkąta $AP'X$ można wyznaczyć kąt $\alpha(t)$, którego jedno ramie (AP') jest stałe, drugie natomiast „śledzi” przelatujący ze stałą prędkością v samolot

$$\alpha(t) = \arcsin\left(\frac{vt}{x(t)} \sin(\pi - \alpha_0 - \varphi)\right). \quad (16.50)$$

Odchylenie $\delta\alpha(t)$ pozycji samolotu w chwili t od osi głównej wiązki można określić z warunków:

jeśli $\alpha(t) \leq \alpha_0 - \varepsilon$, to $\delta\alpha(t) = \alpha_0 - \varepsilon - \alpha(t)$,

jeśli $\alpha(t) > \alpha_0 - \varepsilon$, to $\delta\alpha(t) = -\alpha(t) - \alpha_0 + \varepsilon$.

Zastosowanie modelu rozkładu natężenia pola dla strefy bliskiej wymaga znajomości odległości $x'(t)$ od anteny do przekroju, w którym znajduje się analizowany punkt oraz odległości $r(t)$ tego punktu od osi wiązki. Wielkości te można wyznaczyć z zależności:

$$x'(t) = x(t) \cos(\delta\alpha(t)), \quad (16.51)$$

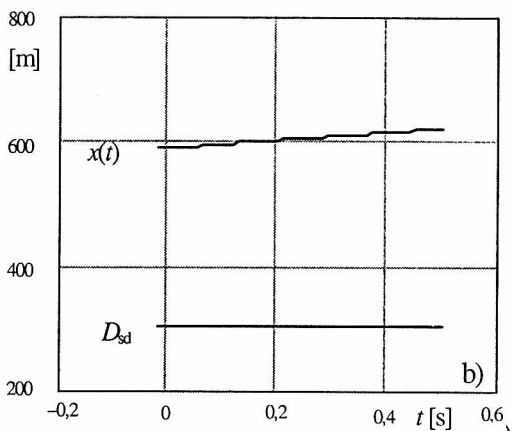
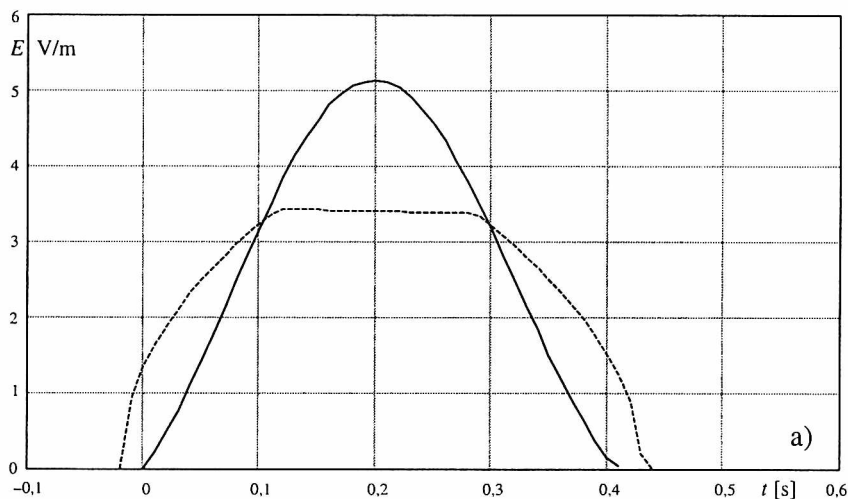
$$r(t) = x(t) \sin(\delta\alpha(t)). \quad (16.52)$$

Maksymalny strumień mocy $S_{\max}$ w przekroju odległym o $x'(t)$ od anteny określa wyrażenie (16.13). Strumień gęstości mocy $S(r)$ w odległości r od osi głównej wiązki

można obliczyć z wzorów (16.24) i (16.25), po wcześniejszym wyznaczeniu $D_{00}(x'(t))$ i $D_{ef}(x'(t))$. Znając strumień mocy, możemy wyznaczyć natężenie pola, posługując się zależnością (16.23).

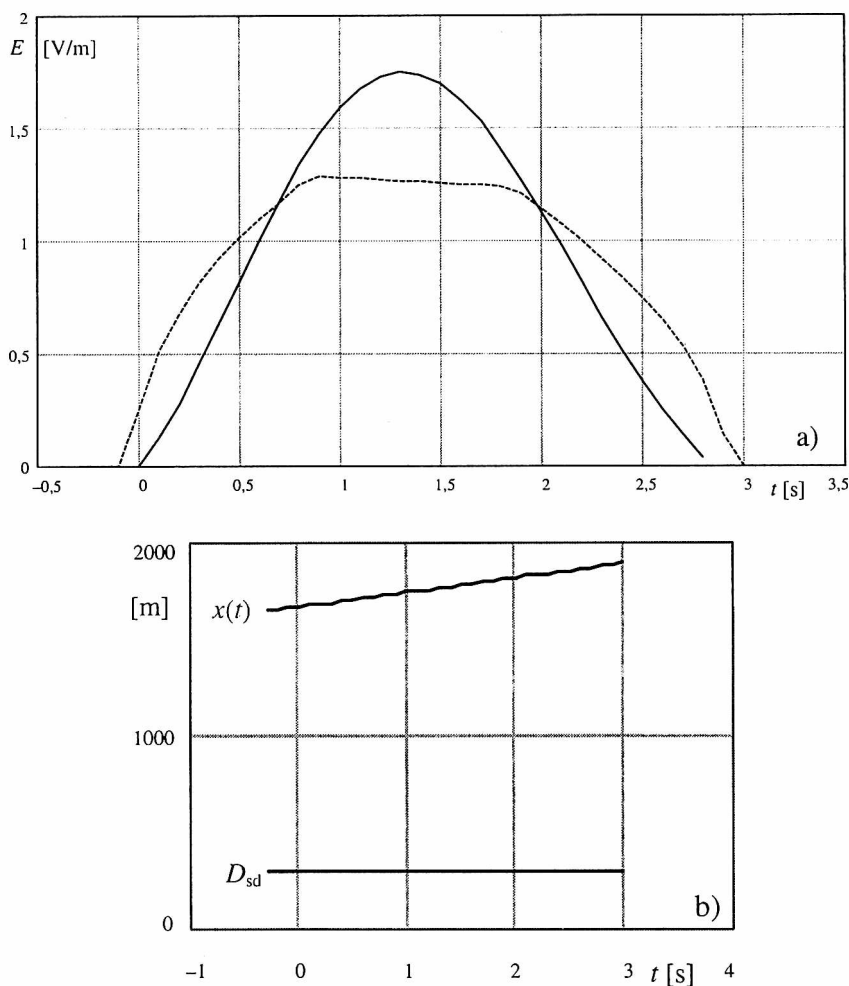
16.2.6.3. WYNIKI SYMULACJI

Na podstawie wcześniej opracowanych modeli wykonano obliczenia dla stacji satelitarnych o parametrach przedstawionych w tabeli 16.4. Dla każdej stacji wybrano dwa kąty elewacji ε równe 30° i 10° . Dla stacji satelitarnych rozmieszczonych na terenie Polski i współpracujących z satelitami geostacjonarnymi kąt 30° jest w przybliżeniu maksymalnym kątem elewacji, natomiast 10° – minimalnym [88]. Na rysunkach 16.34a–16.41a przedstawiono, w celach porównawczych, wyniki uzyskane za pomocą obu metod.



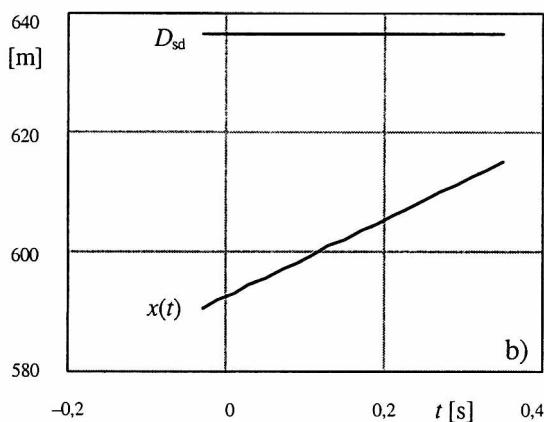
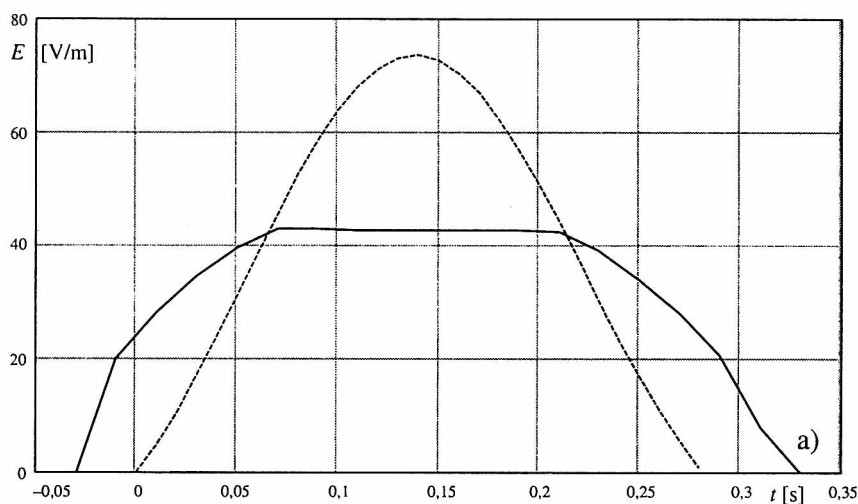
Rys. 16.34. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny typowego terminalu VSAT (kąt elewacji anteny 30°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)

Jedynie jeden z modeli w danym przypadku należy uwzględnić. Wynika to z odległości pomiędzy analizowanymi punktami ścieżki podejścia i stacją satelitarną. Jeśli odległości te są większe niż odległość do strefy dalekiej, to natężenie pola należy wyznaczać na podstawie modelu dla strefy dalekiej, w przeciwnym razie – dla strefy bliskiej. Przebieg amplitudy natężenia pola dla właściwego w danym przypadku modelu zaznaczono linią ciągłą. W każdym analizowanym przypadku wyznaczone odległości pomiędzy anteną i analizowanymi punktami zaprezentowano na rysunkach 16.34b÷16.41b. Zaznaczono również odległość D_{sd} do strefy dalekiej. Do analizy wybrano tę samą prędkość samolotu podczas podejścia do lądowania wynoszącą 77 m/s (ok. 280 km/h).



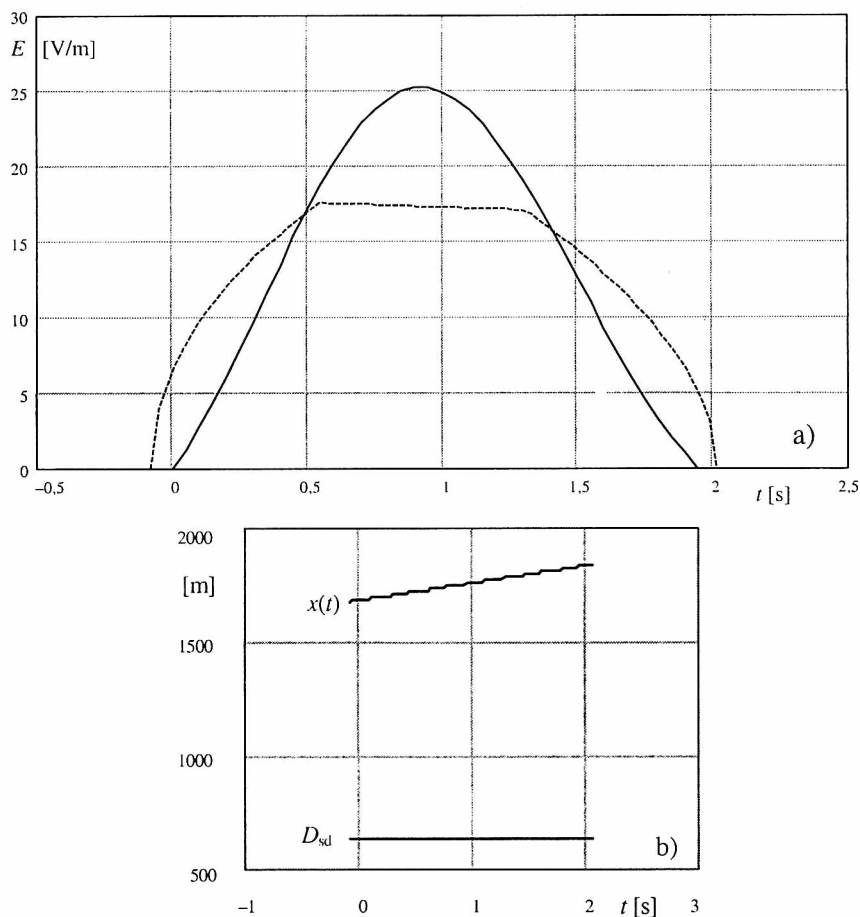
Rys. 16.35. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny typowego terminalu VSAT (kąt elewacji anteny 10°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)

Dla typowego terminalu VSAT analizowane punkty były położone w strefie dalekiej. Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego zmieniała się w granicach od 5,1 V/m (30°) do 1,7 V/m (10°). Czas przebywania samolotu w głównej wiązce wynosił od 0,4 s (30°) do 2,8 s (10°). W porównaniu z poziomami podatności elektronicznego sprzętu pokładowego wartości te są małe. Można zatem stwierdzić, że zagrożenie ze strony typowych terminali VSAT na systemy lotnicze jest mniejsze niż ze strony innych typów stacji. Należy również zwrócić uwagę na dość dobrą zbieżność wyników uzyskanych obiema metodami. Wynika stąd, że model dla strefy bliskiej można również stosować w strefie dalekiej.



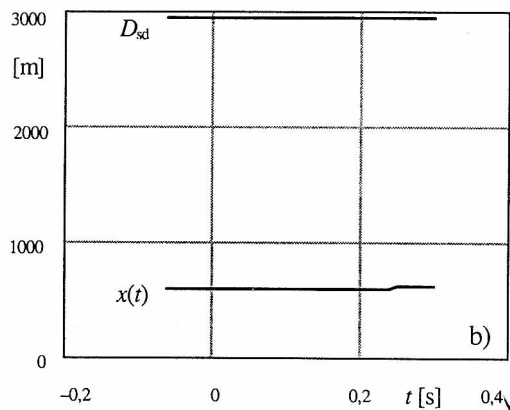
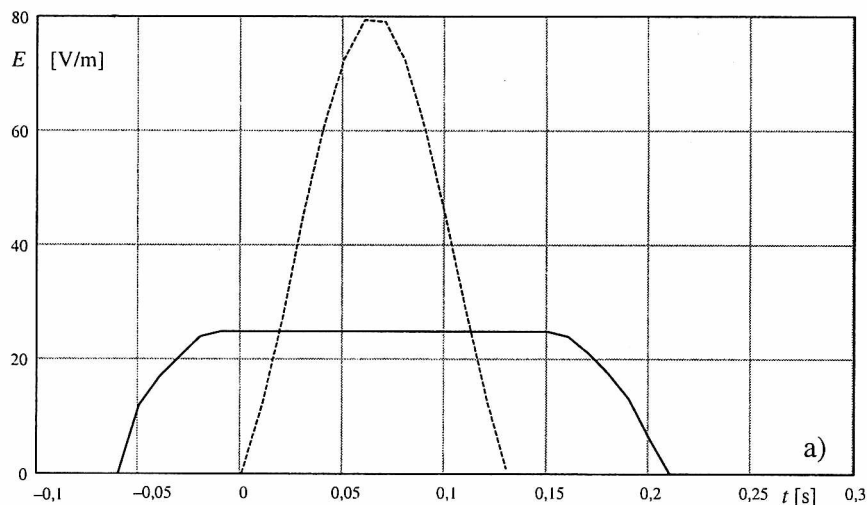
Rys. 16.36. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny typowej przenośnej satelitarnej stacji reporterskiej SNG (kąt elewacji anteny 30°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)

Przenośne stacje satelitarne służby reporterskiej mają dużo bardziej zróżnicowane parametry elektryczne. Trudno jest zatem powiedzieć, że parametry analizowanej stacji firmy Dornier są typowe. Stacja ta jest instalowana na podwoziu mercedesa i służy do transmisji sygnałów telewizyjnych. Do grupy stacji reporterskich zalicza się również stacje typu „fly away”. Mają one jednak inną konstrukcję nadającą się do transportu lotniczego. Ponadto stosuje się również stacje reporterskie tylko do transmisji dźwięku. Stacje takie mają stosunkowo małe anteny (np. w kształcie rozkładanego parasola) i promieniają niewielkie moce. Pod względem parametrów elektrycznych bardziej przypominają terminale VSAT. Dlatego też wyników uzyskanych dla analizowanej stacji reporterskiej nie należy odnosić do wszystkich rodzajów stacji zaliczanych do tej klasy.



