

Wskazano sposób projektowania tras nachylonych, czyli satelitarnych, w zakresie fal milimetrowych. Podano równanie radiokomunikacyjne łącza satelitarnego oraz podstawowe parametry satelity telekomunikacyjnego. Zamieszczono zależności matematyczne do precyzyjnego projektowania tras satelitarnych, pracujących w zakresie częstotliwości większych niż 18 GHz.

telekomunikacja, łączność satelitarna, propagacja

## Wprowadzenie

W ostatnich latach nastąpił dynamiczny rozwój techniki cyfrowej w radiokomunikacji, a w szczególności systemów łączności bezprzewodowej, w tym nowych technik dostępu dla transmisji danych, a także satelitarnej telewizji cyfrowej. W 1994 r. w ramach projektu DVB (*Digital Video Broadcasting*) opracowano standard dla cyfrowej emisji telewizyjnej DVB-S (*Digital Video Broadcasting-Satellite*). Obecnie na świecie systemy satelitarne są najszybciej rozwijającym się szerokopasmowym medium dystrybucyjnym. Satelity umożliwiają odbiór telewizji w miejscach, w których nie ma instalacji kablowych. Dotychczas uważano, że telewizja kablowa ma przewagę nad satelitarną, gdyż transmituje programy z wyższą jakością, a ponadto jej oferta programowa jest szersza dzięki transmisjom programów lokalnych. Jednak teraz telewizja satelitarna też oferuje programy lokalne, a przekaz cyfrowy zapewnia wysoką jakość odbieranych programów.

Do niedawna prawie wszystkie satelity komunikacyjne przeznaczone do zadań komercyjnych znajdowały się na orbicie geostacjonarnej GEO (*Geosynchronous Earth Orbit*). Satelita umieszczony na orbicie geostacjonarnej znajduje się dokładnie nad równikiem w odległości 35 803 km od Ziemi. Czas obiegu satelity po takiej orbicie wokół Ziemi jest identyczny z czasem obrotu Ziemi wokół osi. Powoduje to, że satelita jest postrzegany jako nieruchomy punkt zawieszony w określonym miejscu nad Ziemią. Antena naziemna może być zatem bezpośrednio skierowana na wybranego satelitę geostacjonarnego i nie ma potrzeby zmiany jej położenia.

Każdy satelita znajdujący się na orbicie geostacjonarnej może „oświetlać” – wykorzystując anteny globalne – około 42% powierzchni Ziemi. Trzy satelity geostacjonarne, umieszczone w równej odległości od siebie, mogą objąć zasięgiem emisji praktycznie cały obszar globu ziemskiego, z wyjątkiem krańców obszarów okołopólnych.

Oprócz systemów z satelitami geostacjonarnymi są i powstają systemy łączności, wykorzystujące satelity na niskich orbitach LEO (*Low Earth Orbit*), m.in. do radiokomunikacji ruchomej. Odległość satelity geostacjonarnego od stacji naziemnej waha się od 35 803 km do 41 679 km. Ta pierwsza wartość odnosi się do przypadku, gdy stacja naziemna jest w punkcie podsatelitarnym, natomiast druga – gdy jest zlokalizowana w strefie podbiegunowej. Z tego wynika, że czas transmisji sygnału między satelitą i Ziemią zawiera się w przedziale od 0,12 s do 0,14 s. Dla pojedynczego skoku – przy transmisji dwuplexowej – te wartości są czterokrotnie większe (od 0,48 s do 0,56 s), gdyż wtedy łącze satelitarne wykonuje skok Ziemia–satelita–Ziemia od jednego odbiorcy do drugiego i z powrotem

przez inne łącza Ziemia–satelita–Ziemia. Gdy natomiast odległość satelity niskoorbitowego od Ziemi wynosi, np. 750 km, wówczas czas opóźnienia jest równy tylko 0,0025 s. Dla pojedynczego skoku opóźnienie jest więc rzędu 0,01 s. Zaletą systemów LEO jest również szybsze działanie, a zatem i atrakcyjny interakcyjny globalny dostęp do sieci.

Ponadto warto podkreślić, że dla niskoorbitowego satelity tłumienie swobodnej przestrzeni w łączu Ziemia–satelita jest mniejsze o około kilkadziesiąt decybeli.

W systemach satelitarnych to samo pasmo częstotliwości jest wykorzystywane wspólnie przez różnych użytkowników, tak więc sygnał w wiązce antenowej stanowi sumę sygnałów dla poszczególnych stacji naziemnych. Sygnały te muszą być tak zdefiniowane, aby było możliwe rozdzielanie sygnałów dla różnych użytkowników. Znane są cztery sposoby dzielenia pasma.

1. **Wielodostęp częstotliwościowy FDMA** (*Frequency Division Multiple Access*). Definiuje się kanały częstotliwościowe w ramach pasma przydzielonemu danemu systemowi i przydziela się każdemu użytkownikowi osobny kanał częstotliwościowy. Wykorzystuje się tu dwie techniki FDMA:
  - FDM/FM/FDMA, gdzie w nadawczej stacji naziemnej następuje zwielokrotnienie częstotliwościowe FDM (*Frequency Division Multiple*) pewnej liczby kanałów modulowanych jednowstęgowo; powstaje w ten sposób grupa pierwotna i tym sygnałem grupowym jest modulowany częstotliwościowy przebieg nośny, doprowadzony następnie do sieci satelitarnej o dostępie wielokrotnym z podziałem częstotliwościowym;
  - SCPC (*Signal Channel Per Carrier*), czyli jeden kanał na jednym przebiegu nośnym, gdzie sygnał każdego kanału moduluje bezpośrednio oddzielny przebieg nośny wielkiej częstotliwości.
2. **Wielodostęp czasowy TDMA** (*Time Division Multiple Access*). W całej szerokości pasma kanału wysyła się sygnał cyfrowy o stosunkowo dużej przepływności, określa w nim strukturę ramkową zawierającą  $N$  szczelin czasowych, a następnie przesyła się  $i$ -ty sygnał wyłącznie w  $i$ -tych szczelinach czasowych. Każdy z użytkowników ma więc przydzielony pełen zakres widma częstotliwości w trasponderze satelitarnym, jednak może korzystać ze swego przydziału jedynie przez krótki czas, zwany oknem czasowym.
3. **Wielodostęp kodowy CDMA** (*Code Division Multiple Access*). Każdy z nadajników wykorzystuje przez cały czas pełne pasmo częstotliwości przydzielone systemowi, ale koduje nadawany przez siebie sygnał innym ciągiem pseudolosowym  $k_i(t)$ . Na wejściu  $i$ -tego odbiornika znajduje się układ kompresji widma, wykorzystujący  $i$ -ty ciąg pseudolosowy, co sprawia, że pozostałe  $N - 1$  sygnały są prawie w całości wytłumione. Technika wielodostępu kodowego jest hybrydową kombinacją technik FDMA i TDMA. W szczególności technika wybierania częstotliwości nośnych FH (*Frequency Hopping*) może być zastosowana w każdym oknie czasowym, powodując nadawanie użytkownikom pasm w praktycznie losowy sposób. Zalety systemów opartych na technice CDMA wynikają przede wszystkim z jej wysokiej odporności na zakłócenia, dynamicznego przydziału zasobów radiowych oraz wykorzystywania tego samego pasma radiowego wraz z innymi użytkownikami.
4. **Wielodostęp przestrzenny SDMA** (*Space Division Multiple Access*). Stosując anteny o dostatecznie wąskich wiązkach antenowych, można oświetlać nimi z satelity wybrane fragmenty całego obszaru objętego systemem łączności. Wykorzystuje się więc separację przestrzenną stacji naziemnych. W tej technice stacje naziemne mają możliwość jednoczesnego odbioru na tych samych częstotliwościach lub w tych samych oknach czasowych.

Satelitarne systemy łączności są postrzegane jako jedno z mediów, które mogą służyć do realizacji nowych usług telekomunikacyjnych wymagających szerokiego pasma. W związku z tym rośnie zainteresowanie wykorzystaniem pasma częstotliwości Ka (20/30 GHz) do szybkiej transmisji danych (np. w systemach multimedialnych). Jednym z problemów związanych z wykorzystywaniem wielkich częstotliwości, powyżej 18 GHz, jest znaczne tłumienie w atmosferze spowodowane opadami deszczu, gazami atmosferycznymi i chmurami, co utrudnia osiągnięcie wysokich dostępności systemów przy małym koszcie terminali. Wzrost tłumienia oznacza bowiem pogorszenie stosunku sygnału do szumu w punkcie odbioru. Aby zapewnić wymaganą stopę błędu należałoby zwiększyć moc nadajników (ograniczoną interferencjami wspólnokanałowymi) lub zmniejszyć szybkości transmisji.

Dla zaprojektowania systemu łączności satelitarnej jest konieczna znajomość bilansu energetycznego. Zdefiniowanie wszystkich parametrów łącza umożliwi określenie jego parametrów jakościowych. Jednak tłumienie dodatkowe w łączu satelitarnym wywołane zjawiskami propagacyjnymi można oszacować tylko statystycznie.

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

## Równania łącza satelitarnego

W systemach radiokomunikacji satelitarnej są wykorzystywane satelity aktywne, to znaczy satelity wyposażone w radiokomunikacyjne urządzenia przekaźnikowe, zwane transponderami. Każdy system satelitarny składa się z łącza Ziemia–satelita (*uplink*), służącego do transmisji sygnału z Ziemi do satelity, stanowiącego orbitalną stację transmisyjną, a także łącza satelita–Ziemia (*downlink*), którym sygnał z satelity jest rozsyłany do odbiorców na powierzchni Ziemi. Zasadniczą zaletą retransmisji satelitarnej jest możliwość korzystania z niej przez nieograniczoną liczbę odbiorców (w zasadzie niezależnie od ich położenia geograficznego), jako adresatów sygnałów nadawanych z satelity, łączem satelita–Ziemia.

Antena naziemna promieniuje energię w kierunku satelity. Gdyby była ona izotropowa, promieniująca dookoła, to intensywność promieniowania  $U$  nie zależałaby od kierunku i wynosiłaby:

$$U = \frac{P_i}{4\pi}, \quad (1)$$

gdzie:  $P_i$  – całkowita moc promieniowana.

