

# Czynniki wpływające na bilans energetyczny łączy satelitarne w zakresie fal milimetrowych

Jan Bogucki

Ewa Wielowieyska

Określono czynniki propagacyjne, mające wpływ na niezawodność pracy łączy satelitarnych pracujących w zakresie fal milimetrowych. Przedstawiono przykładowe obliczenia tras satelitarnych z uwzględnieniem wszystkich tych czynników.

*propagacja, telekomunikacja satelitarna, satelita*

## Wprowadzenie

Dotychczas najczęściej wykorzystywanymi zakresami częstotliwości w telekomunikacji satelitarnej były pasma 6/4 GHz i 14/12 GHz [1, 15]. Wyższe częstotliwości umożliwiają budowę mniejszych, a przez to tańszych struktur antenowych; również zespoły mikrofalowe są mniejsze, proporcjonalnie do długości fali, na której pracują [12, 16]. Dzięki temu można konstruować kompaktowe, przenośne cyfrowe stacje satelitarne. Jednak efektywne wykorzystanie fal radiowych zakresu milimetrowego ogranicza degradacja sygnału przez zjawiska meteorologiczne [5, 6, 18].

Zagadnienie wpływu troposfery na fale radiowe było przedmiotem badań w czasie prowadzonych ostatnio pomiarów propagacji w pasmie *Ka* (w zakresie częstotliwości 27 – 40 GHz) podczas prac nad zaawansowanymi technologiami łączności satelitarnej ACTS (*Advanced Communication Technology Satellite*) w USA i badań propagacyjnych ITALSAT (*ITALSAT Propagation Experiment*) w Europie.

Do zaprojektowania systemu łączności satelitarnej jest konieczna znajomość bilansu energetycznego łączy. Należy zatem znać:

- czułość progową odbiornika, aby zdefiniować minimalny sygnał odbierany;
- minimalny wymagany stosunek sygnału do szumu, który jest związany z rodzajem zastosowanej modulacji, do zapewnienia wymaganej jakości transmisji;
- tłumienność międzyantenową, do określenia poziomu sygnału docierającego do anteny odbiorczej.

W Instytucie Łączności opracowano program „TraSat” do projektowania tras nachylonych w zakresie częstotliwości do 50 GHz. Umożliwia on kompleksowe projektowanie tras z uwzględnieniem wszystkich zjawisk atmosferycznych.

Podczas projektowania tras satelita – Ziemia i Ziemia – satelita wykorzystuje się światowe dane meteorologiczne (zawarte w dokumentach ITU-R) lub krajowy serwis. Program został tak zaprojektowany, aby można było obliczyć niezawodność propagacyjną tych tras, wykorzystując wieloletnią bazę opadów rejestrowanych w Polsce, będącą własnością Instytutu Łączności [14].

## Czułość progowa odbiornika

Moc szumów tła na wejściu systemu odbiorczego o szerokości pasma  $B$ , odpowiadających szumom cieplnym rezystancji wewnętrznej źródła sygnału znajdującego się w temperaturze otoczenia  $T$ , wyraża się wzorem:

$$P_{sz} = kTB, \quad (1)$$

gdzie:

$k$  – stała Boltzmanna ( $k = 1,38044 \cdot 10^{-23}$  J/K);

$B$  – szerokość pasma [Hz];

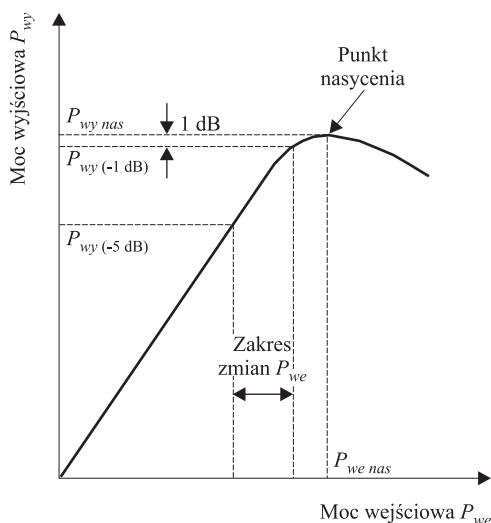
$T$  – temperatura otoczenia [K] (standardowa temperatura odniesienia  $T = 290$  K).