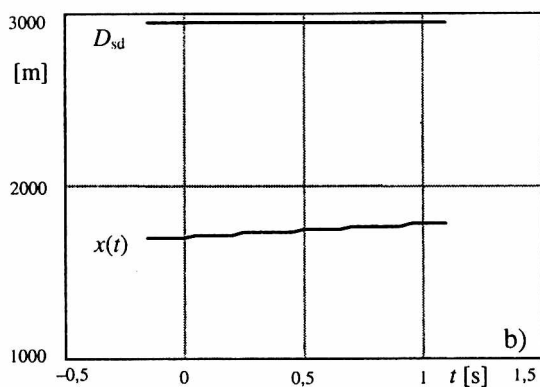
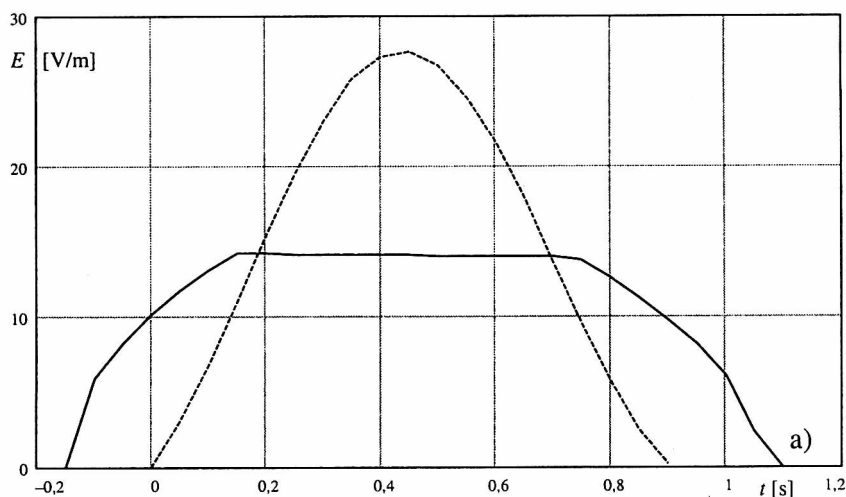
Rys. 16.37. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny typowej przewoźnej satelitarnej stacji reporterskiej SNG (kąt elewacji anteny 10°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)

Dla stacji SNG analizowane punkty były położone w strefie bliskiej przy kącie elewacji 30° i dalekiej przy kącie elewacji 10° . Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego zmieniała się w granicach od 42 V/m (30°) do 25 V/m (10°). Czas przebywania samolotu w głównej wiązce wynosił od 0,35 s (30°) do 1,9 s (10°). W porównaniu z poziomami podatności elektronicznego sprzętu pokładowego wartości te są tego samego rzędu. Można zatem stwierdzić, że zagrożenie ze strony tej klasy stacji satelitarnych na systemy lotnicze jest duże. Uwzględnione zostało to w niektórych krajach europejskich przez wprowadzenie wcześniej przedstawionych odpowiednich procedur upoważniających operatora stacji do nadawania. Należy również zwrócić uwagę na dość dobrą zbieżność wyników uzyskanych obiema metodami dla strefy dalekiej i gorszą dla strefy bliskiej. Wynika z tego, że model dla strefy dalekiej można jedynie w ograniczonym zakresie stosować w strefie bliskiej.



Rys. 16.38. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny typowej stacji centralnej systemu VSAT (hub) (kąt elewacji anteny 30°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)

Analizując poziom promieniowania stacji centralnej systemu VSAT, przyjęto do obliczeń parametry stacji zainstalowanej w TSSA Bielsko-Biała. Stacja ta zalicza się do dużych. W praktyce stacje centralne VSAT mogą być mniejsze pod względem wymiarów anteny i mocy promieniowanej. Również w tym przypadku trudno jest mówić o typowości parametrów.

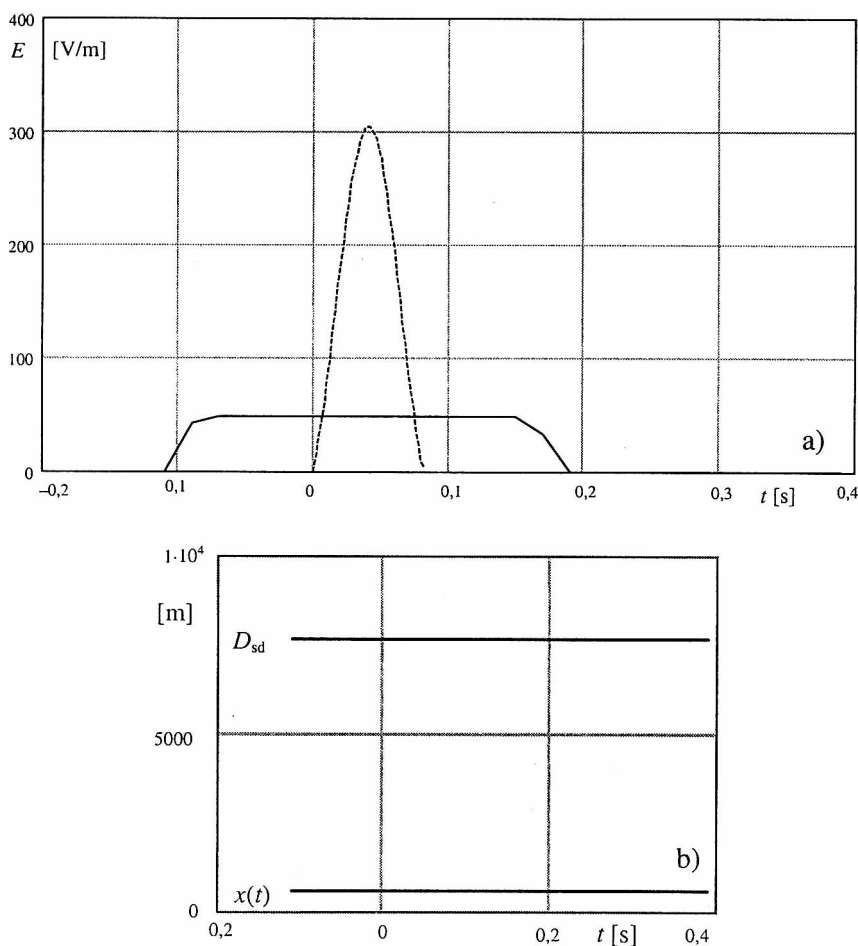


Rys. 16.39. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny typowej stacji centralnej systemu VSAT (hub) (kąt elewacji anteny 10°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)

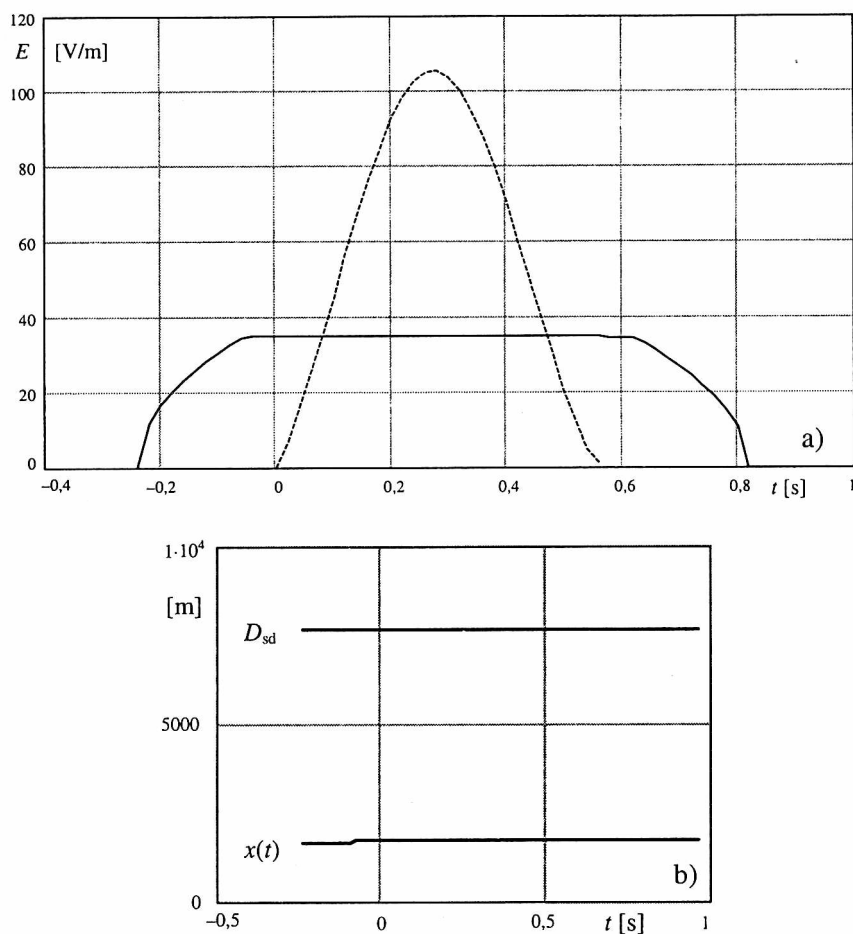
Dla stacji centralnej systemu VSAT analizowane punkty były położone w strefie bliskiej. Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego zmieniała się w granicach od 25 V/m (30°) do 14 V/m (10°). Czas przebywania samolotu w głównej wiązce

wynosił od 0,26 s (30°) do 1,1 s (10°). W porównaniu z poziomami podatności elektronicznego sprzętu pokładowego wartości te są tego samego rzędu. Można zatem stwierdzić, że zagrożenie ze strony tej klasy stacji satelitarnych na systemy lotnicze jest duże. Należy również zwrócić uwagę na duże rozbieżności wyników uzyskanych obiema metodami. A zatem, jak w poprzednim przypadku, model dla strefy dalekiej można jedynie w ograniczonym zakresie stosować w strefie bliskiej.

Do wyznaczenia poziomu promieniowania stałej stacji satelitarnej stosowanej do transmisji sygnałów telewizyjnych przyjęto do obliczeń parametry stacji zainstalowanej w Warszawie przy ul. J.P. Woronicza.



Rys. 16.40. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny typowej stałej stacji satelitarnej stosowanej do transmisji sygnału telewizyjnego (kąt elewacji anteny 30°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)



Rys. 16.41. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny typowej stacji satelitarnej stosowanej do transmisji sygnału telewizyjnego (kąt elewacji anteny 10°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)

Dla tej stacji analizowane punkty leżały w strefie bliskiej. Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego zmieniała się w granicach od 50 V/m (30°) do 35 V/m (10°). Czas przebywania samolotu w głównej wiązce wynosił od 0,3 s (30°) do 1,1 s (10°). W porównaniu z poziomami podatności elektronicznego sprzętu pokładowego wartości te są tego samego rzędu. Można zatem stwierdzić, że zagrożenie ze strony tej klasy stacji satelitarnych na systemy lotnicze jest duże. Jak poprzednio, występują bardzo duże rozbieżności wyników uzyskanych obiema metodami. W tym przypadku model dla strefy dalekiej można jedynie w bardzo ograniczonym zakresie stosować w strefie bliskiej, która rozciąga się aż do odległości 7633 m.

Z przedstawionych rezultatów obliczeń można wyciągnąć następujące wnioski:

- duże zagrożenie ze strony naziemnych stacji satelitarnych powodują satelitarne stacje reporterskie SNG oraz stacje pracujące w stałej służbie satelitarnej transmitujące zarówno dane (np. stacje centralne VSAT), jak i sygnały telewizyjne,

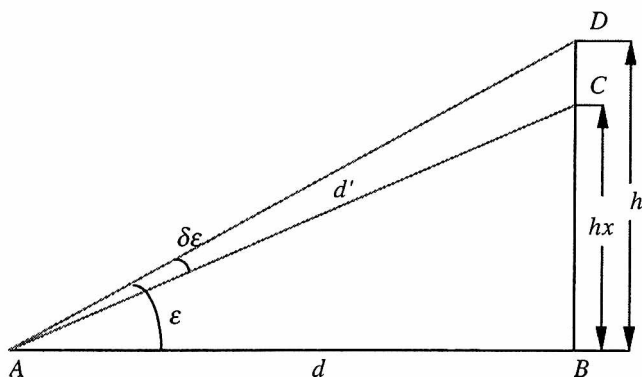
- typowe terminale VSAT stwarzają znacznie mniejsze zagrożenia dla służb lotniczych, maksymalne natężenie pola w odległości kilkuset metrów od stacji jest rzędu kilku V/m,

- stosowanie zależności obowiązujących w strefie dalekiej do obliczania poziomu promieniowania w strefie bliskiej prowadzi do dużych błędów. Wyznaczone w taki sposób wartości są zawyżone, co z punktu widzenia kompatybilności elektromagnetycznej jest korzystne (poziomy sygnałów zakłócających są zawyżone). W przypadku wyznaczania poziomu promieniowania dużo bliżej niż odległość do granicy stref D_{sd} , uzyskane wyniki są obarczone zbyt dużym błędem. Należy wtedy bezwzględnie stosować model dla strefy bliskiej.

16.2.7. OKREŚLENIE POŁA ELEKTROMAGNETYCZNEGO POZA GŁÓWNĄ WIĄZKĄ ANTENY

Naziemna stacja satelitarna promieniuje energię elektromagnetyczną nie tylko w obszarze promieniowania pożądanego. Część energii jest wypromieniowana poprzez listki boczne w obszarze promieniowania niepożądanego. Strumień mocy w tym obszarze najlepiej określić w punkcie przecięcia przedłużenia osi pasa startowego z azymutem osi głównej wiązki promieniowania.

Jeśli analizowane punkty znajdują się w strefie dalekiej do wyznaczenia rozkładu strumienia mocy, można zastosować charakterystykę promieniowania anteny. Jeśli analizowane punkty leżą w strefie bliskiej ($d' < D_{sd}$), to można postępować w ten sam sposób. Otrzymane w takim przypadku wyniki będą zawyżone, co jedynie zwiększy margines bezpieczeństwa. Jeśli natomiast analizowane punkty znajdują się dużo bliżej niż odległość do granicy stref ($d' \ll D_{sd}$), to nie należy stosować modelu dla strefy dalekiej. Geometrię układu przedstawiono na rysunku 16.42.