Gęstość powierzchniową mocy promieniowanej w odległości  $R$  od tej anteny określa wektor Poyntinga  $S$ :

$$S = \frac{U}{R^2}, \quad (2)$$

a zatem:

$$S = \frac{P_i}{4\pi R^2}. \quad (3)$$

Oczywiście antena naziemna promieniuje sygnał nie dookólnie, ale w określonym kierunku. W takim przypadku w odległości  $R$  od anteny nadawczej gęstość strumienia mocy będzie zwiększona  $G_T$ -krotnie i wyniesie:

$$S = \frac{P_i G_T}{4\pi R^2}, \quad (4)$$

gdzie:  $G_T$  – zysk anteny nadawczej.

Antena satelitarna odbiera tylko część energii  $P_r$  wprost proporcjonalną do jej apertury  $A_r$ , ponieważ:

$$P_r = SA_{sk} = S\eta A_{cz} = S\eta w A_r, \quad (5)$$

gdzie:  $\eta$  – sprawność anteny odbiorczej,  
 $w$  – współczynnik wykorzystania apertury,  
 $A_{sk}$  – powierzchnia skuteczna anteny odbiorczej,  
 $A_{cz}$  – powierzchnia czynna anteny odbiorczej,

przy czym:

$$A_{sk} = \eta A_{cz} = \eta \frac{P_{obc}}{S}, \quad (6)$$

gdzie:  $P_{obc}$  – moc oddana do obciążenia.

Powierzchnię czynną dla fali padającej z kierunku osi listka głównego można wyrazić następującą zależnością:

$$A_{cz} = pq \frac{\lambda^2 G_T}{4\pi}, \quad (7)$$

gdzie:  $p$  – współczynnik dopasowania energetycznego,  
 $q$  – współczynnik dopasowania polaryzacyjnego,  
 $\lambda$  – długość fali.

Współczynniki  $p$  i  $q$  przyjmują wartości między 0 i 1. Jeżeli współczynniki  $p$  i  $q$  są równe 1, co występuje w większości zastosowań (warunki optymalnych dopasowań), wówczas powierzchnia czynna wyraża się zależnością:

$$A_{cz} = \frac{\lambda^2 G_T}{4\pi}. \quad (8)$$

Moc  $P_r$  odbieraną przez antenę satelitarną oblicza się wtedy z zależności (5) i (8):

$$P_r = \frac{w P_T G_T G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2}, \quad (9)$$

gdzie:  $P_T$  – moc nadajnika.

Gęstość szumów  $N_o$ , czyli moc szumów zawarta w znormalizowanej szerokości pasma 1 Hz, wynosi:

$$N_o = k T_e, \quad (10)$$

gdzie:  $k$  – stała Boltzmana (−198,6 dBm/K),  
 $T_e$  – systemowa temperatura szumów [K].

Stosunek poziomu przebiegu nośnej do widma gęstości szumów określa zależność:

$$\frac{C}{N_o} = \frac{C}{k T_e}, \quad (11)$$

gdzie:  $C$  – średnia moc szerokopasmowego przebiegu nośnego.

Należy zwrócić uwagę, że zysk energetyczny anteny nie stanowi jedynego parametru, na podstawie którego można ocenić skuteczność anteny. Każda antena odbiera w zakresie listka głównego i listków bocznych szumy pochodzące od atmosfery, jonosfery, powierzchni Ziemi, ze źródeł pozaziemskich, do

których dodaje się szum własny anteny pochodzący od jej elementów stratnych. Nawet jeśli dana antena cechuje się dużym zyskiem, jej skuteczność użytkowa może być w znacznym stopniu zredukowana przez wartość jej temperatury szumowej. Wynika to z mocy szumów  $P$ , określonej – jeśli temperatura szumowa jest niezależna częstotliwościowo w pasmie częstotliwości odbieranym  $W$  – następującą zależnością:

$$P = \frac{kW}{4\pi} \iint T(\Theta, \Psi) |E(\Theta, \Psi)|^2 d\Omega, \quad (12)$$

gdzie:  $E(\Theta, \Psi)$  – względna charakterystyka kierunkowa anteny,  
 $T(\Theta, \Psi)$  – temperatura szumowa anteny.

Istotnym parametrem jest również stosunek energii przypadającej na bit  $E_b$  do gęstości widmowej szumów. Średnia energia przesyłanego bitu jest proporcjonalna do czasu jego trwania  $T_b$ :

$$E_b = P_o T_b, \quad (13)$$

gdzie:  $P_o$  – moc zawarta w bicie.

Stąd:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{CT_b}{kT_e} = \frac{C}{N_o} T_b. \quad (14)$$

Wykorzystując wzór (9) otrzymuje się równanie:

$$\frac{C_u}{N_{ou}} = \frac{P_{ru}}{kT_e} = \frac{wP_T G_T G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2 kT_e}, \quad (15)$$

gdzie:  $\frac{C_u}{N_{ou}}$  – stosunek poziomu nośnej do szumów dla kierunku Ziemia–satelita.

Dla kierunku Ziemia–satelita równanie (15) można przedstawić w wygodniejszej formie logarytmicznej:

$$\frac{C_u}{N_{ou}} = 10 \lg P_T G_T - 20 \lg \frac{4\pi R_u}{\lambda_d} + 10 \frac{G_{ru}}{T_d} - 10 \lg k + 10 \lg w. \quad (16)$$

Dla kierunku satelita–Ziemia równanie można zaprezentować następująco:

$$\frac{C_d}{N_{od}} = 10 \lg P_s G_{sd} - 20 \lg \frac{4\pi R_d}{\lambda_d} + 10 \frac{G_d}{T_d} - 10 \lg k + 10 \lg w. \quad (17)$$

Równania (16) i (17) mają tę samą postać, w których:

- pierwszy składnik, czyli zastępcza moc promieniowana izotropowo EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) stacji naziemnej (satelity) określa efektywną moc promieniowania w kierunku maksymalnego zysku odniesioną do mocy, jaka byłaby promieniowana przez źródło izotropowe:  $EIRP = P_T G_T$ ;
- drugi składnik stanowi tłumienie wolnej przestrzeni na trasie Ziemia–satelita (satelita–Ziemia);
- trzeci składnik jest współczynnikiem wykorzystania apertury anteny naziemnej (satelitarnej);
- czwarty składnik zależy od stałej Boltzmana;
- piąty składnik określa sprawność anteny satelity (odbiorczej).

Wielkość  $w$  jest ujemna, więc składnik piąty reprezentuje straty. Jednak w równaniach (16) i (17) – dla rzeczywistych systemów – należy wprowadzić szósty składnik, uwzględniający dodatkowe straty  $L_d$ , jakie mogą powstać wskutek zjawisk atmosferycznych na trasie satelita–Ziemia i Ziemia–satelita, gdyż tłumienność międzyantenowa składa się z dwu wielkości:

- tłumienności głównej, odpowiadającej tłumieniu sygnału w warunkach propagacji wolnej przestrzeni (drugi składnik równań (16) i (17));
- tłumienności dodatkowej, powodowanej zanikami sygnału w wyniku opadów atmosferycznych; tłumienność dodatkowa zmienia się w funkcji czasu, oscylując wokół wartości zerowej w dobrych warunkach propagacyjnych i osiągając wartość nawet kilkudziesięciu decybeli w warunkach głębokich zaników sygnału.

Wtedy równania (16) i (17) przybierają postać:

$$\frac{C_u}{N_{ou}} = 10 \lg P_T G_T - 20 \lg \frac{4\pi R_u}{\lambda_d} + 10 \frac{G_{ru}}{T_d} - 10 \lg k + 10 \lg w + 10 \lg L_d, \quad (18)$$

$$\frac{C_d}{N_{od}} = 10 \lg P_s G_{sd} - 20 \lg \frac{4\pi R_d}{\lambda_d} + 10 \frac{G_d}{T_d} - 10 \lg k + 10 \lg w + 10 \lg L_d. \quad (19)$$

Wielkość  $C/N_o$  dla trasy Ziemia–satelita ma wpływ na stosunek  $C/N_o$  na trasie satelita–Ziemia. Całkowity stosunek poziomu przebiegu nośnego do szumów na całej trasie  $[C/N_o]_T$  na stacji odbiorczej określa wtedy zależność:

$$\left( \frac{C}{N_o} \right)_T = \frac{1}{\frac{N_{ou}}{C_u} + \frac{N_{od}}{C_d}}. \quad (20)$$

Mnożąc obie strony równania (20) przez czas trwania bitu  $T_b$ , otrzymuje się wyrażenie, w którym stosunek całkowitej energii bitu do gęstości widmowej szumu wynosi:

$$\left( \frac{E_b}{N_o} \right)_T = \frac{1}{\frac{N_{ou}}{E_{bu}} + \frac{N_{od}}{E_{bd}}}. \quad (21)$$

Z powyższych zależności wynika, że można precyzyjnie określić wszystkie parametry łącza Ziemia–satelita i satelita–Ziemia, z wyjątkiem szóstego składnika w równaniach (18) i (19). Parametr ten jest wielkością statystyczną, zależną od parametrów propagacyjnych trasy między satelitą i Ziemią.

## Parametry trasy satelitarnej

W tym rozdziale omówiono orbity i położenie satelitów telekomunikacyjnych, parametry wiązki antenowej satelity oraz czas widoczności satelity umieszczonego na niskiej orbicie.

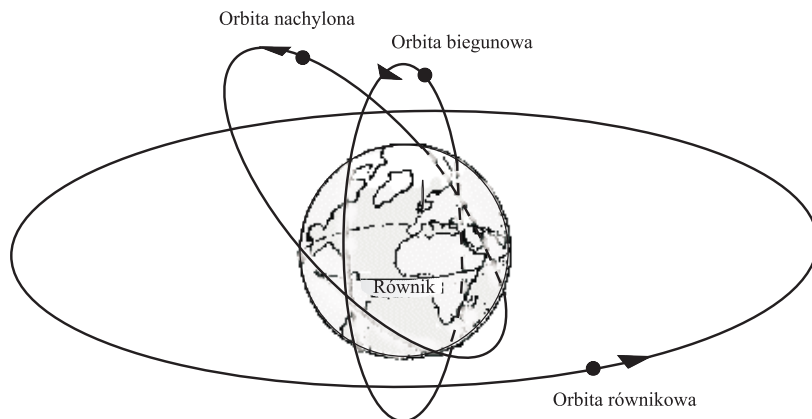
### Orbity sztucznych satelitów Ziemi

Trajektoria sztucznego satelity Ziemi, zwana orbitą, zależy od wielu czynników, np. przyciągania ziemskiego, oporów atmosfery ziemskiej, wpływu Słońca, Księżyca i planet, magnetycznego pola Ziemi. Jednak spośród tych wszystkich czynników, przyciąganie ziemskie ma decydujący wpływ. Prawa ruchu orbitalnego określają trzy prawa Keplera.