Czułość progowa odbiornika jest to moc minimalnego sygnału wykrywalnego, definiowana jako moc o 3 dB większa od mocy szumów tła (w wartości bezwzględnej jest dwa razy większa od mocy szumów tła).

Natomiast o jakości transmisji decyduje rodzaj zastosowanej modulacji, gdyż określa ona wymagany stosunek sygnału do szumu.

## Rodzaje modulacji

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój technik modulacji stosowanych w łączności satelitarnej. Duży nacisk został położony na uzyskanie optymalnej efektywności wykorzystania mocy i pasma częstotliwości, z zapewnieniem wysokiej jakości przekazu i dużej niezawodności transmisji. Wyróżnia się cyfrowe modulacje o stałej obwiedni (obwiednia amplitudy sygnału nie zmienia się znacząco między bitami czy symbolami) i zmiennej obwiedni (obwiednia zmienia się znacząco, nawet do zera, podczas normalnej transmisji). Ogólnie można powiedzieć, że modulacje o stałej obwiedni powinny być stosowane w nieliniowych kanałach w.cz. Do takich należą kanały zawierające nasycający się



Rys. 1. Charakterystyka wzmacniacza z lampą z falą bieżącą

transponder satelity ze wzmacniaczem z lampą z falą bieżącą. Charakterystykę takiego wzmacniacza przedstawiono na rys. 1. Przyjmuje się, że dla pracy z wieloma nośnymi (*multicarrier*) punkt nominalny pracy wzmacniacza z lampą z falą bieżącą jest 5 dB poniżej punktu nasycenia. Zapobiega to występowaniu produktów niepożądanych o dużych poziomach, będących rezultatem intermodulacji między kilkoma nośnymi. Przy pracy z jedną nośną zwykle jest dopuszczalny punkt pracy LFB położony 1 dB poniżej punktu nasycenia. Modulacje o zmiennej obwiedni wymagają kanałów o liniowej charakterystyce przenoszenia, dlatego w telewizji satelitarnej zwykle stosuje się modulacje fazy.

Ponadto w modulacjach binarnych parametr przebiegu nośnego, np. faza, przyjmuje jedną z dwu możliwych wartości, wówczas odstęp jednostkowy modulacji – odpowiadający czasowi trwania pojedynczego elementu sygnału zmodulowanego – jest równy czasowi trwania elementu binarnego 1 lub 0. Szybkość transmisji sygnału binarnego  $R_b$  w bitach na sekundę odpowiada wtedy szybkości modulacji w bodach. Jednak w przypadku modulacji wielowartościowej na jeden element sygnału zmodulowanego przypada  $N$  bitów sygnału modulującego, przy czym  $N = 2, 3, \dots$ . Zastosowanie modulacji wielowartościowej zwiększa przepustowość kanału [17], ale – niestety – pogarsza odporność sygnału na szum i zakłócenia (tablica 1).