Rys. 16.42. Geometria układu do określania rozkładu strumienia mocy w funkcji wysokości

W punkcie A znajduje się stacja satelitarna odległa o d od punktu przecięcia B azymutu osi głównej wiązki promieniowania z osią (lub jej przedłużeniem) pasa startowego. Antena stacji jest wycelowana w kierunku satelity. Jej kąt elewacji wynosi ε . Oś głównej wiązki promieniowania znajduje się w punkcie D na wysokości h . Zadanie polega na znalezieniu strumienia mocy S w punkcie C znajdującym się na wysokości hx . Prosta łącząca punkty A i C jest odchylona od osi głównej wiązki promieniowania (prosta AD) o kąt $\delta\varepsilon$. Stosując twierdzenie sinusów do trójkąta ABC , otrzymujemy:

$$\delta\varepsilon(hx) = \arcsin \left[\frac{(h - hx) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon\right)}{\sqrt{d^2 + hx^2}} \right], \text{ dla } hx < h, \quad (16.53a)$$

$$\delta\varepsilon(hx) = \arcsin \left[\frac{(hx - h) \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varepsilon\right)}{\sqrt{d^2 + hx^2}} \right], \text{ dla } hx > h. \quad (16.53b)$$

Strumień gęstości mocy S w punkcie C można wyznaczyć, określając moc promieniowaną izotropowo $EIRP$ w kierunku punktu C i uwzględniając podstawowe straty transmisji wynikające z tłumienia wolnej przestrzeni L . Zastępczą moc promieniowaną izotropowo w kierunku punktu C można wyznaczyć z wzoru

$$EIRP [\delta\varepsilon(hx)] = G_t + F_{dB} [\delta\varepsilon(hx)] + P_t, \quad (16.54)$$

w którym:

G_t – zysk energetyczny anteny, dBi,

$F_{dB}[\delta\varepsilon(hx)]$ – unormowana charakterystyka promieniowania anteny w funkcji kąta $\delta\varepsilon$ liczonego od osi głównej wiązki anteny, dB,

P_t – moc doprowadzana do anteny, dB(W).

Do obliczeń można przyjąć zysk energetyczny i charakterystyki anteny zalecane przez normy ETSI [32, 64] lub ITU-R [18]. Normy te i różnice między nimi omówiono w p. 9.1. Łatwiej jest postąpić zgodnie z normą ETSI 300 159 (dla terminali VSAT) lub 300 327 (dla stacji reporterskich SNG) i przyjąć maksymalne dopuszczalne wartości $EIRP$ poza główną wiązką.

Maksymalna wartość $EIRP$ w pasmie 40 kHz w nominalnym pasmie w kierunku φ stopni, liczonym od osi głównej wiązki anteny, nie może przekraczać następujących poziomów (dla składowej o polaryzacji zamierzonej):

33–25 log (φ) – 10 log N dB(W)	dla	$2,5^\circ \leq \varphi \leq 7^\circ$,
12–10 log N dB(W)	dla	$7^\circ < \varphi \leq 9,2^\circ$,
36–25 log (φ) – 10 log N dB(W)	dla	$9,2^\circ < \varphi \leq 48^\circ$,
–6–10 log N dB(W)	dla	$\varphi > 48^\circ$.

Dla terminali VSAT N określa maksymalną liczbę terminali, która jednocześnie może nadawać na tej samej częstotliwości nośnej. Dla stacji reporterskiej SNG przyjmuje się $N = 1$. Do dalszej analizy przyjęto $N = 1$, jako najgorszy przypadek i obejmujący oba typy stacji.

Tłumienie związane z propagacją i rozproszeniem energii można wyznaczyć ze wzoru

$$L(hx) = 10 \log [4\pi (d^2 + hx^2)] \quad \text{dB}. \quad (16.55)$$

Strumień mocy S oraz natężenie pola elektrycznego E w pasmie częstotliwości 40 kHz w punkcie C określają zależności:

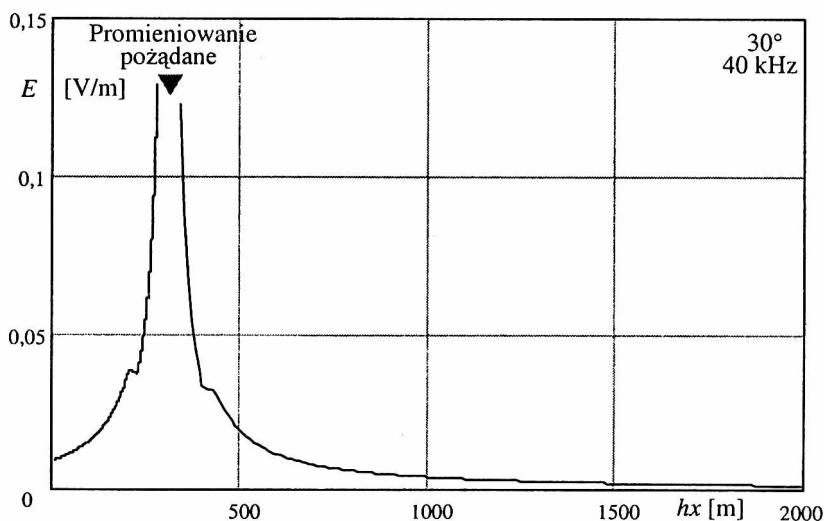
$$S_{\text{dB}}(hx) = EIRP [\delta\epsilon(hx)] - L(hx) \quad \text{dB(W/m}^2\text{)}, \quad (16.56a)$$

$$S(hx) = 10^{\frac{S_{\text{dB}}(hx)}{10}}, \quad (16.56b)$$

$$E(hx) = \sqrt{120\pi} \cdot 10^{\frac{S_{\text{dB}}(hx)}{20}}. \quad (16.57)$$

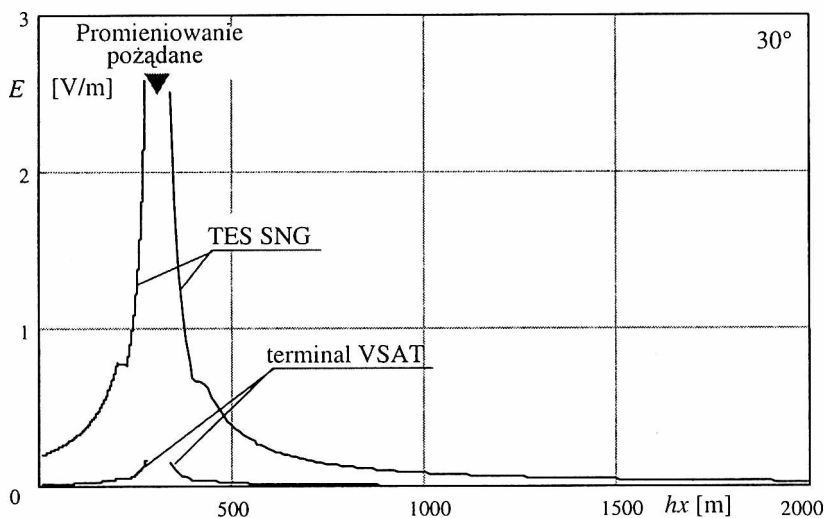
Z uwagi na ograniczenie zastępczej mocy promieniowanej izotropowo ($EIRP$) poza główną wiązką, nie jest konieczna znajomość ani mocy nadajnika stacji ani technicznych parametrów anteny. Analizę można prowadzić dla obu rodzajów stacji równocześnie, gdyż funkcja opisująca $EIRP$ na danym kierunku jest w obu przypadkach taka sama.

Obliczenia wykonano dla stacji satelitarnej położonej w odległości $d = 535$ m. Odległość ta w przybliżeniu odpowiada wcześniej przyjętej odległości do obliczeń promieniowania w wiązce głównej.



Rys. 16.43. Rozkład natężenia pola E (w pasmie 40 kHz) w funkcji wysokości hx w punkcie odległym od anteny o 535 m ($\epsilon = 30^\circ$)

Stopień zagrożenia powodowanego promieniowaniem poza główną wiązką w stosunku do promieniowania w głównej wiązce można porównać po uwzględnieniu szerokości pasma, w którym stacja nadaje. Przyjmując, że terminal VSAT wykorzystuje 100 kHz do transmisji danych, stacja reporterska natomiast transmituje sygnał telewizyjny w pasmie 27 MHz, otrzymamy rozkłady granicznego natężenia pola przedstawione na rysunku 16.44.



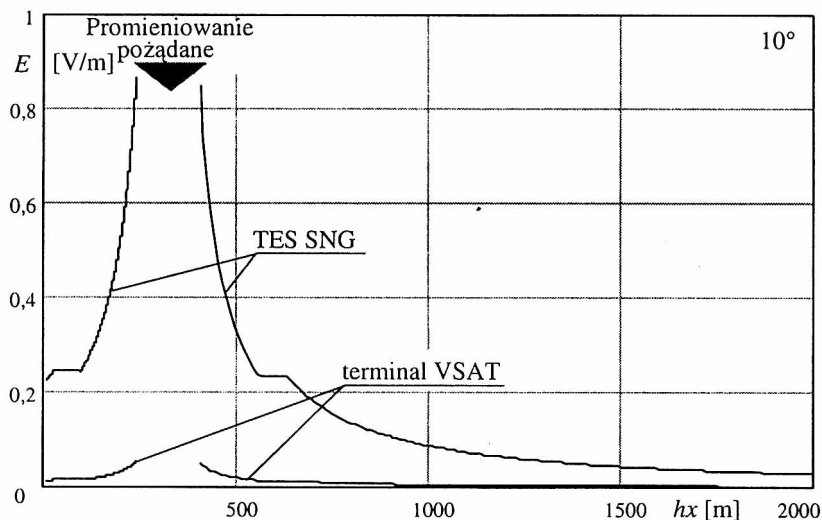
Rys. 16.44. Rozkład natężenia pola E w funkcji wysokości hx w punkcie odległym o 535 m od anteny ($\varepsilon = 30^\circ$) dla terminalu VSAT o pasmie nadawania 100 kHz i dla stacji reporterskiej SNG o pasmie nadawania 27 MHz

Wyznaczone graniczne wartości natężenia pola poza główną wiązką są o rząd mniejsze od wartości występujących w głównej wiązce, dlatego też stopień zagrożenia jest dużo niższy.

Czas przebywania samolotu w słabszym polu będzie natomiast znacznie dłuższy. Ma to jednak drugorzędne znaczenie. Takie same obliczenia dokonano dla odległości $d = 1830$ m oraz kąta elewacji anteny ε równego 10° . Przedstawiono je na rysunku 16.45.

Dla tej odległości, jak można było przypuszczać, natężenie pola jest jeszcze niższe. Procedura wyznaczania rozkładu natężenia pola w funkcji wysokości (tzw. sondaż pionowy), która uwzględnia promieniowanie poza obszarem promieniowania pożądanego, jest szczególnie użyteczna, jeśli wykonujemy ją w punkcie przecięcia osi pasa startowego z azymutem anteny stacji satelitarnej. Pozwala ona określić poziomy narażenia elektromagnetycznego i stopień zagrożenia elektronicznej aparatury pokładowej samolotu podczas fazy lądowania. Procedura ta została zastosowana w pracach [4, 5, 6] do koordynacji naziemnych stacji satelitarnych stosowanych w celu transmisji sygnałów telewizyjnych zainstalowanych w Warszawie z ścieżkami podejścia do łą-

dowania lotniska Okęcie. Z uwagi na charakter stacji do analizy przyjęto obwiednię charakterystyki promieniowania anteny zgodną z zaleceniem 580-1 ITU-R [49].



Rys. 16.45. Rozkład natężenia pola E w funkcji wysokości hx w punkcie odległym o 1830 m od anteny ($\epsilon = 10^\circ$) dla terminalu VSAT o pasmie nadawania 100 kHz i dla stacji reporterskiej TES SNG o pasmie nadawania 27 MHz

16.2.8. WYZNACZENIE MAKSYMALNYCH POZIOMÓW PROMIENIOWANIA W PASMIE PRACY NAZIEMNEJ STACJI SATELITARNEJ VSAT

We wcześniejszych rozdziałach przedstawiono metody wyznaczenia poziomów promieniowania w pasmie pracy naziemnych stacji satelitarnych oraz wykonano obliczenia dla stacji o typowych parametrach. Dla dużych stałych stacji satelitarnych służących do nadawania programów telewizyjnych, jak i dla stacji centralnych systemu VSAT, nie ma ograniczeń związanych z maksymalną zastępczą mocą promieniowaną izotropowo $EIRP$. Stacje te podlegają koordynacji międzynarodowej oraz koordynacji ze służbami lotniczymi [4, 5, 6, 7, 67]. Satelitarne stacje reporterskie SNG również nie mają ustalonej dopuszczalnej wartości $EIRP$. Ze względu jednak na charakter ich pracy nie podlegają takim samym procedurom koordynacyjnym, jak duże stacje satelitarne. Wyniki analizy pokazują, że stacje satelitarne SNG o typowych parametrach emisyjnych mogą stanowić zagrożenie dla systemów lotniczych. Najmniejsze niebezpieczeństwo związane z zakłóceniami stwarzają terminale VSAT o typowych parametrach emisyjnych. Terminale te, w przeciwieństwie jednak do wcześniej wymienionych typów stacji, mają określony dopuszczalny poziom zastępczej mocy promieniowanej izotropowo, ograniczony rozmiar apertury anteny i ograniczoną szybkość transmisji. Na podstawie tych parametrów można zbudować model terminalu VSAT

stwarzającego największe zagrożenie interferencyjne i wyznaczyć dla niego takie same parametry, jak dla typowego terminalu VSAT, tj.:

- strumień gęstości mocy i natężenie pola elektrycznego w głównej wiązce promieniowania w funkcji odległości,
- kształty obszarów, wewnątrz których natężenie pola elektrycznego przekracza zadane wartości dopuszczalne (szerokość obszaru w funkcji odległości od anteny),
- rozkład natężenia pola elektrycznego w zadanej odległości od terminalu w funkcji wysokości (poza główną wiązką) z kątem elewacji jako parametrem.

Przeprowadzone rozważania teoretyczne dla tzw. najgorszego przypadku mogą stać się w niedalekiej przyszłości istotne ze względu na coraz większe upowszechnianie się systemów multimedialnych mających znacznie większe wymagania co do szybkości transmisji niż dotychczasowe aplikacje. W systemach tych mogą być zastosowane terminale VSAT o parametrach zbliżonych do granicznych.

Przedstawiona wcześniej definicja terminalu VSAT określa następujące parametry:

- $EIRP \leq 57 \text{ dB(W)}/40 \text{ kHz}$,
- $D \leq 2,4 \text{ m}$ (ITU) lub $D \leq 3,7 \text{ m}$ (ETSI),
- $R_b \leq 2,048 \text{ Mb/s}$.

Na ich podstawie można wyznaczyć maksymalną wartość $EIRP$ terminalu VSAT. Maksymalna szerokość pasma zajmowana przez terminal VSAT zależy od rodzaju użytej modulacji. Skuteczność widmową wykorzystania kanału $\rho = R_b/B$ dla wybranych, stosowanych w radiokomunikacji satelitarnej, rodzajów modulacji pokazano w tabeli 16.6.

Tabela 16.6. Teoretyczne i praktyczne wartości widmowej skuteczności wykorzystania kanału dla różnych typów modulacji

Typ modulacji	Widmowa sprawność ρ , b/s/Hz	
	teoretyczna	praktyczna
BPSK	0,5	0,7÷0,8
QPSK	1,0	1,4÷1,6
MSK	0,67	0,9÷1,1

Zakładając, że terminal VSAT stosuje najmniej skuteczny widmowo rodzaj modulacji BPSK i nadaje z dopuszczalną szybkością transmisji 2,048 Mb/s, możemy wyznaczyć szerokość zajmowanego pasma. Wynosi ona teoretycznie 4,096 MHz, a w praktyce, przyjmując $\rho = 0,7$, wynosi około 3 MHz. Maksymalną zastępczą moc promieniowaną izotropowo przez terminal VSAT $EIRP_{\max,B}$ (w decybelach) w danym pasmie można wyznaczyć z zależności

$$EIRP_{\max,B} = EIRP_{\max, 40 \text{ kHz}} + 10 \log \left(\frac{B_{\text{kHz}}}{40} \right). \quad (16.58)$$

Dla pasma $B = 3 \text{ MHz}$ otrzymujemy $EIRP_{\max, 3 \text{ MHz}} = 57 + 18,8 = 75,8 \text{ dB}$.