1. Orbita sztucznego satelity Ziemi jest elipsą i leży w nieruchomej płaszczyźnie przechodzącej przez środek ciężkości Ziemi, który znajduje się w jednym z jej ognisk.
2. Promień wodzący satelity (odcinek łączący satelitę ze środkiem ciężkości Ziemi) w jednakowych odstępach czasu zakreśla jednakowe pola.
3. Stosunek kwadratów okresów obiegów satelitów jest równy stosunkowi sześciątów ich średnich odległości od środka ciężkości Ziemi, tzn. sześciątów wielkich półosi ich orbit.

Wielkość małej półosi orbity nie ma więc żadnego wpływu na okres obiegu satelity. Poza tym prędkość chwilowa satelity w apogeum jest tyle razy mniejsza od prędkości w perygeum, ile razy odległość apogeum jest większa od odległości perygeum. Oczywiście szczególnym przypadkiem orbity eliptycznej jest orbita kołowa.

Na rys. 1 pokazano przykłady różnych orbit. Orbita geostacjonarna jest szczególnie atrakcyjna dla satelitów geostacjonarnych. Satelita umieszczony na orbicie geostacjonarnej znajduje się dokładnie nad równikiem w odległości 35 803 km od Ziemi. Czas obiegu satelity po takiej orbicie wokół Ziemi jest identyczny z czasem obrotu Ziemi wokół swojej osi. Powoduje to, że satelita jest postrzegany jako nieruchomy punkt zawieszony w określonym miejscu nad Ziemią. Natomiast w systemach niskoorbitowych LEO tylko w czasie ok. 1 godziny satelity przemierzają niebo od horyzontu do horyzontu, a więc nie „wiszą” nieruchomo nad Ziemią. Jeśli łączność ma być zapewniona, użytkownik stale musi widzieć satelitę. Tłumaczy to, dlaczego systemy LEO, w celu zapewnienia łączności, muszą korzystać z tak wielu satelitów (ok. 60), gdyż każdy z satelitów „widzi” tylko niewielką powierzchnię. Orbity niskoorbitowych sztucznych satelitów Ziemi są nachylone do płaszczyzny równika.



Rys. 1. Orbity sztucznych satelitów Ziemi

Czas obiegu orbity  $T$  wyraża zależność:

$$T = 2\pi \frac{R+h}{v}, \quad (22)$$

gdzie:  $R$  – promień Ziemi (6 371 km),  
 $h$  – wysokość orbity nad Ziemią,  
 $v$  – prędkość satelity.

Siła odśrodkowa  $F_o$  wynosi:

$$F_o = \frac{mv^2}{R+h}, \quad (23)$$

gdzie:  $m$  – masa satelity.

Siłę grawitacji  $F_g$  można przedstawić następująco:

$$F_g = mg \left( \frac{R}{R+h} \right)^2, \quad (24)$$

gdzie:  $g$  – przyspieszenie ziemskie ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Ponieważ  $F_o = F_g$ , zatem

$$mg \left( \frac{R}{R+h} \right)^2 = \frac{mv^2}{R+h}, \quad (25)$$

stąd:

$$v = \sqrt{\frac{gR}{R+h}}. \quad (26)$$

Dlatego:

$$h = 5\,075 T^{\frac{2}{3}} - 5\,371, \quad (27)$$

gdzie:  $h$  – wysokość orbity [km];

$T$  – czas obiegu satelity wokół Ziemi [h].

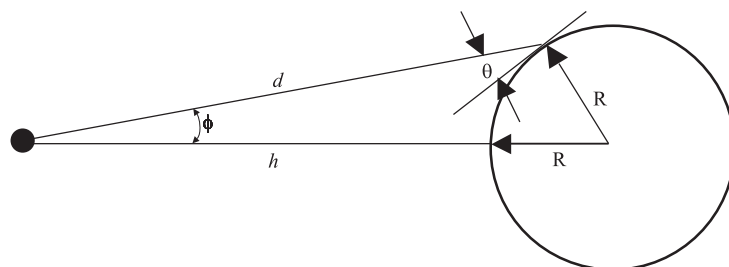
Jeżeli czas obiegu satelity  $T$  wokół Ziemi jest równy okresowi obrotu Ziemi, wówczas jest to orbita geostacjonarna, a satelita jest postrzegany jako stacjonarny. Wysokość orbity geostacjonarnej wynosi 35 803 km. Inne satelity mają wysokość orbity od 500 km do 35 803 km.

### ***Długość trasy satelitarnej***

Długość trasy satelitarnej  $d$  z satelity do punktu naziemnego można wyznaczyć z równania (rys. 2):

$$(R+h)^2 = R^2 + d^2 - 2Rd \cos(90 + \theta), \quad (28)$$

gdzie:  $\theta$  – kąt elewacji satelity powyżej horyzontu.



**Rys. 2.** Długość trasy satelitarnej



Z równania (28) otrzymuje się:

$$d = \sqrt{(R+h)^2 - (R \cos \theta)^2} - R \sin \theta. \quad (29)$$

Minimalna długość trasy jest równa  $d = h$ , gdy  $\theta = 90^\circ$ . Natomiast maksymalna długość trasy jest wtedy, gdy  $\theta = 0$  i wynosi:  $d = \sqrt{(R+h)^2 - R^2}$ .

### Parametry wiązki antenowej satelity

**Szerokość wiązki.** Szerokość wiązki satelity  $2\phi$  [rad] (rys. 3) wyraża zależność:

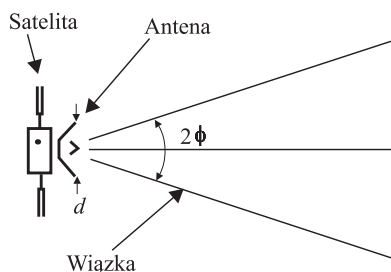
$$2\phi = \frac{\lambda}{d}, \quad (30)$$

gdzie:  $d$  – średnica anteny,

$\lambda$  – długość fali:  $\lambda = \frac{c}{f}$ ,

$c$  – prędkość rozchodzenia się światła ( $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ),

$f$  – częstotliwość.



Rys. 3. Wiązka antenowa satelity

**Obszar widoczności.** Dla satelitów niskoorbitowych (rys. 4) obszar widoczności wyraża zależność:

$$\frac{r}{h} = \text{tg } \phi, \quad (31)$$

gdzie:  $h$  – wysokość zawieszenia satelity,

$r$  – promień obszaru widoczności,

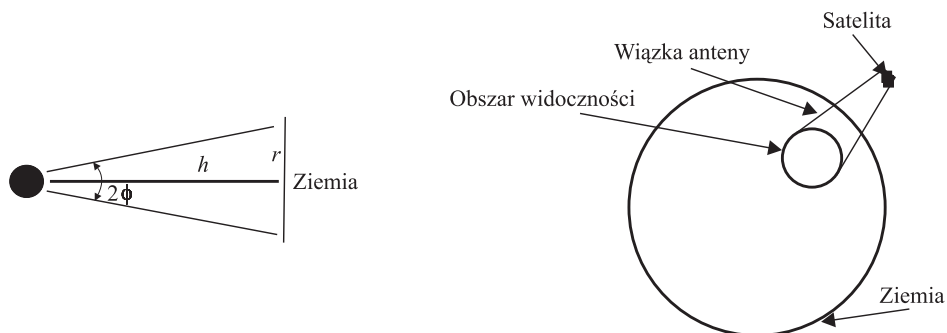
$2\phi$  – szerokość wiązki antenowej satelity [rad].

Dla satelitów niskoorbitowych ten parametr należy powiązać z czasem widoczności satelity. Okres obiegu satelity umieszczonego na niskiej orbicie wynosi od 90 do 120 minut, dlatego pojedynczy satelita znajduje się w obszarze widoczności stacji naziemnej przez około 20 minut.

Dla satelitów geostacjonarnych obszar (rys. 2) widoczności wyraża się za pomocą następującej zależności:

$$\frac{R}{h} = \text{tg } \phi, \quad (32)$$

gdzie:  $R$  – promień Ziemi (6 371 km).



Rys. 4. Obszar widoczności dla satelitów niskoorbitowych

## Tłumienie propagacyjne

Straty na trasie Ziemia–satelita i satelita–Ziemia są sumą różnych czynników:

- tłumienia wskutek absorpcji w gazach atmosferycznych,
- tłumienia wskutek absorpcji i rozpraszania przez hydrometeory (krople wody i kryształki lodu w opadach i chmurach),
- rozbieżności wiązki promieniowanej energii,
- szybkich zaników (scyntyłacje i wielodrogowość),
- zjawiska szumu emitowanego przez ośrodki absorbujące,
- depolaryzacji fali przez hydrometeory,
- tłumienia przez burze piaskowe.

Każdy z tych czynników jest funkcją częstotliwości, miejsca geograficznego i kąta elewacji. Dla częstotliwości powyżej 18 GHz, już nawet gaz może być przyczyną kilkunastodecybelowego tłumienia, a stan zachmurzenia w istotny sposób wpływa na propagację fal powyżej 30 GHz. W niektórych strefach klimatycznych śnieg i lód zgromadzony na powierzchni anteny mogą być przyczyną znacznego tłumienia spowodowanego zmianą kierunku promieniowania, co może mieć decydujący wpływ na rozkłady sezonowe czy roczne tłumień. W przypadku tych czynników często nie są to tłumienia na trasie satelita–Ziemia, lecz zmiana kierunku promieniowania.

### *Skład i budowa troposfery*

Na propagację fal radiowych duży wpływ ma troposfera. Jest to dolna warstwa atmosfery zalegająca bezpośrednio nad powierzchnią Ziemi, rozciągająca się do wysokości  $8 \div 10$  km w strefach podbiegunowych,  $10 \div 12$  km w szerokościach umiarkowanych oraz  $16 \div 18$  km w okolicach równikowych. Troposfera jest środowiskiem niejednorodnym o zmiennych w czasie właściwościach. Wpływa na to zawartość pary wodnej, która zależy od warunków meteorologicznych. Utrzymująca się w troposferze

para wodna powstaje wskutek parowania powierzchni oceanów, mórz i innych zbiorników wodnych pod wpływem promieniowania słonecznego. Ze wzrostem wysokości zawartość pary wodnej w atmosferze maleje. Tak na przykład na wysokości 1,5 km ilość pary wodnej w powietrzu jest prawie dwa razy mniejsza, a w górnej granicy troposfery kilkaset razy mniejsza niż w pobliżu powierzchni Ziemi.