Tabl. 1. Modulacja PSK o różnej wartościowości

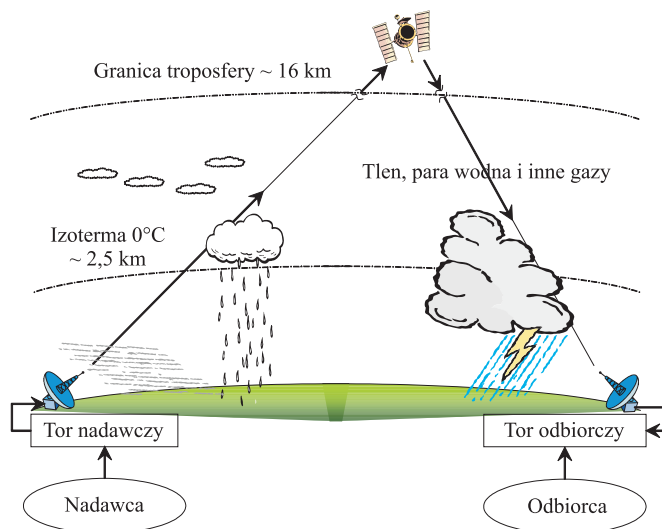
Właściwości	2-PSK	4-PSK	8-PSK
Minimalna szerokość pasma (szybkość transmisji)	$R_b$	$0,5 R_b$	$0,33 R_b$
Odstęp sygnał/szum [dB] (dla $BER = 10^{-6}$ )	10,6	13,6	18,8

W transmisjach satelitarnych stosuje się modulację MPSK (*M-ary Phase Shift Keying*), a przede wszystkim modulację 4-PSK, zwaną też kwadraturowym kluczowaniem fazy QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) [8]; charakteryzuje się ona małym stosunkiem mocy szczytowej do średniej, a tym samym minimalizuje wpływ nieliniowości charakterystyki transpondera. Modulacja QPSK jest przykładem  $M$  wartościowej modulacji PSK, przy  $M = 4$ . Modulację 8-PSK stosuje się wyjątkowo w łączach punkt – punkt, gdyż wymaga mniejszej szerokości pasma częstotliwości. Natomiast obecnie nie stosuje się modulacji 2-PSK.

## Tłumienność międzyantenowa w zakresie fal milimetrowych

Tłumienność międzyantenowa składa się z dwóch wielkości:

- tłumienności stałej, dla danej trasy i częstotliwości, odpowiadającej tłumieniu sygnału w warunkach propagacji w wolnej przestrzeni  $A_w$ ;
- tłumienności dodatkowej  $A_p$ , będącej wynikiem oddziaływania na sygnał zjawisk atmosferycznych (takich, jak: opady, mgła, chmury) oraz występowania gazów w atmosferze, która (rys. 2) jest bliska wartości zerowej w dobrych warunkach propagacyjnych i osiąga wartość nawet kilkudziesięciu decybeli w nie sprzyjających warunkach.



Rys. 2. Droga sygnału Ziemia – satelita – Ziemia

### Tłumienie wolnej przestrzeni

Tłumienie wolnej przestrzeni  $A_w$  określa się stosunkiem mocy wypromieniowanej przez izotropową antenę nadawczą do mocy odbieranej przez izotropową antenę odbiorczą, gdy obie anteny są umieszczone w wolnej przestrzeni. Tłumienie wolnej przestrzeni jest funkcją tylko dwóch parametrów: częstotliwości i długości trasy. Długość trasy satelitarnej zależy od wysokości satelity nad powierzchnią Ziemi oraz punktów geograficznych satelity i stacji naziemnej. Długość trasy satelitarnej wynosi ok. 300 km dla stacji orbitalnych. Ta odległość satelity od Ziemi umożliwia wygodną jej obserwację i nie naraża załogi na promieniowanie kosmiczne. Dla systemów telekomunikacyjnych odległość ta waha się od 500 km dla systemów niskoorbitowych LEO (*Low Earth Orbit*) do 40 000 km dla systemów geostacjonarnych GEO (*Geosynchronous Earth Orbit*).

### Tłumienie wywołane gazami

Oslabienie sygnału w torze radiowym może być rezultatem absorpcji energii przez cząsteczki gazów, będące składnikami atmosfery. To zjawisko, noszące nazwę absorpcji molekularnej, zachodzi głównie w tlenie i w parze wodnej. Tłumienie z nim związane rośnie ze wzrostem częstotliwości i wykazuje kilka maksimum o charakterze rezonansowym; pierwsze maksimum związane z absorpcją przez cząstki pary wodnej, występuje wokół częstotliwości 22 GHz, a szerokie pasmo absorpcyjne tlenu cząsteczkowego jest położone w przedziale 50 – 70 GHz. Tłumienie powodowane absorpcją zależy głównie od częstotliwości, kąta elewacji, położenia geograficznego oraz gęstości pary wodnej. Dla częstotliwości poniżej 10 GHz tłumienie sygnału nie przekracza 0,1 dB. Odgrywa ono jednak pewną rolę dla zakresu fal milimetrowych, szczególnie przy małych kątach elewacji.