Jeśli znana jest średnica apertury anteny D , to możemy wyznaczyć moc wypromieniowaną w wiązce głównej $P_{ef} = EIRP_{\max, B} \cdot G_{VSAT}$. Zysk energetyczny anteny obliczymy z zależności $G_{VSAT} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$, przyjmując współczynnik wykorzystania apertury $\eta = 0,55$. Prowadzono obliczenia dla trzech wielkości apertury anteny: 1,8 m, 2,4 m i 3,8 m. Apertura o średnicy 1,8 m jest typowa i dla niej wykonano wcześniejsze obliczenia. Apertury 2,4 m i 3,8 m są odpowiednio wielkościami dopuszczalnymi zgodnie z zaleceniami ITU i ETSI. W tabeli 16.7 zestawiono obliczone wartości zysku energetycznego G_{VSAT} oraz mocy wypromieniowanej w wiązce głównej P_{ef} . Jeśli założymy, jak poprzednio, że w wiązce głównej wypromieniowane jest 90% mocy doprowadzonej do anteny, to możemy również wyznaczyć wymaganą moc na wejściu anteny.

Tabela 16.7. Moc promieniowana przez terminal VSAT w głównej wiązce zapewniająca uzyskanie dopuszczalnej wartości $EIRP$ dla różnych średnic apertury anteny ($f = 14,125$ GHz)

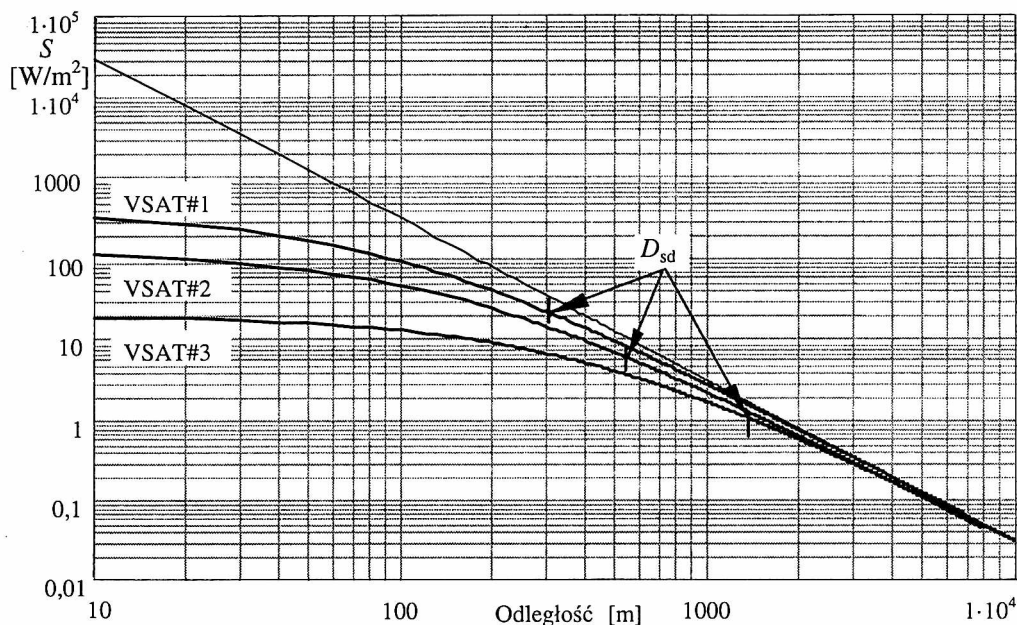
Średnica apertury	Zysk energetyczny	Moc P_{ef}	
	dBi	dB(W)	W
1,8	45,9	29,8	964
2,4	48,4	27,3	542
3,8	52,4	13,4	216

Stosując takie same zależności jak poprzednio, możemy wyznaczyć poziomy promieniowania pożądanego w funkcji odległości dla terminali VSAT o parametrach podanych w tabeli 16.8. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 4.46 i 4.47.

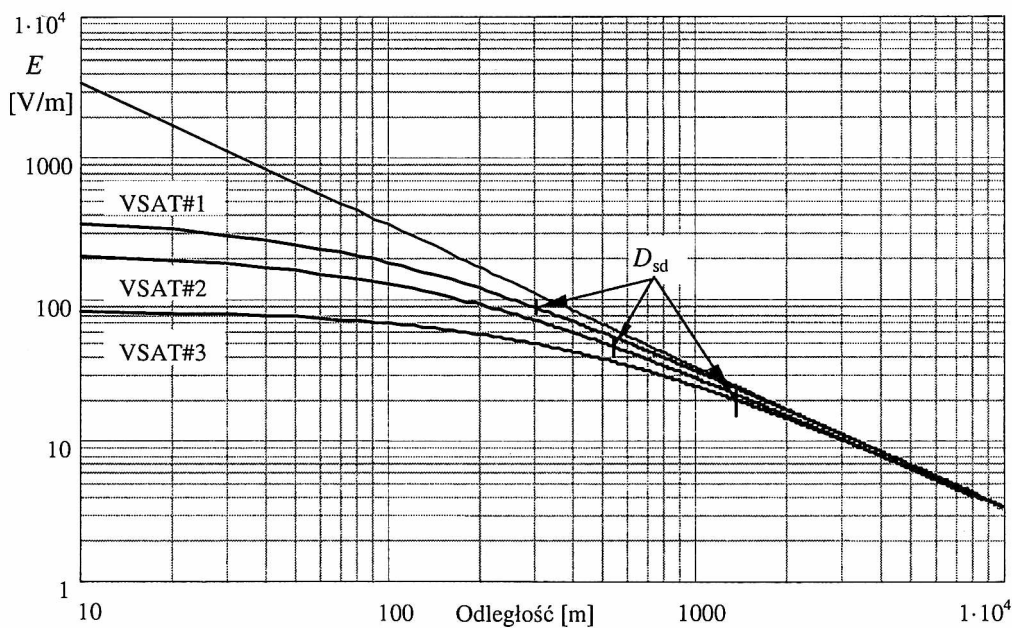
Tabela 16.8. Parametry terminali VSAT o maksymalnej zastępczej mocy promieniowanej izotropowo $EIRP_{\max, 40 \text{ kHz}} = 57$ dB(W)

	Moc P_{ef} W	Średnica apertury D m	Częstotliwość f MHz	Stosunek D/λ	Granica stref D_{sd} m
Terminal VSAT #1	964	1,8	14,125	85	305
Terminal VSAT #2	542	2,4	14,125	113	542
Terminal VSAT #3	216	3,8	14,125	179	1360

Dla pierwszego z terminali VSAT strefa niebezpieczna, w której gęstość strumienia mocy przekracza wartość 100 W/m^2 występuje do odległości 88 m, dla drugiego terminalu do odległości 15 m. W przypadku trzeciego terminalu strefa niebezpieczna nie występuje. Na rysunku 16.46 zaznaczono również odległości do strefy dalekiej D_{sd} oraz gęstość strumienia mocy wyznaczoną z zależności (16.2), która obowiązuje dla strefy dalekiej.

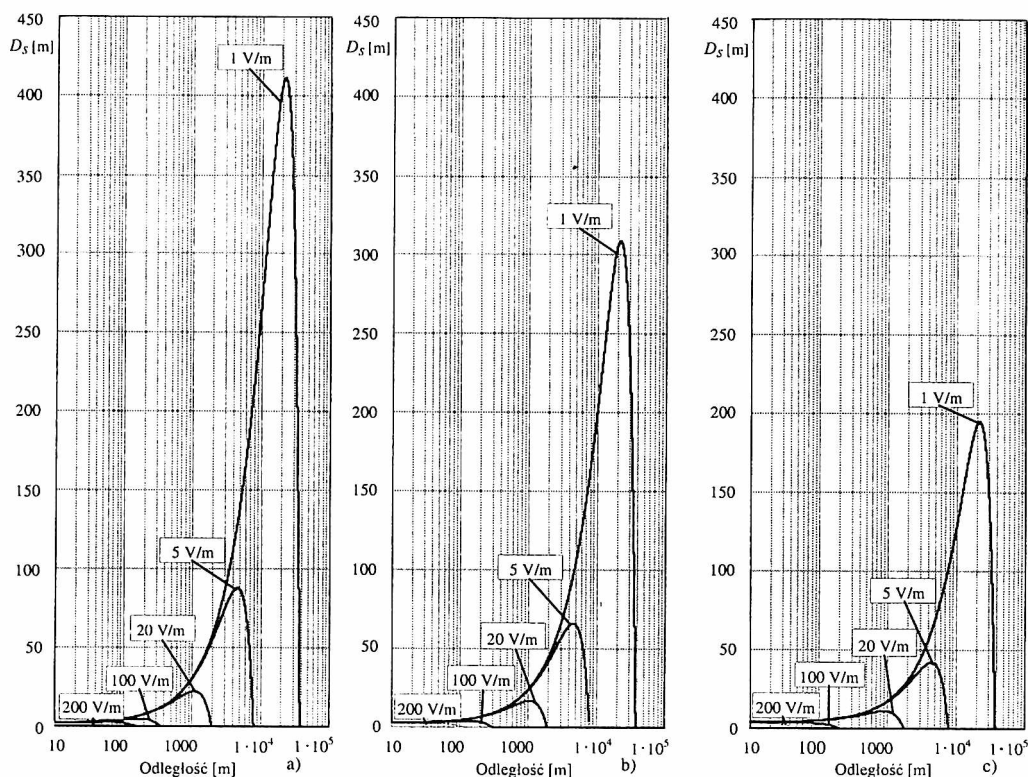


Rys. 16.46. Gęstość strumienia mocy S dla trzech terminali VSAT o tej samej wartości $EIRP$, ale o różnych wielkościach apertury anteny i mocach promieniowanych w głównej wiązce



Rys. 16.47. Natężenie pola elektrycznego E dla trzech terminali VSAT o tej samej wartości $EIRP$, ale o różnych wielkościach apertury anteny i mocach promieniowanych w głównej wiązce

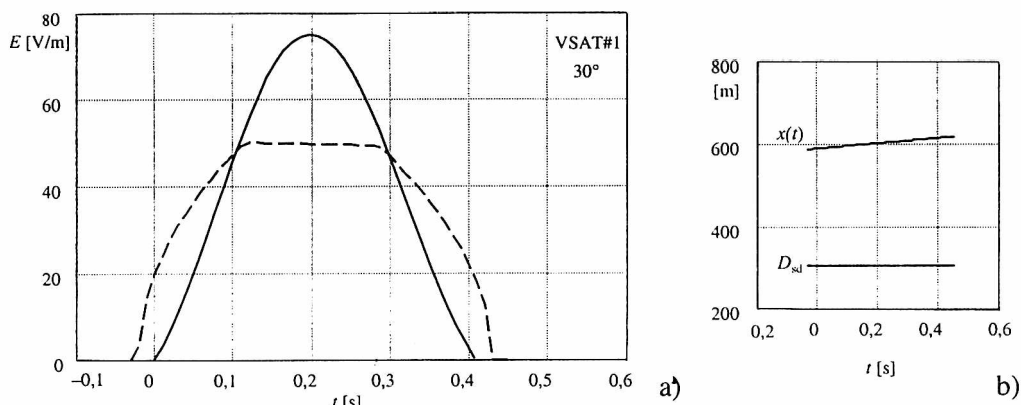
Za pomocą wcześniej wyprowadzonych zależności wyznaczono szerokości obszarów, w których natężenie pola elektrycznego przekracza zadane wartości 1, 5, 20, 100 i 200 V/m.



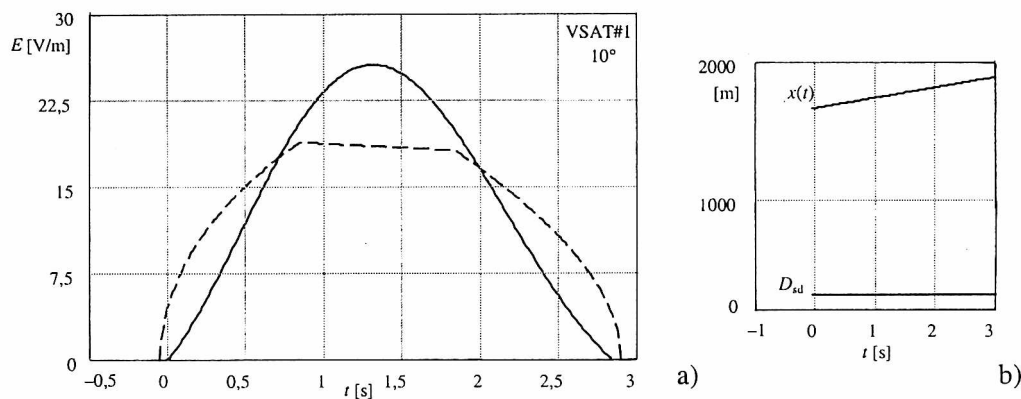
Rys. 16.48. Szerokości obszaru $D_s = 2r$, wewnątrz których natężenie pola elektrycznego przekracza zadaną wartość w funkcji odległości od anteny dla: a) terminalu VSAT#1, b) terminalu VSAT#2, c) terminalu VSAT#3

W przypadku terminali VSAT o granicznej wartości $EIRP$ maksymalne szerokości obszarów są znacznie większe niż dla typowego terminalu VSAT. Dzieje się tak głównie z powodu większej odległości, w której występuje maksimum. Na przykład dla typowego terminalu VSAT maksimum szerokości wiązki o natężeniu pola nie przekraczającym 1 V/m wystąpiło w odległości około 1500 m, a dla terminali z dopuszczalną wartością $EIRP$ wystąpiło w odległości 20 km.

Wykonano również obliczenia kształtu obwiedni impulsu elektromagnetycznego, który oddziałuje na samolot przecinający w fazie lądowania główną wiązkę promieniowania anteny. Wyniki tych obliczeń zaprezentowano na rysunkach od 16.49 do 16.54.

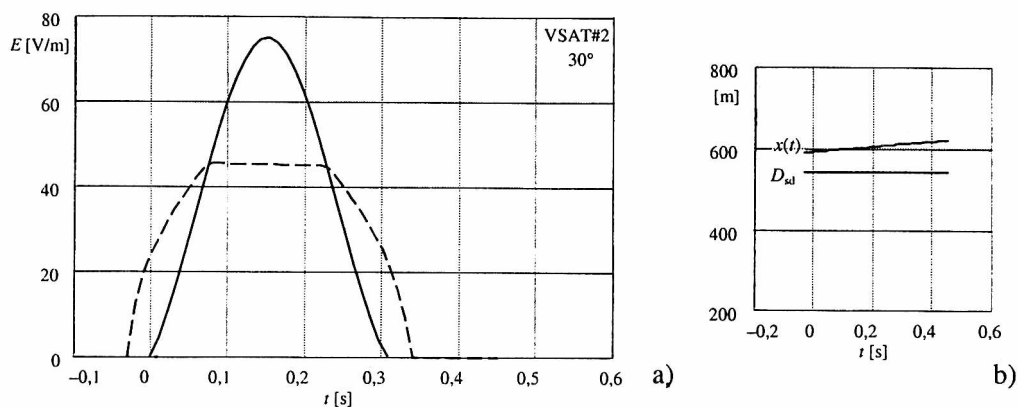


Rys. 16.49. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny terminalu VSAT #1 (kąta elewacji anteny 30°) (a),
b) odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej

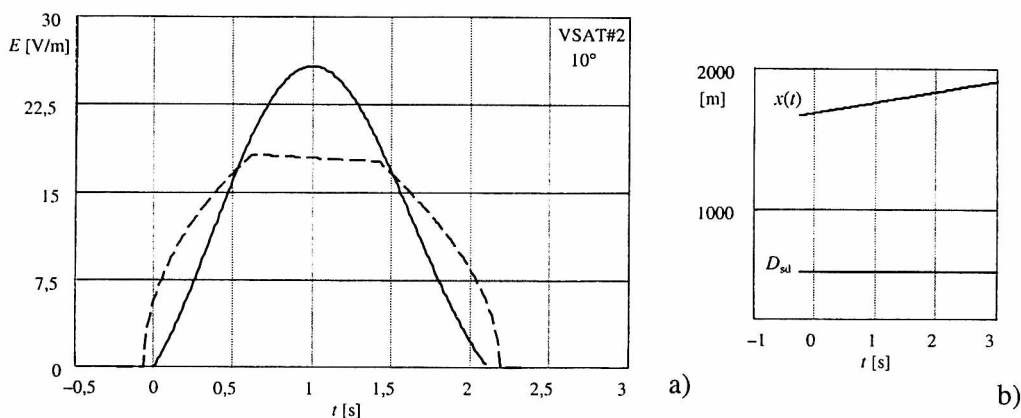


Rys. 16.50. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny terminalu VSAT #1 (kąta elewacji anteny 10°) (a),
odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)

Analiza wyników i ich porównanie z normą z 1989 roku (200 V/m) i EUROCAE JAA z 1993 oraz nowszą normą z 1994 roku (6,8 kV/m) prowadzi do wniosku, że w analizowanych przypadkach nie przekroczono wartości dopuszczalnych pola elektrycznego dla aparatury elektronicznej instalowanej na pokładzie samolotu. Norma z 1984 roku (1 V/m) została jednak przekroczona o bardzo dużą wartość. Stwarza to pewne zagrożenie dla samolotów wyposażonych w starsze urządzenia elektroniczne.