Przeciętny pionowy gradient temperatury wynosi  $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Górna granica troposfery została ustalona w miejscu, w którym dalszy spadek temperatury powietrza ulega zatrzymaniu. Średnia roczna temperatura powietrza w górnej granicy troposfery wynosi w strefach podbiegunowych  $-55^{\circ}\text{C}$ , a w okolicach równikowych  $-80^{\circ}\text{C}$ . Stopniowy spadek temperatury powietrza wraz ze wzrostem wysokości spowodowany jest tym, że promienie słoneczne przenikające troposferę nie nagrzewają jej. Niemalże cały strumień energii słonecznej jest pochłaniany przez powierzchnię Ziemi i dopiero nagrzana powierzchnia Ziemi jest źródłem promieniowania cieplnego ogrzewającego troposferę. Ważną rolę odgrywa tu konwekcja.

Przylegające do powierzchni Ziemi masy powietrza nagrzewają się i unoszą w górę, ich miejsce zajmuje zimne powietrze itd. W ten sposób atmosfera jest nagrzewana od dołu, powstające zaś – z powodu nierównomierności nagrzewania Ziemi – prądy wstępujące i zstępujące wywołują zawirowania w atmosferze i przemieszczenie się mas powietrza, znajdujących się na różnych wysokościach.

Troposfera, mimo niewielkiej wysokości, zawiera ponad 4/5 masy powietrza. Na powierzchni Ziemi średnie ciśnienie atmosferyczne wynosi 1 014 hPa, na wysokości 5 km zmniejsza się prawie dwukrotnie, a na wysokości 11 km spada do 225 hPa. Na wysokości 17 km (górna granica troposfery w okolicy równikowej) ciśnienie atmosferyczne wynosi zaledwie 90 hPa.

### ***Absorpcja w gazach atmosferycznych***

Oslabienie sygnału w torze radiowym może być rezultatem absorpcji energii w cząsteczkach gazów, będących składnikami atmosfery. Pole fali w troposferze oddziałuje bezpośrednio z molekułami gazów, powodując ich wzbudzenie. To zjawisko, noszące nazwę absorpcji molekularnej, zachodzi głównie w tlenie i w parze wodnej. Tłumienie z nim związane rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości i wykazuje pewne maksima, dlatego też niektóre zakresy częstotliwości nie będą wykorzystywane w łączności satelitarnej. Tłumienie powodowane absorpcją zależy głównie od częstotliwości, kąta elewacji, położenia geograficznego oraz gęstości pary wodnej. Dla częstotliwości poniżej 10 GHz zagadnienie to nie jest istotne. Odgrywa ono natomiast dość dużą rolę dla częstotliwości większych od 18 GHz, szczególnie przy małych kątach elewacji.

### ***Obliczanie tłumienia w gazach***

Poniżej opisana metoda jest stosowana do obliczania współczynnika tłumienia fali elektromagnetycznej w suchym powietrzu oraz w parze wodnej, od poziomu morza do wysokości 5 km, dla zakresu częstotliwości do 350 GHz.

Danymi wyjściowymi do obliczenia tłumienia w gazach atmosferycznych są mediany (miesięczne lub roczne) wartości pary wodnej  $\rho$  z sezonowej mapy absolutnej wilgotności powietrza, wyrażane w postaci izolinii [ $\text{g}/\text{m}^3$ ], podawane przez ITU lub przez krajowe serwisy meteorologiczne. Jednak koncentracja pary wodnej zmienia się w profilu pionowym, a tym samym obliczenie statystycznego tłumienia w gazach jest dość złożone.

**Krok 1.** Oblicza się współczynnik tłumienia dla suchego powietrza  $\gamma_0$  i dla zawartości pary wodnej  $\gamma_w$  dla danej częstotliwości  $f$  dla każdego z przyjętych podzakresów częstotliwości [14]:

- dla  $f \leq 54$  GHz:

$$\gamma_o = \left[ \frac{7,34 r_p^2 r_t^3}{f^2 + 0,36 r_p^2 r_t^2} + \frac{0,3429 b \gamma'_o(54)}{(54-f)^a + b} \right] f^2 \cdot 10^{-3}, \quad (33)$$

- dla  $54 \text{ GHz} < f < 66 \text{ GHz}$ :

$$\gamma_o = \exp \left\{ \left[ 54^{-N} \ln(\gamma_o(54))(f-57)(f-60)(f-63)(f-66)/1944 + \right. \right. \\ \left. -57^{-N} \ln(\gamma_o(57))(f-54)(f-60)(f-63)(f-66)/486 + \right. \\ \left. +60^{-N} \ln(\gamma_o(60))(f-54)(f-57)(f-63)(f-66)/324 + \right. \\ \left. -63^{-N} \ln(\gamma_o(63))(f-54)(f-57)(f-60)(f-66)/486 + \right. \\ \left. +66^{-N} \ln(\gamma_o(66))(f-54)(f-57)(f-60)(f-63)/1944 \right] f^N \}, \quad (34)$$

- dla  $66 \text{ GHz} \leq f < 120 \text{ GHz}$ :

$$\gamma_o = \left[ \frac{0,2296 d \gamma'_o(66)}{(f-66)^c + d} + \frac{0,286 r_p^2 r_t^{3,8}}{(f-118,75)^2 + 2,97 r_p^2 r_t^{1,6}} \right] f^2 \cdot 10^{-3}, \quad (35)$$

- dla  $120 \text{ GHz} \leq f \leq 350 \text{ GHz}$ :

$$\gamma_o = \left[ 3,02 \cdot 10^{-4} r_p^2 r_t^{3,5} + \frac{1,5827 r_p^2 r_t^3}{(f-66)^2} + \frac{0,286 r_p^2 r_t^{3,8}}{(f-118,75)^2 + 2,97 r_p^2 r_t^{1,6}} \right] f^2 \cdot 10^{-3}, \quad (36)$$

przy czym:

$$\gamma'_o(54) = 2,128 r_p^{1,4954} r_t^{-1,6032} \exp[-2,5280(1-r_t)], \quad (37)$$

$$\gamma_o(54) = 2,136 r_p^{1,4975} r_t^{-1,5852} \exp[-2,5196(1-r_t)], \quad (38)$$

$$\gamma_o(57) = 9,984 r_p^{0,9313} r_t^{2,6732} \exp[0,8563(1-r_t)], \quad (39)$$

$$\gamma_o(60) = 15,42 r_p^{0,8595} r_t^{3,6178} \exp[1,1521(1-r_t)], \quad (40)$$

$$\gamma_o(63) = 10,63 r_p^{0,9298} r_t^{2,3284} \exp[0,6287(1-r_t)], \quad (41)$$

$$\gamma_o(66) = 1,944 r_p^{1,6673} r_t^{-3,3583} \exp[-4,1612(1-r_t)], \quad (42)$$

$$\gamma'_o(66) = 1,935 r_p^{1,6657} r_t^{-3,3714} \exp[-4,1643(1-r_t)], \quad (43)$$

$$a = \ln(\eta_2 / \eta_1) / \ln 3,5, \quad (44)$$

$$b = 4^a / \eta_1, \quad (45)$$

$$\eta_1 = 6,7665 r_p^{-0,5050} r_t^{0,5106} \exp[1,5663(1-r_t)] - 1, \quad (46)$$

$$\eta_2 = 27,8843 r_p^{-0,4908} r_t^{0,8491} \exp[0,5496(1-r_t)] - 1, \quad (47)$$

$$c = \ln(\xi_2 / \xi_1) / \ln 3,5, \quad (48)$$

$$d = 4^c / \xi_1, \quad (49)$$

$$\xi_1 = 6,9575 r_p^{-0,3461} r_t^{0,2535} \exp[1,3766(1-r_t)] - 1, \quad (50)$$

$$\xi_2 = 42,1309 r_p^{-0,3068} r_t^{1,2023} \exp[2,5147(1-r_t)] - 1, \quad (51)$$

$$N = 0 \text{ dla } f \leq 60 \text{ GHz} \quad N = -15 \text{ dla } f > 60 \text{ GHz} \quad (52)$$

gdzie:  $f$  – częstotliwość [GHz],  
 $r_p = p/1013$ ,  
 $r_t = 288/(273+t)$ ;  
 $p$  – ciśnienie [hPa],  
 $t$  – temperatura [°C], wartość średnią temperatury można znaleźć w krajowych serwisach meteorologicznych lub – jeśli tam jej nie zamieszczono – można skorzystać z danych ITU-R [23].

Dla pary wodnej tłumienie jednostkowe  $\gamma_w$  [dB/km] jest dane dla  $f \leq 350$  GHz:

$$\gamma_w = \left\{ 3,13 \cdot 10^{-2} r_p r_t^2 + 1,76 \cdot 10^{-3} \rho r_t^{8,5} + r_t^{2,5} \left[ \frac{3,84 \xi_{w1} g_{22} \exp(2,23(1-r_t))}{(f-22,235)^2 + 9,42 \xi_{w1}^2} + \frac{10,48 \xi_{w2} \exp(0,7(1-r_t))}{(f-183,31)^2 + 9,48 \xi_{w2}^2} + \frac{0,078 \xi_{w3} \exp(6,4385(1-r_t))}{(f-321,226)^2 + 6,29 \xi_{w3}^2} + \frac{3,76 \xi_{w4} \exp(1,6(1-r_t))}{(f-325,153)^2 + 9,22 \xi_{w4}^2} + \frac{26,36 \xi_{w5} \exp(1,09(1-r_t))}{(f-380)^2} + \frac{17,87 \xi_{w5} \exp(1,46(1-r_t))}{(f-448)^2} + \frac{883,7 \xi_{w5} g_{557} \exp(0,17(1-r_t))}{(f-557)^2} + \frac{302,6 \xi_{w5} g_{752} \exp(0,41(1-r_t))}{(f-752)^2} \right] \right\} f^2 \rho \cdot 10^{-4}, \quad (53)$$

przy czym:

$$\xi_{w1} = 0,9544 r_p r_t^{0,69} + 0,0061 \rho, \quad (54)$$

$$\xi_{w2} = 0,95 r_p r_t^{0,64} + 0,0067 \rho, \quad (55)$$

$$\xi_{w3} = 0,9561 r_p r_t^{0,67} + 0,0059 \rho, \quad (56)$$

$$\xi_{w4} = 0,9543 r_p r_t^{0,68} + 0,0061 \rho, \quad (57)$$

$$\xi_{w5} = 0,955 r_p r_t^{0,68} + 0,006 \rho, \quad (58)$$

$$g_{22} = 1 + (f - 22,235)^2 / (f + 22,235)^2, \quad (59)$$

$$g_{557} = 1 + (f - 557)^2 / (f + 557)^2, \quad (60)$$

$$g_{752} = 1 + (f - 752)^2 / (f + 752)^2, \quad (61)$$

gdzie:  $\rho$  – koncentracja pary wodnej [g/m<sup>3</sup>].