Metodę obliczania współczynnika tłumienia fali elektromagnetycznej w suchym powietrzu oraz w parze wodnej dla trasy radiowej od poziomu morza do wysokości 5 km, dla zakresu częstotliwości 1 – 350 GHz opisano w zaleceniu ITU-R [10]. Danymi wejściowymi są mediany (miesięczne lub roczne) wartości pary wodnej  $\rho$  z sezonowej mapy absolutnej wilgotności powietrza, wyrażane w postaci izolinii [ $g/m^3$ ],

podawane przez ITU-R lub przez krajowe serwisy meteorologiczne. Koncentracja pary wodnej zmienia się w profilu pionowym, dlatego obliczenie statystycznego tłumienia w gazach jest dość złożone.

### ***Tłumienie wywołane chmurami***

W zakresie fal milimetrovych chmury zawierające wodę w stanie ciekłym tłumią sygnał (natomiast chmury śniegowe praktycznie nie tłumią). Małe względem długości fali cząstki chmur powodują tłumienie, będące funkcją temperatury chmury oraz całkowitej zawartości wody w stanie ciekłym wzdłuż trasy propagacyjnej. Tłumienie to może osiągnąć wartość kilkudecybelową w zakresie częstotliwości 20 – 30 GHz.

Dla chmur lub mgieł, składających się z małych kropeł deszczu mniejszych niż  $10^{-4}$  m można stosować rozkład Rayleigha i określić tłumienie przez ilość wody na jednostkę objętości. Przy częstotliwościach ok. 100 GHz i powyżej tłumienie spowodowane mgłą może być znaczne. Ilość pary wodnej zawartej w „przeciętnej” mgle wynosi ok.  $0,05 \text{ g/m}^3$  (widzialność ok. 300 m), a w gęstej mgle  $0,5 \text{ g/m}^3$  (widzialność ok. 50 m).

Model matematyczny rozkładu Rayleigha, oparty na modelu podwójnym-Debye stałej dielektrycznej wody, jest wykorzystany do obliczenia wartości współczynnika tłumienia wywołanego chmurami lub mgłą dla częstotliwości do 1000 GHz [11].

### ***Tłumienie wywołane deszczem***

Tłumienie wywołane deszczem jest czynnikiem dominującym tłumienia dodatkowego w zakresie fal milimetrovych [13]. Tłumienie to jest zależne od częstotliwości, kąta elewacji, intensywności opadu [3, 4]. Czas trwania tłumienia propagacyjnego i jego wartość zależą od rodzaju opadu; przykładowo bardzo słaby deszcz jest przyczyną niewielkich, ale długotrwałych tłumień sygnału; z kolei silny deszcz o intensywności ok. 100 mm/godz., trwający zwykle kilka minut, może spowodować tłumienie ok. 60 dB dla fal milimetrovych.

Obliczanie charakterystyk statystycznych tłumień w deszczu dla danej lokalizacji i dla częstotliwości do 55 GHz wykonuje się przez [8]:

- określenie efektywnej wysokości, do której może wystąpić deszcz dla danego punktu odbiorczego; w tym celu jest konieczna znajomość wysokości średniej izotermy  $0^\circ\text{C}$  nad poziomem morza, którą można uzyskać z krajowego serwisu meteorologicznego lub z danych ITU-R;
- określenie wartości intensywności deszczu  $R_{0,01}$  przekraczanej w 0,01% roku (średnia 1-minutowa); jeżeli nie ma bliższych danych dotyczących opadów dla danego miejsca geograficznego, wówczas należy wykorzystać dane ITU-R;
- określenie tłumienia jednostkowego  $\gamma_r$  [dB/km], z wykorzystaniem współczynników regresji  $k$ ,  $\alpha$  [4];
- określenie efektywnej długości trasy.