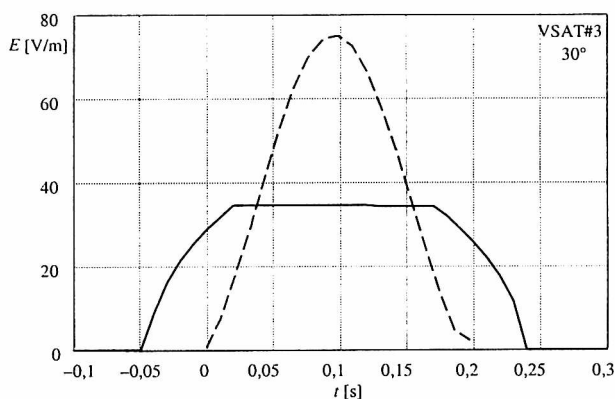


Rys. 16.51. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny terminalu VSAT #2 (kąt elewacji anteny 30°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)

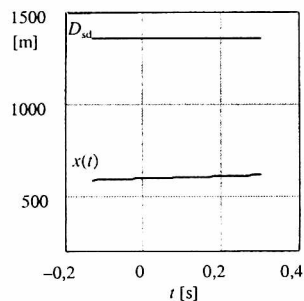


Rys. 16.52. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny terminalu VSAT #2 (kąt elewacji anteny 10°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)

Z analizy wynika również, że z wyjątkiem przypadku, kiedy terminal VSAT #3 nadaje pod kątem elewacji 30° , wystarczy stosować model dla strefy dalekiej. Obliczenia wykonane w tej strefie pokazują, że natężenie pola nie przekracza wartości 80 V/m, gdy kąt elewacji anteny wynosi 30° i wartości 26 V/m, gdy kąt elewacji wynosi 10° . W strefie bliskiej, która wystąpiła dla terminalu VSAT #3 natężenie pola nie przekroczyło wartości 40 V/m.

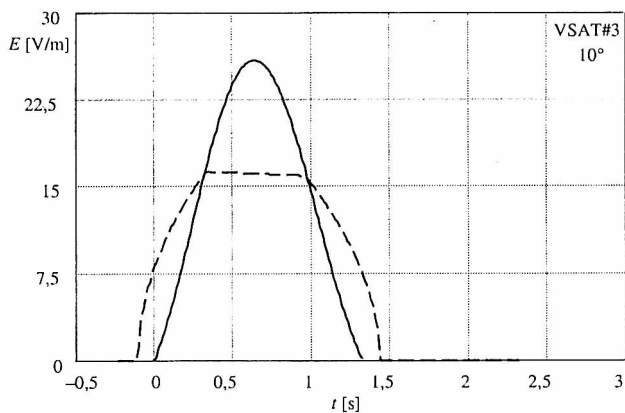


a)

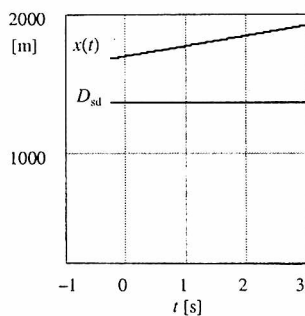


b)

Rys. 16.53. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania anteny terminalu VSAT #3 (kąt elewacji anteny 30°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)



a)



b)

Rys. 16.54. Przebieg amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego podczas przejścia samolotu przez główną wiązkę promieniowania terminalu VSAT #3 (kąt elewacji anteny 10°) (a), odległości $x(t)$ do analizowanych punktów oraz odległość D_{sd} do strefy dalekiej (b)

Przyjęte do obliczeń graniczne parametry terminalu VSAT są wartościami teoretycznymi. Jeśli analizie poddamy wyniki obliczeń szerokości obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego przekracza zadaną wartość, to zauważymy, że w każdym przypadku w pobliżu anteny w wiązce głównej występuje obszar, w którym jest przekroczona wartość 100 W/m^2 lub 194 V/m , odpowiadająca tzw. strefie niebezpiecznej. W strefie tej przebywanie ludzi jest zabronione. Trudno

sobie zatem wyobrazić terminal VSAT, który można instalować bezpośrednio u użytkownika i który może stwarzać poważne zagrożenie dla ludności. Dlatego też ograniczenia wprowadzone przez ITU należy traktować jedynie jako zabezpieczenie przed występowaniem zbyt dużych widmowych koncentracji mocy w wąskich pasmach, które mogą zakłócać inne systemy. Z energią mikrofalową wytwarzaną przez terminal wiąże się zagadnienie ochrony ludzi przed promieniowaniem.

16.3. SKUTECZNOŚĆ EKRANOWANIA KADŁUBÓW STATKÓW POWIETRZNYCH

W literaturze światowej jest bardzo mało informacji dotyczących skuteczności ekranowania kadłubów statków powietrznych w zakresie częstotliwości od 12,5 do 15,5 GHz. W kwietniu 1993 roku firma ERA Technology wykonała na zlecenie Agencji Radiokomunikacyjnej Wielkiej Brytanii pomiary skuteczności ekranowania kadłubów statków powietrznych [78]. Wyniki tych pomiarów umożliwiają wyznaczenie poprawek i ich stosowanie przy określaniu stopnia zagrożenia pokładowej aparatury elektronicznej ze strony naziemnych stacji satelitarnych.

16.3.1. METODA POMIARU

Problemy występujące podczas pomiaru natężenia pola elektrycznego wewnątrz kadłuba są często spowodowane występowaniem rezonansów i związanych z nimi fal stojących o różnorodnych rozkładach zależnych od kąta napromieniowania oraz polaryzacji fali. Dlatego też w praktyce jedyną powtarzalną i do przyjęcia wielkością okazała się maksymalna zmierzona wartość natężenia pola przy zadanej częstotliwości i wszystkich polaryzacjach źródła oświetlającego. Maksymalną wartość nie wyznaczano dla określonego miejsca wewnątrz kadłuba, lecz poszukiwano jej w całej przestrzeni.

Podczas każdego pomiaru kadłub samolotu „oświetlony” był wiązką mikrofalową pod różnymi kątami i dla różnych wysokości i polaryzacji źródła.

Źródło promieniowania umieszczono w odległości od kadłuba gwarantującej odpowiedni poziom jednorodności pola. Wszystkie pomiary wykonano dla statków powietrznych stojących na Ziemi. Przed każdym pomiarem stanowisko pomiarowe było kalibrowane bez badanego obiektu. Zastosowane anteny umożliwiały pomiar w polu dalekim. Pomiary dokonano przy „oświetleniu” kadłuba od przodu, z boku, pod kątem 45° i przy różnych wysokościach źródła o polaryzacji poziomej i pionowej. Poziom wytwarzanego sygnału zapewniał pomiar z minimalnym stosunkiem S/N wewnątrz kadłuba równym 30 dB.

16.3.2. WYNIKI POMIARÓW

Do pomiarów wybrano sześć typów statków powietrznych:

- Piper PA-31-350 Chieftain (mały samolot – awionetka),
- Aerospatiale SA 330E Puma (średniej wielkości śmigłowiec wielozadaniowy),
- Hawker Siddeley HS 748 Serii 1/107 (krótko- i średniodystansowy samolot pasażerski),
- BAC One-Eleven Serii 201AC (krótko- i średniodystansowy samolot transportowy),
- McDonnell Douglas DC-10 Serii 30 (długodystansowy szerokokadłubowy samolot pasażerski),
- Boeing 747 Serii 236B (długodystansowy szerokokadłubowy samolot pasażerski).

Piper PA-31-350

Jest to samolot przeznaczony do przewozu nie więcej niż 10 osób. Pierwsze loty odbył w 1980 roku. Rozpiętość skrzydeł tego samolotu wynosi 12 m, długość 11 m, a całkowita wysokość 4 m, waży około 3 t, jego kadłub jest wykonany ze stopu aluminium. Część powierzchni zajmują również materiały nieprzewodzące. Większość systemów lotniczych znajduje się w przedniej części samolotu i w dziobie, pozostała część systemów jest zainstalowana pod podłogą przedziału pasażerskiego i w ogonie samolotu. Do pomiaru wydzielono cztery sekcje samolotu:

- przedział pilotów (kokpit),
- sekcję systemów przedniej części samolotu,
- sekcję systemów środkowej części samolotu (pod podłogą),
- sekcję systemów tylnej części samolotu.

Minimalna skuteczność ekranowania wszystkich sekcji samolotu zawierała się w zakresie od 10 do 20 dB. Jedynym wyjątkiem była przestrzeń w pobliżu środkowej konsoli (nos samolotu), gdzie skuteczność ekranowania spadła do wartości 4÷5 dB. Powodem tego są duże powierzchnie wykonane ze szkła i plastyku. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 16.9.

Tabela 16.9. Skuteczność ekranowania samolotu Piper PA-31-350

Sekcja	Minimalne tłumienie w paśmie od 12,5 do 15 GHz dB
Przedział pilotów	4
Przednia	18
Środkowa	16
Tylna	17

Aerospatiale SA 330E Puma

Jest to wielozadaniowy śmigłowiec średniej wielkości skonstruowany do przewożenia około 15 pasażerów. Pierwsze loty odbył w 1965 roku. Średnica wirnika

wynosi 15 m, długość kadłuba 14 m, a całkowita wysokość 5 m, ciężar startowy 6 t. Kadłub jest zbudowany ze stopu aluminium z dużymi powierzchniami wykonanymi z nieprzewodzącego materiału. Większość systemów lotniczych zainstalowano w sekcji przedniej (nosie) śmigłowca oraz poniżej tablicy przyrządów. Część systemów zainstalowano w pobliżu rotora i w tylnej części przedziału pasażerskiego.

Do pomiaru wydzielono cztery sekcje śmigłowca:

- przedział pilotów (kokpit),
- sekcję systemów przedniej części śmigłowca,
- sekcję rotora i silnika,
- sekcję systemów tylnej części śmigłowca.

Minimalna skuteczność ekranowania była bardzo niska z wartościami 0 dB w przedziale pilotów oraz -6 dB w przedniej sekcji śmigłowca i w sekcji rotora i silnika. W sekcji tylnej minimalne tłumienie wynosiło od 5 do 8 dB.

Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 16.10.

Tabela 16.10. Skuteczność ekranowania śmigłowca Aerospatiale SA 330E Puma

Sekcja	Minimalne tłumienie w pasmie od 12,5 do 15 GHz dB
Przedział pilotów	0
Przednia	-4
Środkowa	-5
Tylna	8

Hawker Siddeley HS 748 Seria 1/107

Jest to krótko- i średniodystansowy samolot pasażerski skonstruowany do przewożenia około 50 pasażerów. Pierwsze jego loty odbyły się w 1960 roku. Rozpiętość skrzydeł tego samolotu wynosi 30 m, długość 20 m, a całkowita wysokość 8 m, waga startowa około 21 t. Jego kadłub jest wykonany ze stopu aluminium. Systemy lotnicze znajdują się w pomieszczeniu poniżej przedniego przedziału pasażerskiego samolotu i w tylnym pomieszczeniu poniżej podłogi środkowego przedziału pasażerskiego. Do pomiaru wydzielono trzy sekcje samolotu:

- przedział pilotów (kokpit),
- pomieszczenie w sekcji przedniej,
- pomieszczenie w sekcji tylnej (pod podłogą środkowego przedziału pasażerskiego).

Minimalna skuteczność ekranowania wynosiła od 15 do 20 dB w pomieszczeniu sekcji przedniej i sekcji tylnej, natomiast w pomieszczeniu pilotów była mniejsza i wynosiła od 10 do 12 dB.

Wyniki pomiarów uzyskanych w wymienionych wcześniej pomieszczeniach wewnątrz kadłuba przedstawiono w tabeli 16.11.

Tabela 16.11. Skuteczność ekranowania samolotu Hawker Siddeley HS 748

Sekcja	Minimalne tłumienie w pasmie od 12,5 do 15 GHz dB
Przedział pilotów	12
Przednia	17
Tylna	18

BAC One-Eleven

Jest to krótko- i średniodystansowy samolot transportowy przystosowany do przewożenia około 90 pasażerów. Pierwsze jego loty odbyły się w 1963 roku. Rozpiętość skrzydeł tego samolotu wynosi 27 m, długość 29 m, a całkowita wysokość 8 m, waga startowa około 35 t. Jego kadłub jest wykonany głównie ze stopu aluminium. Systemy lotnicze znajdują się w pomieszczeniu sekcji przedniej pod podłogą pomieszczenia pilotów. Część urządzeń jest zainstalowana w stelażu za fotelem drugiego pilota. Do pomiaru wydzielono trzy sekcje samolotu:

- przedział pilotów (kokpit),
- pomieszczenie sekcji przedniej (pod kokpitem),
- stelaż z aparaturą.

Minimalna skuteczność ekranowania wynosiła około 25 dB w pomieszczeniu sekcji przedniej oraz od 10 do 15 dB w pobliżu stelaża. W pomieszczeniu pilotów w pobliżu konsoli skuteczność ekranowania zmieniała się w zakresie od 10 do 15 dB, co było prawdopodobnie spowodowane warstwą złota naparowaną na szyby i służącą do ich ogrzewania.

Wyniki pomiarów uzyskanych w wymienionych wcześniej pomieszczeniach wewnątrz kadłuba przedstawiono w tabeli 16.12.

Tabela 16.12. Skuteczność ekranowania samolotu BAC One-Eleven

Sekcja	Minimalne tłumienie w pasmie od 12,5 do 15 GHz dB
Przedział pilotów	16
Przednia	25
Stelaż	15

McDonnell Douglas DC-10

Jest to długodystansowy szerokokadłubowy samolot pasażerski skonstruowany do przewożenia około 270 pasażerów. Pierwsze jego loty odbyły się w 1980 roku. Rozpiętość skrzydeł tego samolotu wynosi 50 m, długość 56 m, a całkowita wysokość 18 m, waga startowa około 260 t. Jego kadłub jest wykonany ze stopu aluminium. Większość systemów lotniczych zainstalowano w pomieszczeniu poniżej wejścia do przedziału pilotów, reszta znajduje się w pomieszczeniu środkowej sekcji samolotu pod podłogą przedziału dla pasażerów. Do pomiaru wydzielono trzy sekcje samolotu:

- przedział pilotów (kokpit),

- pomieszczenie w sekcji przedniej,
- pomieszczenie w sekcji środkowej (pod podłogą środkowego przedziału pasażerskiego).