Współczynnik tłumienia gazów atmosferycznych, dB/km, w zależności od częstotliwości sygnału (1 GHz ÷ 350 GHz) jest podawany w postaci uniwersalnej dla pionowej trasy propagacji i standardowej atmosfery o zawartości 7,5 g/m<sup>3</sup> pary wodnej przy ziemi [14].

**Krok 2.** Wykorzystując prosty algorytm, oblicza się tłumienie w gazach wzdłuż tras nachylonych przez atmosferę ziemską, przez określenie ekwiwalentnej wysokości, która pomnożona przez współczynnik tłumienia wyliczony w kroku 1 stanowi wartość tłumienia zenitalnego. Można zatem obliczyć:

a) ekwiwalentną wysokość  $h_o$  [km] dla suchego powietrza

– dla  $1 \text{ GHz} \leq f \leq 56,7 \text{ GHz}$ :

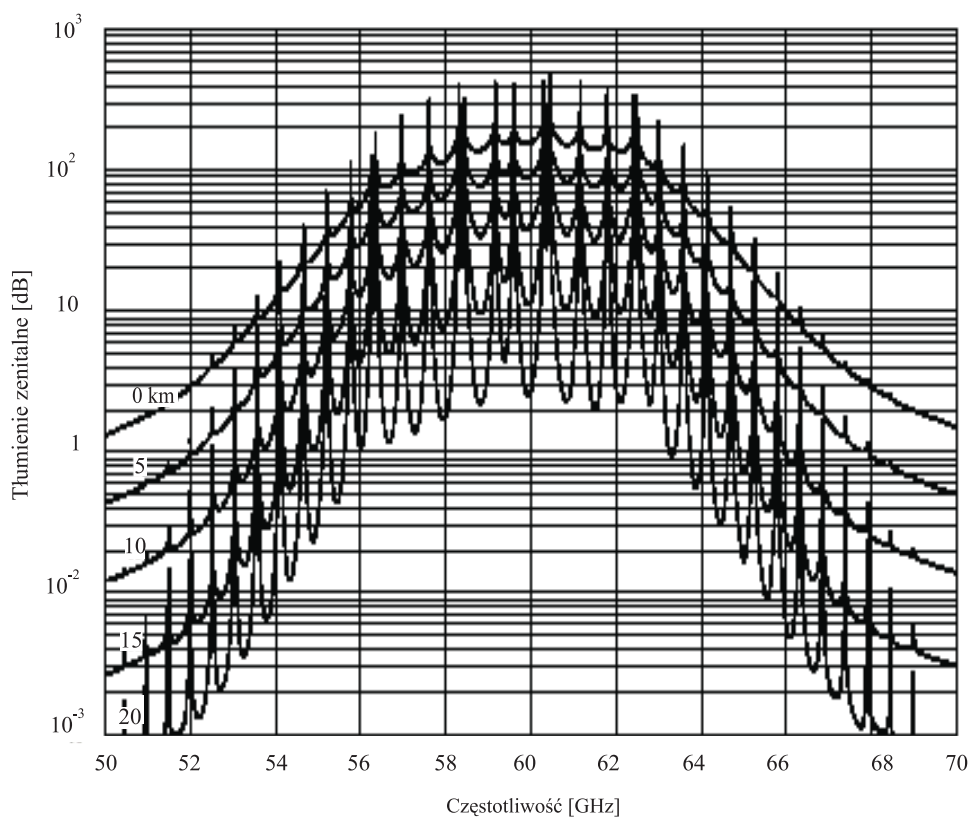
$$h_o = 5,386 - 3,32734 \cdot 10^{-2} f + 1,87185 \cdot 10^{-3} f^2 - 3,52087 \cdot 10^{-5} f^3 + \frac{83,26}{(f-60)^2 + 1,2}, \quad (62)$$

– dla  $56,7 \text{ GHz} < f < 63,3 \text{ GHz}$ :

$$h_o = 10 \text{ km}, \quad (63)$$

– dla  $63,3 \text{ GHz} \leq f < 98,5 \text{ GHz}$ :

$$h_o = f \left\{ \frac{0,039581 - 1,19751 \cdot 10^{-3} f + 9,14810 \cdot 10^{-6} f^2}{1 - 0,028687 f + 2,07858 \cdot 10^{-4} f^2} \right\} + \frac{90,6}{(f-60)^2}, \quad (64)$$



Rys. 5. Zenitalne tłumienie w tlenie [14]

– dla  $98,5 \text{ GHz} \leq f \leq 350 \text{ GHz}$ :

$$h_o = 5,542 - 1,76414 \cdot 10^{-3}f + 3,05354 \cdot 10^{-6}f^2 + \frac{6,815}{(f - 118,75)^2 + 0,321} ; \quad (65)$$

b) ekwiwalentną wysokość  $h_w$  [km] dla danej koncentracji pary wodnej dla  $f \leq 350 \text{ GHz}$ :

$$h_w = 1,65 \left\{ 1 + \frac{1,61}{(f - 22,23)^2 + 2,91} + \frac{3,33}{(f - 183,3)^2 + 4,58} + \frac{1,90}{(f - 325,1)^2 + 3,34} \right\}. \quad (66)$$

Zenitalne tłumienie w tlenie w zakresie częstotliwości  $50 \div 70 \text{ GHz}$  jest dość złożoną funkcją częstotliwości (rys. 5), a zaprezentowany algorytm ekwiwalentnej wysokości umożliwia tylko przybliżone oszacowanie wartości.

Pojęcie ekwiwalentnej wysokości opiera się na założeniu wykładniczego rozkładu gęstości atmosfery w funkcji wysokości. Jednak należy podkreślić, że skala wysokości dla obu wielkości, tj. suchego powietrza i pary wodnej, może zmieniać się w zależności od wysokości, sezonu lub klimatu. Rozkład pary wodnej w rzeczywistej atmosferze może różnić się od wykładniczego. Tak więc podane zależności (62) ÷ (66) można stosować do wysokości 2 km.

**Krok 3.** Oblicza się całkowite zenitalne tłumienie  $A$  przez gazy atmosferyczne:

$$A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w. \quad (67)$$

Na rys. 6 pokazano całkowite zenitalne tłumienie na poziomie morza, będące tłumieniem wywołanym przez suche powietrze i parę wodną, dla średniej rocznej globalnej atmosfery odniesienia podanej w zaleceniu ITU-R [15]. Dla zakresu częstotliwości  $50 \div 70 \text{ GHz}$  lepszą dokładność uzyskuje się, wykorzystując krzywą 0 km z rys. 5.

**Krok 4.** Oblicza się tłumienie trasy Ziemia–satelita. Dla kąta elewacji  $\theta$ , zawartego od  $5^\circ$  do  $90^\circ$ , tłumienie  $A$  [dB] oblicza się z zależności:

$$A = \frac{A_o + A_w}{\sin \theta}, \quad (68)$$

gdzie:

$$A_o = h_o \gamma_o \quad \text{i} \quad A_w = h_w g_w. \quad (69)$$

Dla danej trasy tłumienie  $A(p)$  [dB] wywołane całkowitą zawartością pary wodnej wynosi:

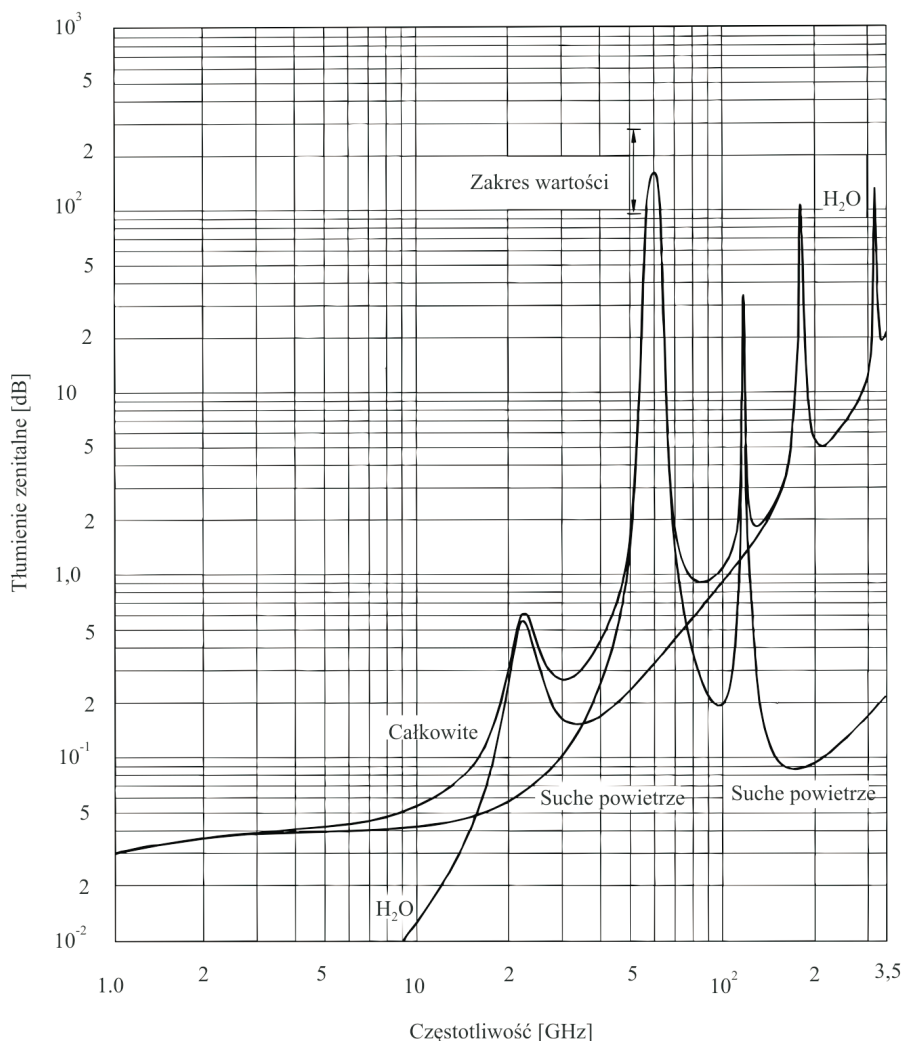
$$A(p) = \frac{A_o + A_w(p)}{\sin \theta}. \quad (70)$$

Opisana metoda obliczania tłumienia na trasach nachylonych opiera się na znajomości profilu gęstości pary wodnej (lub ciśnienia) wzdłuż trasy. Całkowite tłumienie fal elektromagnetycznych przez parę wodną w kierunku zenitalnym oblicza się następująco:

$$A_w(p) = \frac{V_t(p) \cdot \gamma_w(p)}{\rho}, \quad (71)$$

gdzie:  $V_t(f)$  – całkowita zawartość pary wodnej dla wymaganego procentu czasu  $p$  ( $[\text{kg}/\text{m}^2]$  lub  $[\text{mm}]$ );  
 $\rho$  – średnioroczna gęstość pary wodnej  $[\text{g}/\text{m}^3]$ ;  
 $\gamma_w$  – tłumienie jednostkowe  $[\text{dB}/\text{km}]$ , wyliczone z zależności (53).