Powyższe wielkości umożliwiają oszacowanie tłumienia występującego w 0,01% roku.

## Bilans energetyczny

Całkowite tłumienie dodatkowe jest wypadkową efektów tłumienia propagacji w deszczu, gazach i chmurach, a prawdopodobieństwo jego wystąpienia  $A_p(p)$ , można obliczyć z zależności:

$$A_p(p) = A_g(p) + A_r(p) + A_c(p), \quad (2)$$

gdzie:

$A_g(p)$  – tłumienie wywołane suchym powietrzem i parą wodną dla danego prawdopodobieństwa  $p$ :

$$A_g(p) = A_g(1\%) \quad \text{dla} \quad p < 1,0\%, \quad (3)$$

$A_r(p)$  – tłumienie wywołane deszczem dla danego prawdopodobieństwa  $p$ ;

$A_c(p)$  – tłumienie wywołane chmurami dla danego prawdopodobieństwa  $p$ :

$$A_c(p) = A_c(1\%) \quad \text{dla} \quad p < 1,0\%. \quad (4)$$

W równaniach (3) i (4) uwzględniono fakt, że duża część tłumienia w chmurach i gazach zawiera się już w tłumieniu wywołanym deszczem dla procentu czasu  $p \leq 1\%$ . Moc na wejściu odbiornika stacji naziemnej wyraża się zależnością:

$$P_o = EIRP_s - A_w - A_p + G_o, \quad (5)$$

gdzie:

$EIRP_s$  – moc zastępcza promieniowania izotropowego nadajnika stacji satelitarnej [dBW],  
(*Effective Isotropic Radiated Power* – EIRP);

$G_o$  – zysk anteny odbiorczej (naziemnej) [dB];

$A_w$  – tłumienie wolnej przestrzeni na trasie satelita–Ziemia;

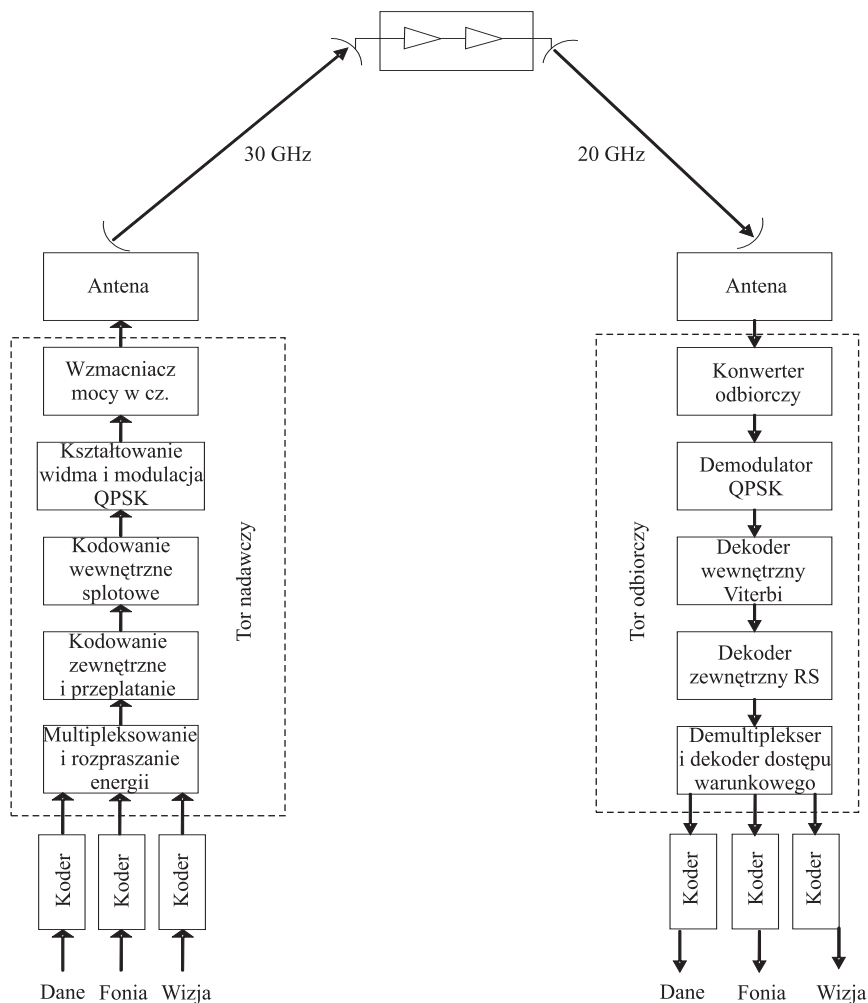
$A_p$  – całkowite tłumienie dodatkowe na trasie satelita–Ziemia.