Minimalna skuteczność ekranowania wynosiła 20 dB w pomieszczeniach sekcji przedniej i środkowej oraz 6 dB w pomieszczeniu pilotów.

Wyniki pomiarów uzyskanych w wymienionych wcześniej pomieszczeniach wewnątrz kadłuba przedstawiono w tabeli 16.13.

Tabela 16.13. Skuteczność ekranowania samolotu Douglas DC-10

Sekcja	Minimalne tłumienie w pasmie od 12,5 do 15 GHz dB
Przedział pilotów	7
Przednia	20
Środkowa	26

Boeing 747 Serii 236B

Jest to długodystansowy szerokokadłubowy samolot pasażerski skonstruowany do przewożenia około 450 pasażerów. Pierwsze jego loty odbyły się w 1969 roku. Rozpiętość skrzydeł tego samolotu wynosi 60 m, długość 71 m, a całkowita wysokość 19 m, waga startowa około 365 t. Jego kadłub jest wykonany ze stopu aluminium. Systemy lotnicze znajdują się w pomieszczeniu pod podłogą niższej sekcji przedniego przedziału pasażerskiego. Część aparatury zainstalowano w pomieszczeniu środkowej sekcji samolotu pod podłogą głównego przedziału pasażerskiego oraz z tyłu tego przedziału.

Do pomiaru wydzielono trzy sekcje samolotu:

- przedział pilotów (kokpit),
- pomieszczenie w sekcji przedniej,
- pomieszczenie w sekcji środkowej (pod podłogą głównego przedziału pasażerskiego).

Minimalna skuteczność ekranowania wynosiła 25 dB w pomieszczeniu sekcji przedniej i środkowej, w pomieszczeniu pilotów natomiast była mniejsza i wynosiła około 13 dB.

Wyniki pomiarów uzyskanych w wymienionych wcześniej pomieszczeniach wewnątrz kadłuba przedstawiono w tabeli 16.14.

Tabela 16.14. Skuteczność ekranowania samolotu Boeing 747

Sekcja	Minimalne tłumienie w pasmie od 12,5 do 15 GHz dB
Przedział pilotów	15
Przednia	31
Środkowa	31

16.3.3. SKUTECZNOŚĆ EKRANOWANIA KADŁUBÓW STATKÓW POWIETRZNYCH

W większości przypadków uzyskane charakterystyki tłumienności w małym stopniu zależały od częstotliwości. Minimalna zmierzona skuteczność ekranowania zmieniła się w zakresie od powyżej 30 dB do -6 dB, w zależności od statku powietrznego i miejsca pomiaru.

Minimalne wartości skuteczności ekranowania zmierzone w pomieszczeniu pilotów zmieniały się w zakresie od 0 do 16 dB. W pomieszczeniach wewnątrz kadłuba skuteczność ekranowania była zwykle większa i wynosiła od 12 do 30 dB. Jedyny wyjątek stanowił śmigłowiec Puma, który wykazywał ujemną skuteczność ekranowania. Wywołane to było dużymi płaszczyznami kadłuba wykonanymi z nieprzewodzących materiałów oraz wewnętrznymi odbiciami padającej fali.

Uzyskane wyniki zależały od kąta „oświetlenia” oraz wysokości źródła. Najniższą skuteczność ekranowania uzyskiwano podczas „oświetlania” pomieszczeń pilotów przez okna.

W wyniku pomiarów tłumienia pola elektromagnetycznego przez kadłub statku powietrznego można stwierdzić, że minimalne wartości skuteczności ekranowania są na poziomie 0 dB. Dla niektórych statków powietrznych, których kadłuby są wykonane w dużej części z materiałów nieprzewodzących może wystąpić efekt „wzmocnienia” pola spowodowany odbiciami i rezonansami. Zanotowano ujemne wartości tłumienia sygnału dochodzące do -6 dB.

Obecnie statki powietrzne są wyposażone w urządzenia lotnicze sprawdzane na podatność do natężenia pola 1 V/m zgodnie z normą EUROCAE ED-14B wprowadzoną w 1984 roku. Nowe normy, uwzględniające pojawienie się źródeł bardzo silnego pola mikrofalowego HIRF, wymagają poziomów podatności sprzętu rzędu tysięcy V/m. Przeważająca liczba samolotów nie była jednak badana na zgodność z tymi normami. Ponieważ czas „życia” samolotu pasażerskiego i wojskowego wynosi około 20–30 lat, należy sądzić, że dopiero po tym okresie wszystkie samoloty będą spełniać wymagania nowych norm.

Badania podatności elektronicznej aparatury pokładowej pokazały, że poziomy podatności wynosiły kilkaset V/m. Dla małej procentowo (około 5%) liczby urządzeń poziomy podatności był jednak poniżej 100 V/m.

Biorąc pod uwagę powyższe wnioski oraz określone poziomy promieniowania wytwarzane przez stacje satelitarne, można stwierdzić, że instalowane w pobliżu lotnisk stacje satelitarne pracujące w stałej służbie satelitarnej i służące do transmisji sygnałów telewizyjnych, centralne stacje systemu VSAT (hub) oraz przenośne stacje satelitarne służby reporterskiej SNG są w stanie zakłócić pracę systemów pokładowych statku powietrznego. Dlatego też przed ich instalacją konieczna jest koordynacja ze służbami lotniczymi. Terminale VSAT z uwagi na niższe poziomy promieniowanej mocy nie stanowią aż tak dużego zagrożenia. Niemniej są one w stanie w odległości setek metrów wytworzyć pole przekraczające 1 V/m. Dlatego też, głównie z uwagi na

wyposażenie latających obecnie statków powietrznych w sprzęt spełniający wymogi normy EUROCAE ED-14B, postuluje się zachować takie same środki bezpieczeństwa w odniesieniu do terminali VSAT. Wniosek ten jest w pełni zgodny z opinią wydaną przez specjalistów z ERA Technology [25, 78]. Zlecieli oni ponadto Agencji Radiokomunikacyjnej Wielkiej Brytanii stosowanie procedury koordynacji opisanej w raporcie RA 172 [69], którego treść wcześniej przedstawiono.

17. OCHRONA LUDZI PRZED PROMIENIOWANIEM TERMINALI VSAT

W Polsce obowiązują rygorystyczne przepisy dotyczące ochrony ludzi przed promieniowaniem niejonizującym (elektromagnetycznym) [84]. Regulują je akty prawne [70, 71, 72, 73*, 74] (*Rozporządzenie* [73] zostało zastąpione *Rozporządzeniem* [74]).

Przed ukazaniem się *Rozporządzenia* [74] z dnia 11 sierpnia 1998 roku w Polsce były określone dwie strefy ochronne: pierwszego i drugiego stopnia. Zasady przebywania ludności na terenie tych stref były następujące:

- na obszarach strefy ochronnej pierwszego stopnia przebywanie ludności było zabronione, z wyjątkiem osób zatrudnionych przy eksploatacji źródeł pola,
- na obszarze strefy ochronnej drugiego stopnia dopuszczalne było okresowe przebywanie ludności związane z prowadzeniem działalności gospodarczej, turystycznej, rekreacyjnej itp., zabrania się natomiast lokalizowania budynków mieszkalnych i budynków wymagających szczególnej ochrony przed działaniem pól elektromagnetycznych, a zwłaszcza szpitali, internatów, żłobków, przedszkoli itp.

Obowiązujące wartości, które wyznaczały granice stref ochronnych zgodnie z *Rozporządzeniem* [73] zamieszczono w tabeli 17.1.

Tabela 17.1. Wartości graniczne stref ochronnych, które obowiązywały w Polsce przed ukazaniem się *Rozporządzenia* z dnia 11 sierpnia 1998 r.

Postać promieniowania		Strefa ochronna	
		1. stopnia	2. stopnia
Pole EM (składowa E)	50 Hz	>10 kV/m	$1 \div 10$ kV/m
	$0,1 \div 10$ MHz	>20 V/m	$5 \div 20$ V/m
	$10 \div 300$ MHz	>7 V/m	$2 \div 7$ V/m
Pole EM $0,3 \div 300$ GHz	stacjonarne	$>0,1$ W/m ²	$0,025 \div 0,1$ W/m ²
	niestacjonarne	$>1,0$ W/m ²	$0,25 \div 1$ W/m ²

Dopuszczalne wartości natężenia pola elektrycznego dla częstotliwości 50 Hz i od 0,1 do 300 MHz dotyczyły wartości skutecznej, natomiast dopuszczalne wartości gęstości strumienia mocy obowiązujące w zakresie częstotliwości od 0,3 do 300 GHz odnosiły się do wartości średniej.

Na mocy *Rozporządzenia* z dnia 11 sierpnia 1998 roku [74] wprowadzono rozgraniczenie na obszary, na których nie mogą być przekroczone dopuszczalne wartości promieniowania elektromagnetycznego, i na pozostałe.

Poziomy dopuszczalne promieniowania elektromagnetycznego przedstawiono w tabeli 17.2.

Tabela 17.2. Dopuszczalne poziomy elektromagnetycznego promieniowania niejonizującego charakteryzowane przez wartości graniczne wielkości fizycznych

Lp.	Zakres częstotliwości promieniowania	Wielkość fizyczna			
		składowa elektryczna	składowa magnetyczna	gęstość mocy	gęstość prądu jonowego
1	pola stałe	16 kV/m	8 kA/m	–	100 nA/m ²
2	pola 50 Hz	10 kV/m ^(*)	80 A/m	–	–
3	0,001÷0,1 MHz	100 V/m	10 A/m	–	–
4	<0,1 do 10 MHz	20 V/m	2 A/m	–	–
5	<10 do 300 MHz	7 V/m	–	–	–
6	<300 MHz do 300 GHz	–	–	0,1 W/m ²	–

W tabeli 17.2 w zakresach częstotliwości 50 Hz i od 0,001 do 300 MHz podano wartości skuteczne natężeń pól elektrycznego i magnetycznego, powyżej częstotliwości 300 MHz podano wartość średnią gęstości mocy pola elektromagnetycznego. Na obszarach zabudowy mieszkaniowej oraz na obszarach, na których są zlokalizowane zwłaszcza szpitale, żłobki, przedszkola, internaty, składowe elektryczne elektromagnetycznego promieniowania niejonizującego o częstotliwości 50 Hz nie może przekraczać wartości 1 kV/m^(*). Dopuszczalnych poziomów elektromagnetycznego promieniowania niejonizującego wymienionych w tabeli 17.2 nie stosuje się w miejscach niedostępnych dla ludzi.

Osobne przepisy określają zasady przebywania personelu w pobliżu obsługiwanych urządzeń wytwarzających pole elektromagnetyczne. Dla osób tych określono poziomy dopuszczalne, wyznaczające granice czterech stref. Ich nazwy oraz wartości poziomów wyznaczających granice stref przedstawiono w tabelach 17.3, 17.4 i 17.5, natomiast zasady przebywania osób w tych strefach przedstawiono w tabeli 17.6.

Tabela 17.3. Granice stref ochronnych dla pola magnetycznego o częstotliwości 0 i 50 Hz oraz elektrycznego o częstotliwości 1÷100 kHz

Zakres częstotliwości Nazwa strefy	0 i 50 Hz		1÷100 kHz	
	pole stałe kA/m(mT)	pole 50 Hz kA/m(mT)	pole <i>E</i> V/m	pole <i>H</i> A/m
Bezpieczna	<8 (10)	<0,4 (0,5)	–	–
Zagrożenia	8÷80(10÷100)	0,4÷4 (0,5÷5)	100÷1000	10÷100
Niebezpieczna	>80 (100)	>4 (5)	>1000	>100

Tabela 17.4. Granice stref ochronnych dla częstotliwości 0,1÷300 MHz

Zakres częstotliwości Nazwa strefy	0,1÷10 MHz		10÷300 MHz
	pole elektryczne V/m	pole magnetyczne A/m	pole elektryczne V/m
Bezpieczna	<20	<2	<7
Pośrednia	20÷70	2,0÷10,0	7÷20
Zagrożenia	70÷1000	10÷250	20÷300
Niebezpieczna	>1000	>250	>300

Tabela 17.5. Granice stref ochronnych dla częstotliwości 0,3÷300 GHz

Nazwa strefy	Gęstość mocy, W/m ²	
	pole stacjonarne	pole niestacjonarne
Bezpieczna	<0,1	<1,0
Pośrednia	0,1÷2,0	1,0÷10,0
Zagrożenia	2,0÷100,0	10,0÷100,0
Niebezpieczna	>100,0	>100,0

Tabela 17.6. Zasady przebywania pracowników na obszarze poszczególnych stref

Nazwa strefy	Zasady przebywania
Bezpieczna	bez ograniczeń czasowych
Strefy chronione	mogą przebywać wyłącznie pracownicy, u których w wyniku badań lekarskich stwierdzono brak przeciwwskazań zdrowotnych do przebywania w zasięgu pól elektromagnetycznych
Pośrednia	mogą przebywać pracownicy zatrudnieni przy produkcji, naprawach, przeglądach, obsłudze lub stosowaniu urządzeń wytwarzających pola elektromagnetyczne w czasie jednej zmiany roboczej (do 12 godzin)
Zagrożenia	mogą przebywać pracownicy wymienieni w p. 2 przez czas ograniczony; dopuszczalny czas przebywania w tej strefie ulega skróceniu w zależności od natężenia pól elektromagnetycznych (nie dłużej niż 8 godzin)
Niebezpieczna	przebywanie pracowników jest zabronione (zakaz wstępu)

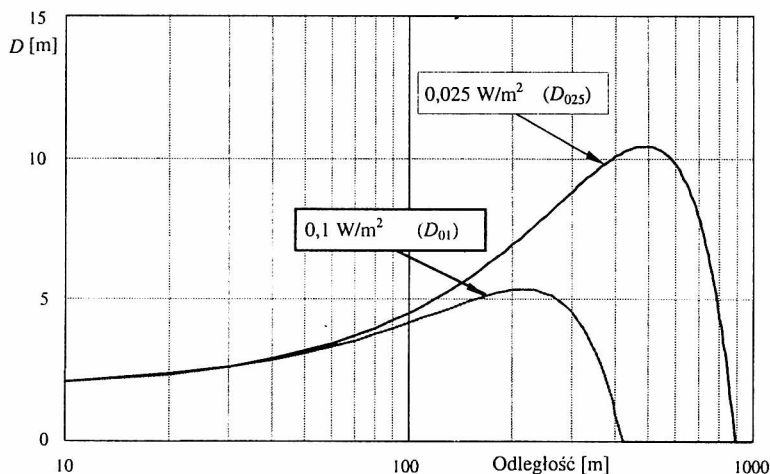
Terminale VSAT i stacje reporterskie SNG wytwarzają energię elektromagnetyczną w obszarze promieniowania pożądanego i w obszarze promieniowania niepożądanego w pasmie pracy i poza nim. W każdym z wymienionych obszarów przestrzenno-częstotliwościowych należy przyjąć inne modele źródła promieniowania i inne sposoby analizy. Z punktu widzenia potencjalnego zagrożenia istotne jest wyznaczenie w pasmie pracy naziemnej stacji satelitarnej obszarów, w których są przekroczone określone poziomy dopuszczalne. Analizę rozpoczniemy od obszaru promieniowania pożądanego.