Wartości całkowitej zawartości pary wodnej  $V_t(p)$  można otrzymać, przeprowadzając pomiary radiometryczne. Natomiast dane statystyczne  $V_t(p)$  i  $\rho$  można znaleźć w zaleceniu ITU-R [16]. Dla kątów elewacji innych niż kierunek zenitalny wartość tłumienia musi być podzielona przez sinus kąta elewacji.



Rys. 6. Całkowite zenitalne tłumienie wywołane suchym powietrzem i parą wodną [14]

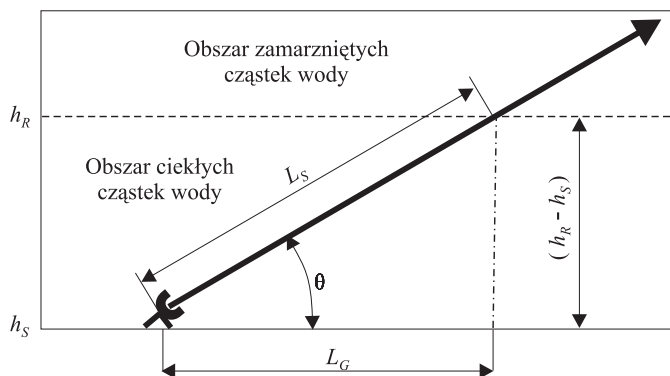


## Tłumienie spowodowane opadami atmosferycznymi i chmurami

### Opady atmosferyczne

Wpływ opadów atmosferycznych (tzn. deszczu, śniegu, gradu lub mgły) objawia się zwiększonym tłumieniem toru radiowego, głównie wskutek rozpraszania energii. Opady wprowadzają ponadto zniekształcenia polaryzacji fali, powodując powstanie tzw. przesłuchów polaryzacyjnych w przypadku wykorzystania polaryzacji ortogonalnej. Wymienione efekty zależą od rodzaju i intensywności opadów oraz stosunku rozmiaru kropli wody lub drobin lodu do długości fali.

Określony rodzaj opadów atmosferycznych (np. deszcz, grad lub śnieg) powstaje w wyniku skomplikowanych procesów fizycznych w chmurach. Temperatura w chmurze zmienia się w kierunku pionowym. Wysokość, na której występuje temperatura  $0^{\circ}\text{C}$ , nazywa się poziomem zamarzania (rys. 7). Powyżej poziomu zamarzania temperatura jest niższa od  $0^{\circ}\text{C}$ , natomiast poniżej – wyższa od  $0^{\circ}\text{C}$ .



Rys. 7. Wielkości do wyznaczenia tłumienia łącza Ziemia-satelita

$L_G$  – horyzontalna długość drogi,  $L_S$  – długość drogi, na której występuje deszcz,  $h_S$  – wysokość lokalizacji stacji naziemnej nad poziomem morza,  $h_R$  – wysokość poziomu zamarzania,  $\theta$  – kąt elewacji

W chmurach powyżej poziomu zamarzania przechłodzone krople wody występują zazwyczaj w zakresie temperatur od  $0^{\circ}\text{C}$  do  $-13^{\circ}\text{C}$ , chociaż w wyjątkowych przypadkach temperatura ta może osiągnąć  $-50^{\circ}\text{C}$ .

Tworzenie się kropli deszczu czy kryształków lodu zależy od różnych czynników, np. pionowych ruchów powietrza, rozkładu temperatury i związanego z tym ruchu istnienia kropli lub kryształków wewnątrz chmury. Jeżeli krople wody (czy kryształki lodu) na swej drodze w dół przechodzą przez warstwy, gdzie temperatura zmienia się na dodatnią i pozostaje dodatnią, to spadają na ziemię jako deszcz. Podczas drogi w dół – w zależności od warunków – mogą się one powiększać, a więc spadać szybciej, zależy to jeszcze od struktury wiatrów.

Krople o średnicy od 5 mm do 6 mm przy prędkości 9 m/s rozpadają się na mniejsze, które – jak wspomniano – mogą rosnąć na swej drodze opadania w dół. W wyniku tego procesu graniczna średnica kropli może wynosić od 5 do 6 mm.

Deszcz charakteryzują następujące czynniki fizyczne:

- intensywność [mm/h],
- rozkład wielkości kropli,
- rozkład prędkości spadania,
- temperatura kropli wody.

### **Rozpraszanie i tłumienie fal elektromagnetycznych przez elementy opadów atmosferycznych**

Wysokość słupa wody  $I$ , który tworzy się podczas trwania opadu o natężeniu  $R$  w czasie  $t$ , określa wzór [3]:

$$I(t) = \int_0^t R(t) dt. \quad (72)$$

Przebieg  $I(t)$  mierzą i rejestrują przyrządy meteorologiczne.

Interesujące jest jednak natężenie opadu, a ściślej jego rozkład w przestrzeni i w czasie, gdyż wielkość ta oddziałuje na fale elektromagnetyczne. Temu samemu natężeniu opadu  $R$  mogą odpowiadać różne jego koncentracje, różne rozkłady średnie w opadzie, powodując, że przy tym samym natężeniu opadu zarówno efekty tłumienia, jak i rozproszenia mogą się różnić.

Powierzchnię skuteczną  $\delta_R$  prostopadłego odbicia fali od sferycznego elementu opadu o średnicy  $D$  określa wzór Rayleigha dla  $D \ll \lambda$  [3]:

$$\delta_R = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right| \cdot 10^{-4}, \quad (73)$$

gdzie:  $\epsilon$  – stała dielektryczna.

Z kolei powierzchnię skuteczną  $\eta$  jednostki objętości wypełnionej elementami opadu w liczbie  $N$  przedstawia wzór:

$$\eta = \sum_1^n \delta_{Ri} = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \sum_{i=1}^N D_i^6, \quad (74)$$

ważny przy założeniu, że odległości między kroplami są większe od  $\lambda$  i wielokrotne odbicia fali mogą być pominięte, gdyż tłumienie fali w opadzie wynika z rozproszenia i pochłaniania energii fali przez krople.

Całkowita powierzchnia skuteczna tłumienia kropli wynosi:

$$\delta_t = \delta_p + \delta_r, \quad (75)$$

gdzie:  $\delta_p$  i  $\delta_r$  – odpowiednie powierzchnie skuteczne, wynikające z pochłaniania i rozpraszania,

przy czym:

$$\delta_r = \frac{2}{3} \delta_R, \quad (76)$$

zaś:

$$\delta_p = \frac{8\pi D^3}{\lambda} R \left( -\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \cdot 10^{-4}, \quad (77)$$

gdzie:  $n$  – współczynnik załamania fali.

Tłumienie jednostkowe  $\gamma_R$  fali:

$$\gamma_R = 10 \lg \frac{P_{str}}{P_{we}} = 4,343 \cdot 10^5 \sum N_i \delta_{ii}, \quad (78)$$

gdzie:  $P_{str}$  – moc strat w obszarze z opadem,

$P_{we}$  – moc na wejściu tego obszaru,

$N_i$  – liczba kropeł o powierzchni skutecznej  $\delta_{ii}$  w 1 m<sup>3</sup> objętości.

Tłumienie jednostkowe  $\gamma_R$  w zależności od natężenia opadu  $R$ , przy założeniu typowego rozkładu średnic kropeł, określa wzór (83).

### Wykorzystanie charakterystyk statystycznych deszczów do obliczenia tłumienia łącza

Charakterystyki statystyczne tłumień spowodowanych opadem deszczu dla danej lokalizacji i dla częstotliwości do 55 GHz wykonuje się w sposób opisany w krokach 1 ÷ 10.

**Krok 1.** Oblicza się efektywną wysokość  $h_R$  [km], do której może wystąpić deszcz (rys. 7) dla danego punktu odbiorczego [20]:

$$h_R = h_o + 0,36 \text{ km}, \quad (79)$$

gdzie:  $h_o$  – położenie średniej izotermy 0°C nad poziomem morza [km].

Wysokość średniej izotermy 0°C nad poziomem można znaleźć w krajowym serwisie meteorologicznym lub – jeśli tam jej nie zamieszczono – można skorzystać z danych ITU-R [20].

**Krok 2.** Oblicza się dla  $\theta \geq 5^\circ$  długość drogi  $L_s$  [km], poniżej której występuje deszcz [12]:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta}, \quad (80)$$

gdzie:  $h_s$  – wysokość nad poziomem morza stacji naziemnej [km],

$\theta$  – kąt elewacji [°].

Dla  $\theta < 5^\circ$  wykorzystuje się następującą zależność [12]:

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left( \sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{1/2} + \sin \theta}, \quad (81)$$

gdzie:  $R_e$  – efektywny promień Ziemi (8 500 km); do obliczeń przyjęto taką wartość, chociaż w rzeczywistości efektywny promień Ziemi zależy od stanu atmosfery.

**Krok 3.** Oblicza się horyzontalną długość drogi  $L_G$  [km] z zależności:

$$L_G = L_s \cos \theta. \quad (82)$$

**Krok 4.** Określa się wartość intensywności deszczu  $R_{0,01}$  przekraczaną w 0,01% roku (średniominutową). Jeżeli nie ma bliższych danych dotyczących opadów dla danego miejsca geograficznego, należy

wykorzystać programy ITU-R (ESARAINxxx.TXT), które umożliwiają określenie charakterystyk statystycznych rozkładu intensywności opadów dla dowolnej lokalizacji na obszarze globu ziemskiego. Programy takie można otrzymać w biurze III Grupy Studiów Radiokomunikacyjnych ITU-R. Jednak według badań wykonanych w Instytucie Łączności, charakterystyki deszczów z obszarów Polski różnią się od charakterystyk podanych przez ITU-R [27]. Ponadto należy sięgnąć do innych danych, np. dla rejonu Warszawy prowadzono w IŁ wieloletnie dokładne pomiary intensywności opadu na potrzeby radiokomunikacji [25–27]. Powinny też być wykorzystane wyniki pomiarów wykonywanych przez ponad 30 lat, w ok. 60 stacjach synoptycznych na terenie Polski, a obecnie znajdujące się w archiwum Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (nie ma tam jednak 1-minutowych charakterystyk intensywności deszczu, są tylko 1-godzinowe). Dopiero najnowsze opracowanie [7], będące kontynuacją poprzednich prac, umożliwia wykorzystanie tej potężnej bazy danych IMGW na potrzeby radiokomunikacji, a w szczególności do projektowania tras satelitarnych i ziemskich pracujących w zakresach fal milimetrych.