## Przykład projektowania łącza satelitarne

Projektowana będzie sieć telekomunikacji satelitarnej w zakresie fal milimetrowych, zakładając, że powinna ona pracować nawet podczas silnego deszczu, którego prawdopodobieństwo wystąpienia wynosi 0,01%. Naziemna stacja nadawcza jest zlokalizowana w Ł w Gdańsku (szerokość geograficzna 54N22'50", długość geograficzna 18E36'10"), a naziemna stacja odbiorcza – w Ł Warszawa-Miedzeszyn (szerokość geograficzna 52N10'20", długość geograficzna 21E11'38"). Te dwa punkty naziemne znajdują się (wg ITU) w strefie klimatycznej E (Gdańsk) i w strefie H (Warszawa). Transmisja jest realizowana z wykorzystaniem satelity HotBird 4 (długość geograficzna 13E00'00").

Projektowany system satelitarny jest przewidziany do transmisji wizji, fonii i danych (rys. 3) o następujących parametrach jakościowych:

- elementowa stopa błędów  $BER = 10^{-6}$  w obecności tłumienia propagacyjnego  $A_p$ ;
- niezawodność systemu 0,9999.



Rys. 3. Schemat transmisji toru cyfrowego w łączu satelitarzym

Założono następujące parametry: częstotliwość nadawczą  $f_n = 30$  GHz, częstotliwość odbiorczą  $f_o = 20$  GHz, jednakowe moce stacji naziemnej i satelitarnej – skuteczną moc promieniowania izotropowego  $EIRP = 50$  dBW oraz modulację QPSK.

### Obliczenie czułości progowej odbiornika

Założono szerokość pasma odbiornika 6 MHz, wówczas moc szumów wynosi (1):

$$P_{sz} = 10 \lg(kTB) = -106,2 \text{ [dBm]}. \quad (6)$$

Dla zapewnienia transmisji moc minimalnego sygnału wykrywalnego (czułość progowa odbiornika) musi wynosić  $P_p = -103,2$  dBm.

## Obliczenie tłumień propagacyjnych

Dane do obliczeń tłumień propagacyjnych i wyniki obliczeń zamieszczono w tablicach 2–5. Obliczenia te wykonano z wykorzystaniem programu „TraSat”.

**Tabl. 2. Tłumienie wolnej przestrzeni**

Częstotliwość	Długość trasy	Tłumienie wolnej przestrzeni
[GHz]	[km]	[dB]
$f_n = 30$	36 818,1	213,3
$f_o = 20$	36 645,8	209,8

**Tabl. 3. Tłumienie wywołane gazami**

Częstotliwość	Warstwa suchego powietrza		Warstwa pary wodnej		Tłumienie wywołane dwiema warstwami
	długość trasy	tłumienie jednostkowe	długość trasy	tłumienie jednostkowe	
[GHz]	[km]	[dB/km]	[km]	[dB/km]	[dB]
$f_n = 30$	11,21	0,020	3,64	0,162	0,819
$f_o = 20$	10,53	0,012	3,99	0,196	0,903