W odległości x od anteny (liczonej wzdłuż osi głównej wiązki anteny) można wyznaczyć (korzystając z wcześniej przedstawionego modelu promieniowania dla strefy bliskiej) szerokość obszaru $D_{01}(x)$, wewnątrz którego jest przekroczona dopuszczalna wartość gęstości mocy $0,1 \text{ W/m}^2$. Wartość ta jest poziomem dopuszczalnym wymagany przez nowe, obowiązujące obecnie w Polsce *Rozporządzenie* [74] (według starego rozporządzenia wartość ta odpowiadała strefie ochronnej 1. stopnia). W celach porównawczych wyznaczono również szerokość obszaru $D_{025}(x)$, w którym gęstość mocy przekracza $0,025 \text{ W/m}^2$ (wartość ta według starego rozporządzenia odpowiadała strefie ochronnej 2. stopnia). Po odpowiednim przekształceniu zależności (16.26) możemy otrzymać wzory określające szerokości $D_{01}(x)$ i $D_{025}(x)$ w postaci:

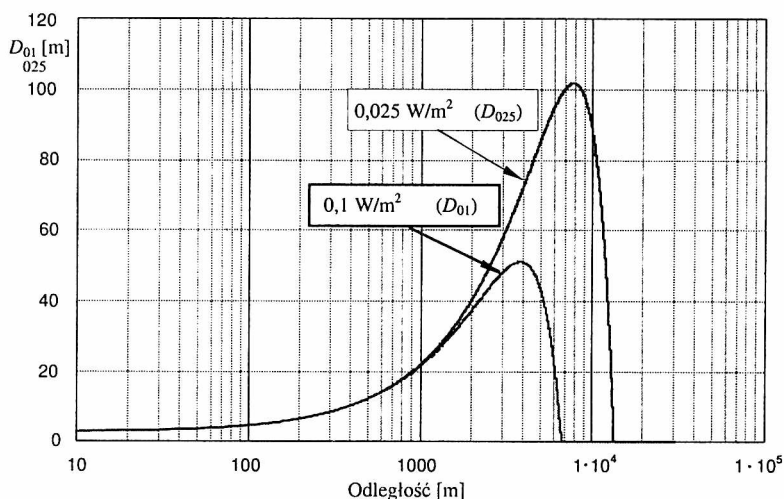
$$D_{01}(x) = 0,1 \frac{D_{ef}(x) - D_{00}(x) + 10 S_{\max}(x) D_{00}(x)}{S_{\max}(x)}, \quad (17.1)$$

$$D_{025}(x) = 0,025 \frac{D_{ef}(x) - D_{00}(x) + 40 S_{\max}(x) D_{00}(x)}{S_{\max}(x)}. \quad (17.2)$$

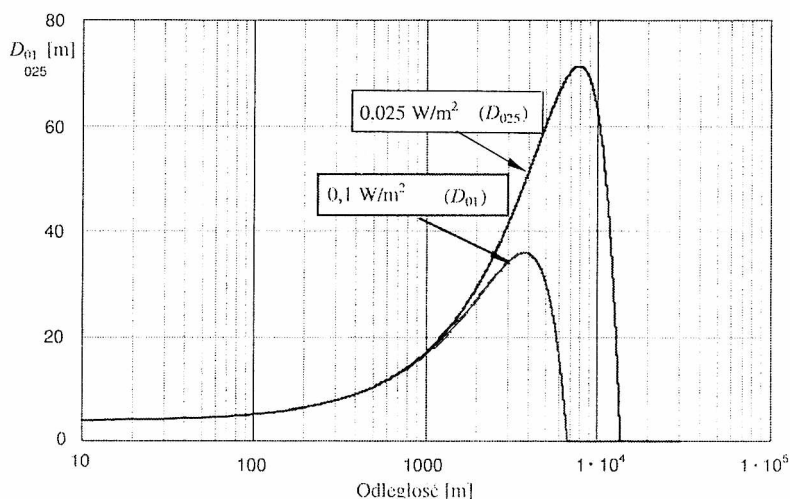
Szerokość obszaru, w którym przekroczono dopuszczalną wartość gęstości mocy wynoszącą $0,1 \text{ W/m}^2$ w funkcji odległości od anteny dla typowego terminalu VSAT i stacji reporterskiej SNG o parametrach określonych w tabeli 16.4 pokazano na rysunkach 17.1 i 17.2, natomiast dla stacji VSAT o ekstremalnych pod względem promieniowanej mocy parametrach podanych w tabeli 16.8 (VSAT#3) na rysunku 17.3.



Rys. 17.1. Szerokości strefy, w której przekroczono dopuszczalną wartość gęstości mocy w funkcji odległości [m] dla terminalu VSAT ($P = 5 \text{ W}$, $D = 1,8 \text{ m}$)



Rys. 17.2. Szerokości strefy, w której przekroczono dopuszczalną wartość gęstości mocy w funkcji odległości (m) dla stacji reporterskiej SNG ($P = 490 \text{ W}$, $D = 2,6 \text{ m}$)



Rys. 17.3. Szerokości strefy, w której przekroczono dopuszczalną wartość gęstości mocy w funkcji odległości (m) dla terminalu VSAT o ekstremalnych parametrach ($P = 240 \text{ W}$, $D = 3,8 \text{ m}$)

Z rysunków 17.1–17.3 widać, że szerokości stref w pobliżu anteny do odległości 100 m praktycznie równają się średnicy apertury anteny, po czym zwiększają się, by w odległości zależnej od zastępczej mocy promieniowanej izotropowo zmaleć do zera.

W obszarze promieniowania niepożądanego zakłada się, że antena promieniuje izotropowo. Ponadto przyjmuje się, że w obszarze tym wypromieniowane jest 10% mocy P doprowadzonej do anteny

$$P_i = P - P_{\text{ef}} = P - 0,9 P = 0,1 P. \quad (17.3)$$

W odległości r od anteny gęstość mocy S_i wypromieniowanej izotropowo przez antenę określa zależność

$$S_i(r) = \frac{P_i}{4\pi r^2}. \quad (17.4)$$

Promień strefy r_{01} , w której przekroczona jest dopuszczalna wartość gęstości mocy, można wyznaczyć obliczając odległość, w której gęstość mocy wynosi odpowiednio $0,1 \text{ W/m}^2$. W celach porównawczych obliczenia wykonano również dla wartości gęstości mocy równej $0,025 \text{ W/m}^2$, stanowiącej granicę strefy ochronnej 2. stopnia zgodnie ze starym *Rozporządzeniem* [73]. Promień tego obszaru oznaczono przez r_{025}

$$r_{01} = \sqrt{\frac{P_i}{4\pi \cdot 0,1}}, \quad (17.5)$$

$$r_{025} = \sqrt{\frac{P_i}{4\pi \cdot 0,025}}. \quad (17.6)$$

Promienie r_{01} i r_{025} wyznaczono dla omawianych wcześniej stacji satelitarnych. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 17.6.

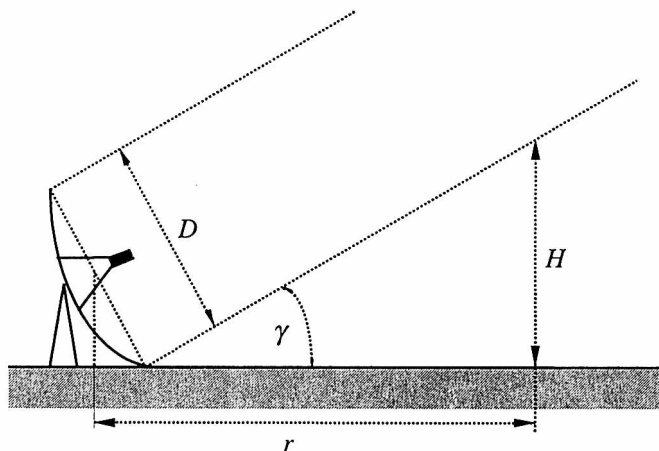
Tabela 17.6. Promień r_{01} strefy, w której przekroczono dopuszczalną wartość gęstości mocy dla naziemnych stacji satelitarnych

Typ stacji	Apertura D m	EIRP W	Promień strefy m	
			r_{01}	r_{025}
VSAT	1,8	5	0,6	1,3
SNG	2,6	490 *	6,2	12,5
VSAT#3 (maks.)	3,8	240	4,4	8,7

Gęstość mocy promieniowanej w głównej wiązce promieniowania w pobliżu anteny znacznie przekracza wartość dopuszczalną. Należy zatem sprawdzić czy istnieje niebezpieczeństwo, że człowiek będący poza strefą, w której gęstość mocy promieniowanej w obszarze promieniowania niepożądanego przekracza wartość dopuszczalną, może znaleźć się w głównej wiązce (w obszarze promieniowania pożądanego). Przyjmując geometrię jak dla najgorszego przypadku, tzn. dolna krawędź anteny dotyka podłoża, a kąt elewacji anteny przyjmuje minimalną wartość $\gamma = 10^\circ$ (rys. 17.4) oraz pomijając kąt rozwarcia wiązki, możemy wyznaczyć z zależności (17.7) odległość r , w której dolny brzeg głównej wiązki anteny znajduje się na wysokości H , odpowiadającej wzrostowi dorosłego człowieka (przyjęto $H = 2$ m).

$$r = \frac{D}{2} \sin(\gamma) + \frac{H}{\tan(\gamma)}. \quad (17.7)$$

Wyniki obliczeń odległości r dla różnych terminali przedstawiono w tabeli 17.7.

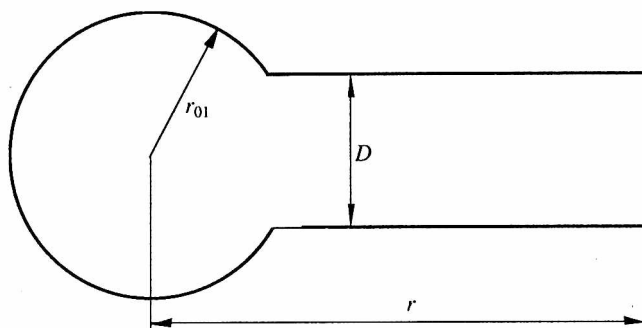


Rys. 17.4. Geometria układu do określenia odległości r

Tabela 17.7. Odległości, w których dolny brzeg głównej wiązki anteny znajduje się na wysokości 2 m ($\gamma = 10^\circ$)

Typ stacji	Odległość r m
VSAT	11,5
SNG	11,6
VSAT#3 (maks.)	11,7

We wszystkich przypadkach wyznaczona odległość r jest większa od promienia r_{01} . Dlatego też model strefy ochronnej wokół anteny satelitarnej będzie miał kształt przedstawiony na rysunku 17.5.



Rys. 17.5. Kształt i rozmiary obszaru wokół anteny satelitarnej, w którym przekroczono dopuszczalną wartość gęstości mocy

Przy wyznaczaniu tego obszaru poczyniono pewne założenia upraszczające, które w rzeczywistości nie muszą być słuszne. Dlatego też rezultaty należy traktować jako przybliżone. Dokładne wyznaczenie stref ochronnych możliwe jest jedynie przez pomiary gęstości mocy w otoczeniu anteny. Prowadzenie takich pomiarów po zainstalowaniu i uruchomieniu stacji satelitarnej jest niezbędne [74]. Metoda pomiarowa jest jedyną metodą umożliwiającą uwzględnienie wszystkich czynników w konkretnej sytuacji.

18. PODSUMOWANIE

Ze względu na wzrastającą liczbę stacji satelitarnych VSAT i SNG instalowanych w Europie opracowano normy międzynarodowe ograniczające maksymalne poziomy promieniowania wytwarzanego przez tego typu stacje. W pracy przedstawiono opracowane na podstawie tych norm modele matematyczne umożliwiające analizę sytuacji interferencyjnej.

Wykonano symulację różnorodnych przypadków zakłócania przez te stacje innych systemów. Z analiz wynika, że przy prawidłowej koordynacji częstotliwości pracy sieci VSAT nie powinno być większych problemów z kompatybilnością tych sieci w stosunku do innych służb naziemnych. W nielicznych przypadkach, gdy stacja nadawcza VSAT znajduje się w pobliżu naziemnej stacji linii radiowych, można wyznaczyć stopień zagrożenia interferencyjnego za pomocą zaprezentowanych modeli matematycznych. Modele te opierają się na najnowszych danych uzyskanych z międzynarodowych organizacji.

Istotnym zagadnieniem jest również ochrona personelu i osób postronnych przed działaniem promieniowania nadawczych stacji VSAT i SNG. Informacje zawarte w normach nie są dostateczne do opracowania bardzo dokładnych modeli. Czyniąc pewne założenia upraszczające, autorowi udało się opracować modele umożliwiające wyznaczenie podstawowych wielkości określających zarówno poziomy emitowanych pól elektromagnetycznych, jak również wielkość i kształt obszarów chronionych. W odniesieniu do nielicznych wykonanych pomiarów dla większych anten uzyskano zgodność wyników pomiarów z obliczonymi wartościami. Opisane modele matematyczne mogą posłużyć do opracowania warunków technicznych instalacji nadawczych stacji z małymi antenami. Pomimo przyznania kilku licencji na użytkowanie systemów VSAT w Polsce oraz instalacji szeregu stacji nadawczych VSAT warunki techniczne instalacji wymagają jedynie zgłoszenia lokalizacji stacji do Państwowej Agencji Radiokomunikacyjnej.

Na podstawie analiz stwierdzono, że nie jest możliwe z technicznego punktu widzenia takie ograniczenie promieniowania ubocznego, by uzyskać sytuację, kiedy nie ma zakłóceń w każdych warunkach. Dlatego też w sytuacjach konfliktowych ważne jest posiadanie odpowiednich procedur umożliwiających rozwiązanie konfliktu interferencyjnego. Przedstawione modele matematyczne stanowią bazę do opracowania procedur umożliwiających przewidywanie wystąpienia sytuacji konfliktowej oraz umożliwiają opracowanie metod rozwiązywania tego typu sytuacji. Szczególnie ważną grupę zagadnień stanowią problemy kompatybilności stacji satelitarnych z systemami lotniczymi. Pokazano, że w rejonie lotnisk poziomy pola elektromagnetycznego wytwarzane przez stacje naziemne VSAT i SNG mogą powodować zakłócenia aparatury elektronicznej na pokładzie samolotu. Z tego względu konieczne jest określenie zasad instalacji tego typu urządzeń w pobliżu lotnisk. W pracy omówiono jedno z możliwych i stosowanych rozwiązań.

Przedstawiono również zagadnienia związane z międzynarodową koordynacją naziemnych stacji satelitarnych. Uwzględniono nowe metody analizy tego zagadnienia zawarte w dokumentach ITU.

Prezentowana praca stanowi najobszerniejszy i najpełniejszy ze znanych opis zagadnień związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną w łączności satelitarnej.