**Krok 5.** Oblicza się tłumienie jednostkowe  $\gamma_r$  [dB/km], wykorzystując współczynniki regresji  $\alpha$  i  $k$  (tablica 1) oraz intensywność opadu  $R_{0,01}$ , określoną w kroku 4:

$$\gamma_r = k(R_{0,01})^\alpha, \quad (83)$$

gdzie:  $R_{0,01}$  – wartość intensywności deszczu przekraczaną w 0,01% roku,  
 $k_H, \alpha_H$  – współczynniki regresji dla polaryzacji poziomej ( $H$  – *horizontal*) – por. tabl. 1,  
 $k_V, \alpha_V$  – współczynniki regresji dla polaryzacji pionowej ( $V$  – *vertical*) – por. tabl. 1.

**Tabl. 1. Współczynniki regresji [19]**

Częstotliwość [GHz]	Polaryzacja pozioma		Polaryzacja pionowa	
	$k_H$	$\alpha_H$	$k_V$	$\alpha_V$
1	0,0000387	0,912	0,0000352	0,880
6	0,00175	1,308	0,00155	1,265
10	0,0101	1,276	0,00887	1,264
12	0,0188	1,217	0,0168	1,200
15	0,0367	1,154	0,0335	1,128
20	0,0751	1,099	0,0691	1,065
25	0,124	1,061	0,113	1,030
30	0,187	1,021	0,167	1,000
35	0,263	0,979	0,233	0,963
40	0,350	0,939	0,310	0,929
45	0,442	0,903	0,393	0,897
50	0,536	0,873	0,479	0,868
100	1,12	0,743	1,06	0,744
200	1,18	0,731	1,13	0,732
400	1,32	0,683	1,31	0,684

**Krok 6.** Oblicza się horyzontowy współczynnik redukcji  $r_{0,01}$  dla 0,01% czasu:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0,38 (1 - e^{-2L_G})}. \quad (84)$$

**Krok 7.** Oblicza się pionowy regulowany współczynnik  $v_{0,01}$  dla 0,01% czasu:

$$\zeta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{h_R - h_s}{L_G r_{0,01}} \right) \quad (85)$$

dla  $\zeta > \theta$

$$L_R = \frac{L_G r_{0,01}}{\cos \theta}. \quad (86)$$

Ponadto:

$$L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta}, \quad (87)$$

jeżeli szerokość geograficzna usytuowania stacji  $\varphi$  [°] spełnia warunek:  $|\varphi| < 36^\circ$ , to

$$\chi = 36 - |\varphi|. \quad (88)$$

Poza tym:

$$\chi = 0, \quad (89)$$

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left( 31 (1 - e^{(\theta/(1+\chi))}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0,45 \right)}. \quad (90)$$

**Krok 8.** Oblicza się efektywną długość  $L_E$  [km] trasy:

$$L_E = L_R v_{0,01}. \quad (91)$$

**Krok 9.** Szacuje się tłumienie  $A_{0,01}$  [dB], które jest przekraczane z prawdopodobieństwem 0,01% roku z zależności:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_R. \quad (92)$$

**Krok 10.** Szacuje się tłumienie występujące w innym procencie roku  $A_p$  [dB], w zakresie od 0,001% do 5%, wykorzystując wartość tłumienia przekraczaną w 0,01% dla średniego roku.

Jeżeli  $p \geq 1\%$  lub  $|\varphi| \geq 36^\circ$ :  $\beta = 0$

Jeżeli  $p < 1\%$  lub  $|\varphi| < 36^\circ$  i  $\theta \geq 25^\circ$ :  $\beta = -0,005(|\varphi| - 36)$

W przeciwnym razie:  $\beta = -0,005(|\varphi| - 36) + 1,8 - 4,25 \sin \theta$

$$A_p = A_{0,01} \left( \frac{p}{0,01} \right)^{-\left(0,655 + 0,033 \ln(p) - 0,045 \ln(A_{0,01}) - \beta(1-p) \sin \theta\right)}. \quad (93)$$

Dzięki tej metodzie można oszacować długoterminowe charakterystyki statystyczne tłumień spowodowanych opadami deszczu. Porównując dane pomiarowe z oszacowanymi, można określić wieloletnią zmienność opadów.

### Skalowanie częstotliwościowe

Statystyczne rozkłady tłumień dla danej częstotliwości, polaryzacji oraz kąta elewacji mogą być użytecznym narzędziem do skalowania. Jeśli znany jest rozkład tłumienia fali  $A_1(f_1)$  wywołany opadami na częstotliwości  $f_1$ , to można określić rozkład tłumienia na częstotliwości  $f_2$  na tej samej trasie.

Dane pomiarowe dla jednej częstotliwości umożliwiają, z wykorzystaniem empirycznej zależności, przeskalowanie częstotliwościowe innej linii pracującej w zakresie od 7 GHz do 50 GHz [12]:

$$A_2 = A_1 (\varphi_2/\varphi_1)^{1-H(\varphi_1, \varphi_2, A_1)}, \quad (94)$$

gdzie współczynniki:

$$\varphi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2}, \quad (95)$$

$$H(\varphi_1, \varphi_2, A_1) = 1,12 \cdot 10^{-3} (\varphi_2/\varphi_1)^{0,5} (\varphi_1 A_1)^{0,55}, \quad (96)$$

gdzie:  $A_1$  i  $A_2$  – wartości tłumień spowodowanych opadami deszczu odpowiednio dla częstotliwości  $f_1$  i  $f_2$ .

### Tłumienie wywołane chmurami

Dla chmur czy 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.

Współczynnik tłumienia  $\gamma_c$  [dB/km] wywołanego chmurami lub mgłą określa zależność [21]:

$$\gamma_c = K_l \cdot M \quad (97)$$

gdzie:  $K_l$  – współczynnik tłumienia [(dB/km)/(g/m<sup>3</sup>)],  
 $M$  – zawartość wody w chmurze lub mgle [g/m<sup>3</sup>].

Przy częstotliwościach ok. 100 GHz i powyżej tłumienie spowodowane mgłą może być znaczne. Ilość pary wodnej zawartej w „przeciętnej” mgle wynosi 0,05 g/m<sup>3</sup> (widzialność ok. 300 m), a w gęstej mgle 0,5 g/m<sup>3</sup> (widzialność ok. 50 m).

Model matematyczny rozkładu Rayleigha, który wykorzystuje model podwójny-Debye stałej dielektrycznej  $\varepsilon(f)$  wody, może być wykorzystany do obliczenia współczynnika  $K_l$  dla częstotliwości do 1 000 GHz [21]:

$$K_l = \frac{0,819 f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} 10^{-6}, \quad (98)$$

gdzie:  $f$  – częstotliwość [GHz],

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}. \quad (99)$$

Zespoloną przenikalność dielektryczną wody można określić następującą zależnością [21]:

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_o - \varepsilon_1)}{f_p[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s[1 + (f/f_p)^2]}, \quad (100)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_o - \varepsilon_1}{f_p[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{f_s[1 + (f/f_p)^2]} + \varepsilon_2, \quad (101)$$

gdzie:

$$\varepsilon_0 = 77,6 + 103,3(\Psi - 1), \quad (102)$$

$$\varepsilon_1 = 5,48, \quad (103)$$

$$\varepsilon_2 = 3,51, \quad (104)$$

przy czym:

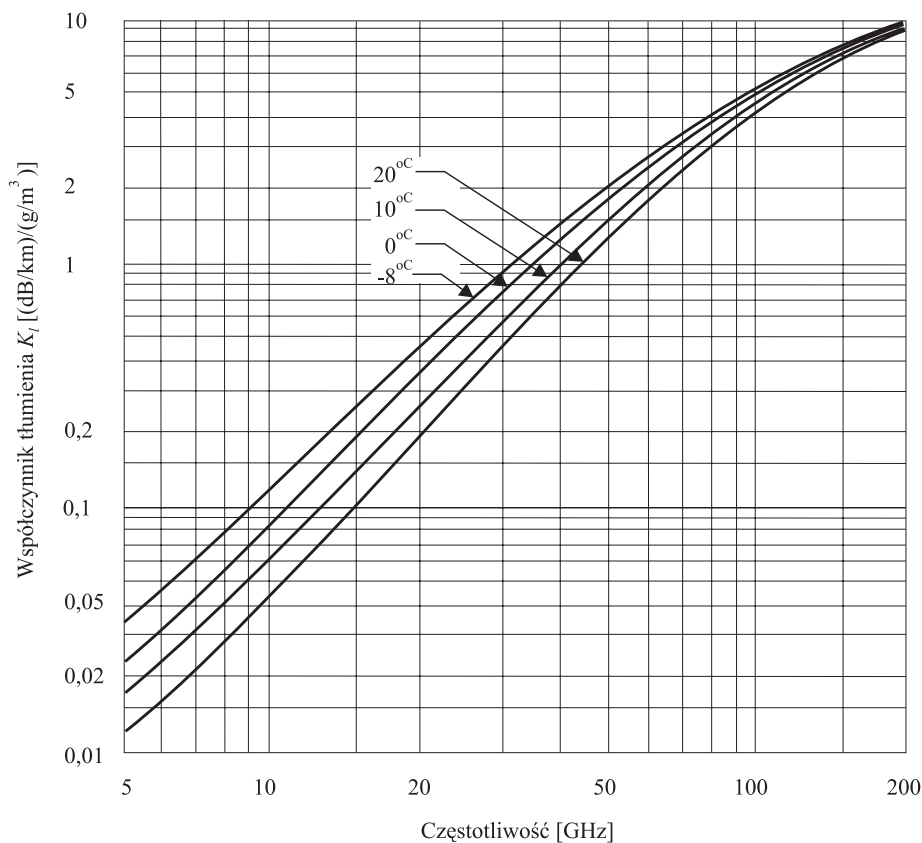
$$\Psi = \frac{300}{T} \quad (105)$$

$T$  – temperatura otoczenia [K].