**Tabl. 4. Tłumienie wywołane chmurami i mgłą**

Częstotliwość	Ilość wody w kolumnie chmury	Tłumienie wywołane chmurami i mgłą
[GHz]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[dB]
$f_n = 30$	1,1	1,429
$f_o = 20$	1,1	0,607

**Tabl. 5. Tłumienie wywołane deszczem**

Częstotliwość	Wysokość izotermi 0°C	Intensywność deszczu	Współczynniki regresji $k, \alpha$		Długość trasy w deszczu	Tłumienie jednostkowe	Tłumienie w deszczu
[GHz]	[km]	[mm/h]			[km]	[dB/km]	[dB]
$f_n = 30$	2,1	22	0,187	1,021	5,06	3,86	20,47
$f_o = 20$	2,4	32	0,0751	1,099	5,39	2,98	14,42



## Obliczenie bilansu energetycznego

Bilans energetyczny łącza liczone, odejmując od skutecznej mocy promieniowanej (wyrażonej w decybelach), poszczególne składniki tłumienia propagacyjnego [5]. Natomiast zyski anten liczone, wykorzystując zależności matematyczne dla anten mikrofalowych z reflektorami parabolicznymi [3].

Poniżej zaprezentowano bilans energetyczny dla stacji odbiorczej i nadawczej.

### Stacja odbiorcza (trasa satelita – Ziemia) – bilans energetyczny

Tłumienie wolnej przestrzeni:	209,80 dB
Tłumienia w gazach:	0,90 dB
Tłumienie wywołane chmurami:	0,61 dB
Tłumienie wywołane deszczem:	14,42 dB
Całkowite tłumienie propagacyjne:	225,70 dB
Moc sygnału na powierzchni Ziemi:	-145,70 dBm
Moc minimalnego sygnału:	-103,20 dBm
Wymagany zysk anteny:	43,50 dB

### Stacja nadawcza (trasa Ziemia – satelita) – bilans energetyczny

Tłumienie wolnej przestrzeni:	213,30 dB
Tłumienia w gazach:	0,82 dB
Tłumienie wywołane chmurami:	1,43 dB
Tłumienie wywołane deszczem:	20,47 dB
Całkowite tłumienie propagacyjne:	236,00 dB
Moc sygnału docierająca do satelity:	-156,00 dBm
Moc minimalnego sygnału odbieranego przez satelitę:	-145,00 dBm
Wymagane zwiększenie <i>EIRP</i> (naziemnej):	11,00 dB

Z przedstawionych obliczeń wynika, że aby uzyskać wymaganą niezawodność łącza – dość wysoką, bo 0,01%, przy założonych parametrach urządzeń oraz wymaganej jakości transmisji (np. stopa błędów  $< 10^{-6}$ , por. tabl. 1), powinno się zastosować anteny naziemne o bardzo dużych średnicach. W omawianym przykładzie średnica anteny w naziemnej stacji odbiorczej powinna mieć co najmniej 5 m.

Głównym czynnikiem wpływającym na tak duże wymagania jest tłumienie wywołane deszczem, które ma wartość 14,4 dB dla trasy o częstotliwości 20 GHz i 20,5 dB dla 30 GHz. Gdyby tłumienie propagacyjne było bliskie 0 dB, wówczas tę transmisję z wymaganą jakością można by zrealizować za pomocą odbiorczej anteny o średnicy 0,6 m.

## Uwagi końcowe

Przeprowadzone rozważania dotyczą zarówno tras z satelitami geostacjonarnymi GEO, jak i niskorbitowymi LEO, gdyż wszystkie zjawiska propagacyjne na trasach nachylonych zachodzą tylko w warstwie przyziemnej – w troposferze [2, 7]. Dla długości trasy satelitarnej satelita – Ziemia ok. 1000 km (dla satelitów LEO) tłumienie dodatkowe propagacyjne ma zatem taką samą wartość, jak dla trasy o tym samym kącie elewacji, ale długości ok. 40 000 km (dla satelitów GEO).