LITERATURA

- [1] Akira Fujii, *Draft ETSI/TC-SES (92) 043, Consideration on the spurious limits for VSATs – Part II*, 6 March 1992.
- [2] Bem D.J., *Modelowanie systemów radiokomunikacyjnych*, Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1985.
- [3] Bem D.J., *Radiodyfuzja satelitarna*, Warszawa, WKiŁ, 1990.
- [4] Bem D.J., Bieńkowski P., Grudziński E., Janiszewski J.M., Więckowski T., Zieliński R.J., *Analiza sytuacji interferencyjnej wokół anteny stacji centralnej sieci VSAT TS S.A. oraz pomiary poziomów promieniowanych przez tę stację*, Raporty Inst. Telekom. PWr., Ser. SPR nr 012, 1994.
- [5] Bem D.J., Janiszewski J.M., Więckowski T., Zieliński R.J., *Analiza możliwości lokalizacji naziemnej stacji satelitarnej do retransmisji programów telewizyjnych w Warszawie przy ul. Woronicza*, Raporty Inst. Telekom. PWr., Ser. SPR nr 036, 1992.
- [6] Bem D.J., Janiszewski J.M., Więckowski T., Zieliński R.J., *Analiza możliwości lokalizacji naziemnej stacji satelitarnej w Warszawie przy ul. Woronicza do retransmisji programów telewizyjnych dla Polskiego Centrum Telewizyjnego „Panorama Polska” w Stanach Zjednoczonych A.P.*, Raporty Inst. Telekom. PWr., Ser. SPR nr 048, 1993.
- [7] Bem D.J., Janiszewski J.M., Więckowski T., Zieliński R.J., *Analiza możliwości lokalizacji naziemnej stacji satelitarnej w Warszawie przy ul. Woronicza do satelitarnej retransmisji programów telewizyjnych do Stanów Zjednoczonych A.P.*, Raporty Inst. Telekom. PWr., Ser. SPR nr 031, 1994.
- [8] Bem D.J., Janiszewski J.M., Więckowski T.W., Zieliński R.J., *Coordination of satellite earth station with aeronautical services and airborne equipment*, Proceedings of Twelfth International Wrocław Symposium, Wrocław, June 1994.
- [9] Bem D.J., Janiszewski J.M., Więckowski T.W., Zieliński R.J., *Determination of electromagnetic field strength in the vicinity of a transmitting satellite station*, Proceedings of Thirteenth International Wrocław Symposium, Wrocław, June 1996.
- [10] British Standard BS 6656, *British Standard Guide of inadvertent ignition of flammable atmosphere by radio frequency radiation*.
- [11] British Standard BS 6657, *British Standard Guide of inadvertent ignition of electro-explosive devices by radio frequency radiation*.
- [12] Bronnimann R., *Specifications for unwanted radiation and spurious emissions*, Draft ETSI/STC-SES 2(91) 3, 2 November 1990.
- [13] CISPR 16-1 (1993), *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods, Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus*.
- [14] CCIR (ITU-R) Document 4-2/25-E, *Simplified interference model for the determination of “unwanted radiation” and “out of allocated band spurious emission” limits*, 31 May 1991.
- [15] CCIR (ITU-R) Recommendation 725, *Technical characteristics for Very Small Aperture Terminals (VSATs)*, 1992.
- [16] CCIR (ITU-R) Recommendation 726, *Maximum permissible level of spurious emissions from very small aperture terminals (VSATs)*, 1992.
- [17] CCIR (ITU-R) Recommendation 727, *Cross-polarization isolation from very small aperture terminals (VSATs)*, 1992.
- [18] CCIR (ITU-R) Recommendation 728, *Maximum permissible level of off-axis e.i.r.p. density from very small aperture terminals (VSATs)*, 1992.
- [19] CENELEC, EN 50081-1 (1991) *Electromagnetic compatibility – Generic emission standard. Part 1: residential, commercial and light industry*.
- [20] CENELEC, EN 50082-1 (1991) *Electromagnetic compatibility – Generic immunity standard. Part 1: residential, commercial and light industry*.

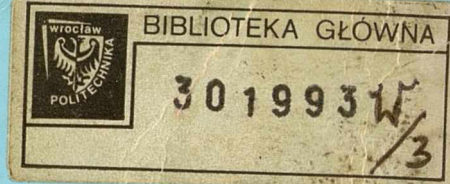
- [21] CENELEC, EN 50083-1 (1993) *Cabled distribution systems for television and sound signals. Part 1: Safety requirements.*
- [22] CENELEC, EN 55022 (1993) *Limits and methods of measurement of radio interference characteristics of information technology equipment.*
- [23] CENELEC, EN 60950:1992 *Safety of information technology equipment including electrical business equipment.*
- [24] Civil Aviation Authority, Vol. 1, *Minimum performance requirements, CAP 208: Airborne radio apparatus.*
- [25] Colwell B., *Earth station/aircraft instrument landing system EMC study*, Final report, ERA Technology, March 1992.
- [26] Despres B., Robillard M., Azoulay A., *European exposure standard to electromagnetic field applied to Satellite Earth Stations*, IEEE International Symposium on EMC, Atlanta, USA, August 1995.
- [27] Despres B., *Method to define safety zone for mobile earth stations with regard to exposure to electromagnetic field*, International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC' 94, Roma, Italy, September 1994.
- [28] Draft MI/SES-2006, *Technical report on spurious radiation limitations to/from satellite earth stations*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), September 1992.
- [29] ETR 027, *Radio Equipment and Systems (RES); Methods of measurement for mobile radio equipment*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 1991.
- [30] ETR 163, *Satellite Earth Stations and Systems (SES), The interconnection of Very Small Aperture Terminal (VSAT) systems to Integrated Service Digital Networks (ISDNs)*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 1995.
- [31] ETS 300 157, *Satellite Earth Stations and Systems (SES); Receive-only Very Small Aperture Terminals (VSATs) used for data distribution operating in the 11/12 GHz frequency bands*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), November 1992.
- [32] ETS 300 159, *Satellite Earth Stations and Systems (SES); Transmit/receive Very Small Aperture Terminals (VSATs) used for data communications operating in the Fixed Satellite Service (FSS) 11/12/14 GHz frequency bands*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), December 1992.
- [33] ETS 300 160, *Satellite Earth Stations (SES), Control and monitoring functions at a Very Small Aperture Terminal (VSAT)*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 1992.
- [34] ETS 300 161, *Satellite Earth Stations (SES), Centralised control and monitoring functions for VSAT networks*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 1992.
- [35] ETS 300 339, *Radio Equipment and Systems (RES); General Electro-Magnetic Compatibility (EMC) for radio equipment*, 1994.
- [36] ETS 300 456, *Satellite Earth Stations and Systems (SES); Test methods for Very Small Aperture Terminals (VSATs) operating in the 11/12/14 GHz frequency bands*, November 1995.
- [37] ETS 300 673, *Radio Equipment and Systems (RES); ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for 4/6 GHz and 11/12/14 GHz Very Small Aperture Terminal (VSAT) equipment and 11/12/13/14 GHz Satellite News Gathering (SNG) Transportable Earth Station (TES) equipment*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), March 1997.
- [38] Eurofighter Avionic Joint Team, *Electromagnetic compatibility specification for equipment, Eurofighter*, ed. 1, SPE-J-00-E-1000, February 1991.
- [39] European Organisation for Civil Aviation Electronics, EUROCAE WG 33, *Proposed Advisory Material Joint – AMJ XX, The certification of aircraft electrical/electronic systems for operation in the high intensity radiated fields (HIRF) environment*, Sub-groups 2 and 3, Committee discussion draft.
- [40] European Organisation for Civil Aviation Electronics, EUROCAE WG 33 *user's guide for AMJ No XX, Guidance to the certification of aircraft electrical/electronic systems for operation in the high intensity radiated fields (HIRF) environment (certification requirements and procedures)*, Sub-groups 2 and 3, Committee discussion draft.

- [41] *Eutelsat SCPC Multiservice System Specification*, Vol. IV, Performance characteristics of earth stations operating in the Eutelsat SCPC Satellite Multiservice System, BS 7-40 Rev. 2 E)
- [42] Feher K., *Digital Communications, Microwave Applications*, Prentice Hall, Inc. 1981.
- [43] IEC 510-1, *Methods of measurement for radio equipment used in satellite earth stations*, Part 1: General, 1975.
- [44] IEC 510-2-1, *Methods of measurement for radio equipment used in satellite earth stations*, Part 2: Measurements for sub-systems; Section One – General; Section Two – Antenna (including feed network), 1978.
- [45] *Intelsat Earth Station Standards (IESS)*, Document IESS-601 (Rev. 3), *Standard G, Performance Characteristics for Earth Stations Accessing the Intelsat Space Segment for International Services not Covered by Other Earth Station Standards (6/4, 14/11 i 14/12 GHz)*, 09 December 1991.
- [46] Ito Y., Amadesi P., *Standardization of VSAT Communication Systems in the CCIR*, International Journal of Satellite Communications, Vol. II, 173–179, 1993.
- [47] ITU Document 4A/206-E, *Definition of a very small aperture terminal (VSAT)*, 18 June 1993.
- [48] ITU-R Recommendation 465-3, *Reference earth-station radiation pattern for use in coordination and interference assessment in the frequency range from 2 to about 30 GHz*.
- [49] ITU-R Recommendation 580-5, *Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth station operating with geostationary satellites*.
- [50] ITU-R Recommendation 732, *Method for statistical processing of Earth station antenna side-lobe peaks*, 1990.
- [51] ITU-R, Recommendation IS.847-1, *Determination of the coordination area of an earth station operating with a geostationary space station and using the same frequency band as a system in a terrestrial service*, 1992–1993.
- [52] ITU-R, Recommendation IS.848-1, *Determination of the coordination area of a transmitting earth station using the same frequency band as receiving earth stations in bidirectionally allocated frequency bands*, 1992–1993.
- [53] ITU-R, Recommendation IS.849-1, *Determination of the coordination area for earth stations operating with non-geostationary spacecraft in bands shared with terrestrial services*, 1992–1993.
- [54] ITU-R, Recommendation IS.850-1, *Coordination areas using predetermined coordination distances*, 1992–1995.
- [55] *Joint RTCA and EUROCAE, Environmental conditions and test procedures for airborne equipment, Section 20: Radio frequency susceptibility (radiated and conducted)*, EUROCAE ED-14C, ed. 20, July 1984.
- [56] Maral G., Bousquet M., *Satellite Communications Systems, Systems, Techniques and Technology*, Second Edition, John Wiley & Sons, 1993.
- [57] Maral G., *VSAT Networks*, John Wiley & Sons, 1995.
- [58] *Ministry of Defence, Electromagnetic compatibility*, Part 3: Technical requirements, test methods and limits, Defence Standard 59–41, Part 3, Issue 4, UK, June 1988.
- [59] *NATO Standardisation Agreement, Electromagnetic compatibility for aircraft electrical and electronic equipment*, STANAG 3516, 1977.
- [60] *NATO Standardisation Agreement, Electromagnetic compatibility of aircraft systems*, STANAG 3614.
- [61] prETS 300 158, *Satellite Earth Stations and Systems (SES), Television Receive Only (TVRO-FSS) Satellite Earth Stations operating in the 11/12 GHz FSS bands*, European Telecommunications Standards Institute, August 1992.
- [62] prETS 300 194, *Satellite Earth Stations and Systems (SES), The interconnection of Very Small Aperture Terminal (VSAT) systems to Packet Switched Public Data Networks (PSPDNs)*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 1995.

- [63] prETS 300 249, *Satellite Earth Stations and Systems (SES), Television Receive Only (TVRO-BSS)*, European Telecommunications Standards Institute, August 1992.
- [64] prETS 300 327, *Satellite Earth Stations (SES); Satellite News Gathering (SNG), Transportable Earth Stations (TES) 13/14/11-12 GHz*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), February 1993.
- [65] prTBR 028, *Satellite Earth Stations and Systems (SES); Very Small Aperture Terminal (VSAT); Transmit-only, transmit/receive or receive-only satellite earth stations operating in the 11/12/14 GHz frequency bands*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), August 1997.
- [66] prTBR 030, *Satellite Earth Stations and Systems (SES); Satellite News Gathering Transportable Earth Stations (SNG TES) operating in the 11-12/13-14 GHz frequency bands*, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), March 1997.
- [67] *Radio Regulations, International Telecommunication Union (ITU)*, Geneva, Switzerland.
- [68] Radiocommunication Agency, MPT 131, *The RA Code of Practice for Radio Site Engineering*.
- [69] Radiocommunications Agency, RA172, *Site Clearance Manual of Code of Practice No. 1, The Clearance Procedure Followed in Order to obtain authorisation for operation of transportable earth stations and mobile satellite terminals*, August 1991.
- [70] Rozporządzenie Ministrów Pracy, Płac i Spraw Socjalnych oraz Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 19 lutego 1977 roku w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy stosowaniu urządzeń wytwarzających pola elektromagnetyczne w zakresie od 0,1 MHz do 300 MHz (Dz. U. PRL Nr 8 z 1977 r., poz. 33).
- [71] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 23 grudnia 1994 roku zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. Nr 3 z 1995 r., poz. 16).
- [72] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 25 maja 1972 roku w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy stosowaniu urządzeń wytwarzających pola elektromagnetyczne w zakresie mikrofalowym (Dz. U. Nr 21 z 1972 r., poz. 153).
- [73] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 5 listopada 1980 roku w sprawie szczegółowych zasad ochrony przed elektromagnetycznym promieniowaniem niejonizującym szkodliwym dla ludzi i środowiska (Dz. U. Nr 25 z 1980 r., poz. 101).
- [74] Rozporządzenie ministra ochrony środowiska, zasobów naturalnych i leśnictwa z dnia 11 sierpnia 1998 r. w sprawie szczegółowych zasad ochrony przed promieniowaniem szkodliwym dla ludzi i środowiska, dopuszczalnych poziomów promieniowania, jakie mogą występować w środowisku, oraz wymagań obowiązujących przy wykonywaniu pomiarów kontrolnych promieniowania (Dz. U. Nr 107 z 1998 r., poz. 676).
- [75] Salomon J., Bull S., *VSAT Standards, Status and Applications in Europe*, International Journal of Satellite Communications, Vol. II, 181–194 (1993).
- [76] Society of Automotive Engineers SAE-AE4R, *Certification of aircraft electrical/electronic systems for operation in the high intensity radiated fields (HIRF) environment*, draft 15, April 1992.
- [77] Society of Automotive Engineers SAE-AE4R, *User's manual for AC-XX-XX, High intensity radiated fields (HIRF)*, draft, January 1992.
- [78] Stevens E.G., Watkins P.J., *EMC Study phase II – earth station/aircraft instrument landing systems*, ERA Technology, April 1993.
- [79] Zieliński R.J., Urbanek A., *Sieci satelitarne, Przegląd systemów VSAT stosowanych w Polsce*, NetWorld, nr 2, 1997.
- [80] Zieliński R.J., *EMC analysis of satellite earth stations with small antenna (VSAT)*, Proceedings of the European Electromagnetics International Symposium on Electromagnetic Environments and Consequences, EUROEM, 94, Bordeaux, France, May–June 1994.
- [81] Zieliński R.J., *EMC between aircraft onboard electronic equipment and satellite earth stations*, Proceedings of Fourteenth International Wrocław Symposium, Wrocław, June 1998.

- [82] Zieliński R.J., *Nadawczo/odbiorcze stacje VSAT, aspekt kompatybilności elektromagnetycznej (wg normy ETS 300 159)*, Raport Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej nr I-28/SPR/071/93, listopad 1993.
- [83] Zieliński R.J., *Odbiorcze stacje VSAT, aspekt kompatybilności elektromagnetycznej (wg normy ETS 300 157)*, Raport Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej nr I-28/SPR/070/93, listopad 1993.
- [84] Zieliński R.J., *Oddziaływanie energii elektromagnetycznej na człowieka*, Przegląd Telekomunikacyjny, nr 6, 1996.
- [85] Zieliński R.J., *Risk of interference to aircraft from VSAT and SNG terminals*, 11th International Conference on High-Power Electromagnetics EUROEM' 98, Tel-Aviv, Israel, June 1998.
- [86] Zieliński R.J., *Satelitarne stacje reporterskie (wg normy prETS 300 327), aspekt kompatybilności elektromagnetycznej*, Raport Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej nr I-28/SPR/072/93, listopad 1993.
- [87] Zieliński R.J., *Satellite earth stations with small antenna (VSAT) as a source of interference*, Proceedings of Twelfth International Wrocław Symposium, Wrocław, June 1994.
- [88] Zieliński R.J., *Sieci satelitarne z małymi terminalami (VSAT) – aspekt kompatybilności elektromagnetycznej*, Raport Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej nr I-28/SPR/069/93, listopad 1993.
- [89] Zieliński R.J., *Sieci satelitarne z małymi terminalami – VSAT*, II międzynarodowa konferencja i wystawa technik telekomunikacyjnych i sieciowych, ComNet, Warszawa 1996.
- [90] Zieliński R.J., *VSAT's in Scientific Academic Computer Network (NASK) in Poland*, Proceedings 4th European Symposium and Exhibition on Semiconductor Engineering and Materials Technology, Science Education Technology SET'94, Warsaw, April 1994.





**Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w następujących księgarniach:
„Politechnika”**

**Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
budynek A-1 PWr., tel. (0-71) 320-25-34;
„Tech”**

**plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław
budynek D-1 PWr., tel. (0-71) 320-32-52**

Prowadzimy sprzedaż wysyłkową

ISBN 83-7085-453-2