Częstotliwości rezonansowe  $f_p$  [GHz] i  $f_s$  [GHz] dla tłumienia w parze wodnej wyrażają następujące zależności:

$$f_p = 20,9 - 142(\Psi - 1) + 294(\Psi - 1)^2, \quad (106)$$

$$f_s = 590 - 1500(\Psi - 1). \quad (107)$$



Rys. 8. Tłumienie przez krople wody [21]

Tłumienie przez krople wody  $K_l$  dla częstotliwości od 5 GHz do 200 GHz i temperatur od  $-8^\circ\text{C}$  do  $20^\circ\text{C}$  przedstawiono na rys. 8. Dla tłumienia wywołanego przez chmury powinna być użyta krzywa odpowiadająca  $0^\circ\text{C}$ .

Aby otrzymać tłumienie  $A$  wywołane chmurami dla danego progu prawdopodobieństwa, powinna być znana statystyczna całkowita zawartość wody  $W_l$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] w kolumnie deszczu dla danego położenia geograficznego i wówczas:

$$A = \frac{W_l K_l}{\sin \theta}, \quad (108)$$

gdzie:  $\theta$  – kąt elewacji,  
 $K_l$  – wartość odczytana z rys. 8.

Statystyczną zawartość wody w kolumnie otrzymuje się z pomiarów radiometrycznych. Jeśli nie ma tych danych, można wyliczyć tłumienie przyjmując  $W_l = 0,5 \text{ kg}/\text{m}^2$ , odpowiadające zawartości wody  $0,5 \text{ g}/\text{m}^3$  i grubości chmur 1 km.

### Całkowite tłumienie propagacyjne

Dla systemów pracujących powyżej 18 GHz, szczególnie z małymi kątami elewacji, tłumienie propagacyjne ma istotne znaczenie. Całkowite tłumienie propagacyjne jest wypadkową efektów propagacji w deszczu, gazach i chmurach, a jego wystąpienie  $A_T(p)$  z prawdopodobieństwem  $p$ , można obliczyć z zależności:

$$A_T(p) = A_G(p) + A_R(p) + A_C(p), \quad (109)$$

gdzie:  $A_G(p)$  – tłumienie wywołane suchym powietrzem i parą wodną (wzór 70) dla danego prawdopodobieństwa  $p$ ,

$$A_G(p) = A_G(1\%) \quad \text{dla } p < 1,0\%, \quad (110)$$

$A_R(p)$  – tłumienie wywołane deszczem (wzór 93) dla danego prawdopodobieństwa  $p$ ,  
 $A_C(p)$  – tłumienie wywołane chmurami (wzór 108) dla danego prawdopodobieństwa  $p$ ,

$$A_C(p) = A_C(1\%) \quad \text{dla } p < 1,0\%. \quad (111)$$

Równania (110) i (111) uwzględniają fakt, że duża część tłumienia w chmurach i gazach zawiera się już w tłumieniu wywołanym deszczem dla procentu czasu  $p \leq 1\%$ .

## Podsumowanie

Zamieszczone w niniejszym artykule zależności matematyczne umożliwiają precyzyjne projektowanie tras satelitarnych, pracujących w zakresie częstotliwości większych niż 18 GHz. Podstawową kwestią jest określenie bilansu energetycznego łącza. W tym celu należy:

- obliczyć parametry łącza satelitarnego w warunkach łączności bez wpływów zakłócających, czyli długość trasy i wynikające z niej tłumienie wolnej przestrzeni na trasie satelita–Ziemia, a także parametry wiązki antenowej satelity;
- określić tłumienie dodatkowe w łączu satelitarnym pojawiające się wskutek zjawisk propagacyjnych, a więc przede wszystkim deszczu, gazów dla danej wartości pary wodnej i chmur, pamiętając, że najbardziej krytyczny dla niezawodności łącza satelitarnego jest wpływ deszczu;



- wykorzystać dane pochodzące z pomiarów wykonywanych przez ponad 30 lat, w ok. 60 stacjach synoptycznych na terenie Polski, a obecnie znajdujące się w archiwum Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej; ponadto należy zapoznać się z wynikami wieloletnich pomiarów intensywności opadu prowadzonymi przez Instytut Łączności na potrzeby radiokomunikacji, umożliwiającymi precyzyjne projektowanie tras satelitarnych pracujących na terenie Polski;
- dokonać skalowania częstotliwościowego, tzn. mając statystyczne rozkłady tłumień dla łącza pracującego na danej częstotliwości określić rozkład tłumienia innego łącza pracującego na tej samej trasie, ale na innej częstotliwości.

W niniejszym artykule pominięto:

- efekty jonosferyczne [11], gdyż nie mają one wpływu na propagację fal elektromagnetycznych w rozważanym zakresie częstotliwości;
- zjawisko wielodrogowości, gdyż praktycznie nie występuje ono przy kątach elewacji z terenu Polski;
- zagadnienia interferencji między naziemną stacją satelitarną a stacjami linii horyzontowych [9], interferencjami z lub do stacji satelitowych [13];
- kwestie obszaru koordynacyjnego naziemnych stacji satelitarnych [22].

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

Przy projektowaniu 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 w posiadaniu Instytutu Łączności.

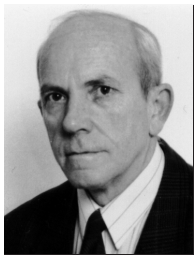
## Bibliografia

- [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.: *Dane propagacyjne w projektowaniu systemów satelitarnych*. Biuletyn Informacyjny Instytutu Łączności, nr 4–5, 1999
- [3] Bogucki J.: *Deszcz a propagacja mikrofal w troposferze*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 10, 1993, s. 489–492
- [4] Bogucki J.: *Satelita telekomunikacyjny – jego radiolatarnia, stabilność oraz propagacja*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 4, 1997, s. 227–230
- [5] Bogucki J.: *Satelity niskoorbitowe*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 12, 1998, s. 853–857
- [6] Bogucki J.: *Satelity telekomunikacyjne*. Elektronizacja, nr 1–2, 2002, s. 30–32
- [7] Bogucki J., Dusiński A., Wielowieyska E.: *Opracowanie regionalnych charakterystyk intensywności deszczu i projektowanie tras satelitarnych pracujących w zakresie częstotliwości większych niż 18 GHz*. Warszawa, Instytut Łączności, 2002

- [8] Elbert B. R.: *The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook*. London, Artech House, 2001
- [9] ITU-R, Rec. P.452-10: *Prediction procedure for the evaluation of microwave interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.7 GHz*. Geneva, 2001
- [10] ITU-R, Rec. P.453-8: *The radio refractive index: its formula and refractivity data*. Geneva, 2001
- [11] ITU-R, Rec. P.531-6: *Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems*. Geneva, 2001
- [12] ITU-R, Rec. P.618.7: *Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunications systems*. Geneva, 2001
- [13] ITU-R, Rec. P.619-1: *Propagation data required for the evaluation of interference between stations in space and those on the surface of the Earth*. Geneva, 1992
- [14] ITU-R, Rec. P.676-5: *Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1 ÷ 350 GHz*. Geneva, 2001
- [15] ITU-R, Rec. P.835-3: *Reference standard atmospheres*. Geneva, 1999
- [16] ITU-R, Rec. P.836-2: *Water vapour: surface density and total columnar content*. Geneva, 2001
- [17] ITU-R, Rec. P.837-1: *Characteristics of precipitation for propagation modelling*. Geneva, 1995
- [18] ITU-R, Rec. P.837-3: *Characteristics of precipitation for propagation modelling*. Geneva, 2001
- [19] ITU-R, Rec. P.838-1: *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*. Geneva, 1999
- [20] ITU-R, Rec. P.839-3: *Rain height model for prediction methods*. Geneva, 2001
- [21] ITU-R, Rec. P.840-3: *Attenuation due to clouds and fog*. Geneva, 1999
- [22] ITU-R, Rec. P.1412: *Propagation data for the evaluation of co-ordination between earth stations working in the bidirectionally allocated frequency bands*. Geneva, 1999
- [23] ITU-R, Rec. P.1510: *Annual mean surface temperature*. Geneva, 2001
- [24] Jurski J., Woźniak J.: Wyznaczanie tras w niskoorbitowych systemach satelitarnych – proponowane rozwiązania i możliwości ich zastosowania. *Elektronizacja*, nr 6, 2002, s. 29–33
- [25] Kawecki A.: *The correlation of rain rate with microwaves attenuation*. *Prace IŁ*, nr 108, 1997, s. 73–85
- [26] Kawecki A.: *Some aspects of attenuation due to rain prediction and rain rate correlation with attenuation*. *Prace IŁ*, nr 104, 1995, s. 67–93
- [27] Kawecki A.: *Wieloletnie charakterystyki intensywności deszczu w Miedzeszynie na potrzeby radiokomunikacji*. *Prace IŁ*, nr 106, 1996, s. 69–84
- [28] Kawecki A., Maciążek E. W.: *Możliwość uzyskania regionalnych charakterystyk intensywności deszczu do prognoz tłumienia mikrofal na obszarze Polski*. *Prace IŁ*, nr 110, 1998, s. 103–131
- [29] Orear J.: *Fizyka*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1993
- [30] Papatsoris A. D.: *Effect of ice clouds on millimetrewave aeronautical and satellite communications*. *Electronics Letters*, vol. 33, no. 21, 1997, s. 1766–1768
- [31] PN-91E-04555/22: *Warunki środowiskowe występujące w przyrodzie. Opady atmosferyczne i wiatr*.

- [32] Schnell M., Fiebig U. C.: *Fade slope statistics of 40 GHz beacon signals*. Electronics Letters, vol. 33, no. 21, 1997, s. 1819–1821
- [33] Sheriff R. E., Fun Hu Y.: *Mobile Satellite Communication Networks*. Wiley, 2001
- [34] Stutzman W. L., Dishman W. K.: *A simple model for estimation of rain induced attenuation along Earth – space paths at millimetre wavelengths*. Radio Science, vol. 17, no. 6, 1982, s. 1465–1476

## Jan Bogucki



Inż. Jan Bogucki ukończył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej w 1972 roku; długoletni pracownik Zakładu Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji Instytutu Łączności; pracuje na stanowisku st. specjalisty badawczo-technicznego; jest autorem ponad stu publikacji naukowych; zainteresowanie naukowe: cyfrowe linie radiowe, telewizja cyfrowa, propagacja mikrofal w troposferze.

e-mail: J.Bogucki@itl.waw.pl