## Bibliografia

- [1] Bem D. J.: *Rola satelitów we współczesnej telekomunikacji*. W: Materiały z Krajowego Sympozjum Telekomunikacji KST'2002, Bydgoszcz, 2002, t. A, s. 13–32
- [2] Bogucki J.: *Satelity telekomunikacyjne*. Elektronizacja, 2002, nr 1–2, s. 30–32
- [3] Bogucki J.: *Trasy nachylone w zakresie fal milimetrycznych*. Telekomunikacja i Techniki Informacyjne, 2003, nr 3–4, s. 66–92
- [4] Bogucki J., Wielowieyska E.: *Elewacja a tłumienie propagacyjne na trasie nachylonej w zakresie fal milimetrycznych*. W: Materiały z XI Krajowego Sympozjum Nauk Radiowych, Poznań, 2005
- [5] Bogucki J., Wielowieyska E.: *Tłumienie dodatkowe w łączu satelitarne*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 1998, nr 1, s. 48–51
- [6] Bogucki J., Wielowieyska E.: *Wpływ warunków propagacji na niezawodność pracy tras nachylonych w zakresie fal milimetrycznych*. W: Materiały z konferencji KKRRiT, Warszawa, 2004
- [7] Elbert B. R.: *The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook*. London, Artech House, 2001
- [8] ETSI EN 300 421: *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services*. 1997
- [9] ITU-R, Rec. P.618.7: *Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunications systems*. Geneva, 2001
- [10] ITU-R, Rec. P.676-5: *Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1 – 350 GHz*. Geneva, 2001
- [11] ITU-R, Rec. P.840-3: *Attenuation due to clouds and fog*. Geneva, 1999
- [12] Katulski R. J., Mikołajski M.: *Współczesna telekomunikacja satelitarna*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 2003, nr 2-3, s. 92–97
- [13] Kawecki A.: *Korelacja intensywności deszczu z tłumieniem mikrofal*. Prace IŁ, 1997, nr 108, s. 73–85 (tekst w jęz. ang.)
- [14] Kawecki A.: *Wieloletnie charakterystyki intensywności deszczu w Miedzeszynie na potrzeby radiokomunikacji*. Prace IŁ, 1996, nr 106, s. 69–84
- [15] Modelski J., Kurek K.: *Perspektywy rozwoju systemów łączności satelitarnej*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 2005, nr 1, s. 3–12

- [16] Sheriff R. E., Fun Hu Y.: *Mobile Satellite Communication Networks*. Wiley, 2001
- [17] Simmonds A.: *Wprowadzenie do transmisji danych*. Warszawa, WKiŁ, 1999
- [18] Stutzman W. L., Dishman W. K.: *A simple model for estimation of rain induced attenuation along Earth – space paths at millimetre wavelengths*. Radio Science, 1982, vol. 17, no. 6, s. 1465–1476

### Jan Bogucki



Inż. Jan Bogucki (1947) – absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1972); długoletni pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 1973); autor ponad stu publikacji naukowych; zainteresowania naukowe: cyfrowe linie radiowe, telewizja cyfrowa, propagacja fal w troposferze.  
e-mail: J.Bogucki@itl.waw.pl

### Ewa Wielowieyska



Ewa Wielowieyska (1952) – absolwentka Wydziału Matematyki i Mechaniki Uniwersytetu Warszawskiego (1977); pracownik Zakładu Metod i Analiz Matematycznych AWF w Warszawie (1978–1982), długoletni pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 1982); zainteresowania naukowe: oprogramowanie systemu rejestracji i przetwarzania danych radiometeorologicznych na doświadczalnych liniach radiowych oraz oprogramowanie dotyczące analiz propagacyjno-sieciowych w zakresie fal średnich i długich.  
e-mail: E.Wielowieyska@itl.waw.pl