

BIULETYN

INFORMACYJNY

INSTYTUTU

ŁĄCZNOŚCI



1999

4:5

**BIULETYN
INFORMACYJNY
INSTYTUTU
ŁĄCZNOŚCI**

ROK 39

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

NR 4-5(365-366)

WARSZAWA 1999

Komitet Redakcyjny
Redaktor Naczelny: dr inż. Krystyn Plewko
Z-ca Redaktora Naczelnego: doc. dr inż. Alina Karwowska-Lamparska
Redaktorzy Działowi:
doc. dr inż. Włodzimierz Barjasz
dr inż. Stanisław Sońta
inż. Maria Łopuszniak

© Copyright by Instytut Łączności, Warszawa 1999

ISSN 0209-1046

Redaktor: mgr Krystyna Juskiewicz

Skład komputerowy: techn. Danuta Pol

Instytut Łączności, Ośrodek Informacji Naukowej
ul. Szachowa 1, 04-894 Warszawa

Jan Bogucki

DANE PROPAGACYJNE W PROJEKTOWANIU SYSTEMÓW SATELITARNYCH

SPIS TREŚCI

| | Str. |
|--|------|
| 1. Wprowadzenie | 5 |
| 2. Równania linii satelitarnej | 7 |
| 3. Tłumienie propagacyjne | 11 |
| 3.1. Tłumienie w gazach atmosferycznych | 12 |
| 3.1.1. Skład i budowa troposfery | 12 |
| 3.1.2. Obliczanie tłumienia w gazach | 14 |
| 3.2. Tłumienie w opadach atmosferycznych i chmurach | 19 |
| 3.2.1. Opady atmosferyczne | 19 |
| 3.2.2. Cechy charakterystyczne deszczu | 20 |
| 3.2.3. Deszcz normalny | 21 |
| 3.2.4. Obliczanie charakterystyk statystycznych deszczów | 22 |
| 3.2.5. Skalowanie częstotliwościowe | 26 |
| 3.2.6. Tłumienie wywołane chmurami | 27 |
| 3.2.7. Tłumienie przez śnieg | 31 |
| 3.2.8. Badania propagacyjne na trasie Miedzeszyn - satelita | 33 |
| 3.3. Przeciwdziałanie szkodliwym efektom intensywnych opadów | 40 |
| 3.4. Zmiana polaryzacji fali przez niejednorodności atmosferyczne | 43 |
| 3.4.1. Polaryzacja fali | 43 |
| 3.4.2. Depolaryzacja | 45 |

| | |
|--|----|
| 3.5. Scyntyłacje i zaniki wielodrogowe | 48 |
| 3.6. Zakłócenia stacji satelitarnej przez Słońce | 52 |
| 3.7. Opóźnienie w liniach satelitarnych | 54 |
| 3.8. Dezogniskowanie wiązki energii promieniowanej | 56 |
| 3.9. Tłumienie przez burze piaskowe | 57 |
| Wykaz literatury | 57 |

DANE PROPAGACYJNE W PROJEKTOWANIU SYSTEMÓW SATELITARNYCH

1. WPROWADZENIE

Każdy system satelitarny składa się z linii Ziemia - satelita (*Uplink*), służącej do transmisji sygnału z Ziemi do satelity, stanowiącego orbitalną stację transmisyjną oraz linii satelita - Ziemia (*Downlink*), którą sygnał z satelity jest transmitowany do odbiorcy lub rozsyłany do odbiorców na powierzchni Ziemi.

Jedną z zalet retransmisji satelitarnej jest możliwość korzystania z niej przez nieograniczoną liczbę odbiorców (w zasadzie niezależnie od ich położenia geograficznego, ale w zasięgu wiązki antenowej satelity) jako adresatów sygnałów nadawanych z satelity linią satelita - Ziemia.

Linie satelitarne mogą pracować tylko w zakresie mikrofal, gdyż:

- umożliwiają skupienie fal w wiązkę, co oznacza, że strumień sygnałów kierowanych ze stacji naziemnej w stronę satelity może być bardzo dokładnie „wycelowany”;
- przenikają jonosferę, w przeciwieństwie do innych zakresów długości fal elektromagnetycznych.

Pojęcie mikrofal dotyczy fal o bardzo małych długościach, poniżej 1 m. Zakres częstotliwości i długości mikrofal w obrębie widma fal elektromagnetycznych rozciąga się od 0,3 GHz ($\lambda = 1$ m) do 300 GHz ($\lambda = 1$ mm). Częstotliwość i długość fali w dziedzinie zjawisk elektromagnetycznych są związane z prędkością światła w próżni $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Zależność tę otrzymuje się ze wzoru:

$$\lambda f = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

gdzie: λ - długość fali [m];

f - częstotliwość [Hz];

ϵ_r - względna przenikalność dielektryczna ośrodka (dla atmosfery $\epsilon_r \approx 1$).

W technice telewizji satelitarnej do transmisji sygnałów na odcinku od satelity geostacjonarnego do Ziemi stosuje się zasadniczo dwa pasma: C i Ku. Pasma C (zakres 4 ÷ 6 GHz) było po raz pierwszy wykorzystywane do telewizyjnego przekazu programów za pośrednictwem pierwszego satelity telekomunikacyjnego TELSTAR na początku lat sześćdziesiątych. Do dzisiaj jeszcze wiele satelitów telekomunikacyjnych operuje w pasmie C - szczególnie w USA. Obecnie występuje tendencja do przechodzenia na pasmo Ku i Ka. Do transmisji z satelitów bezpośredniego odbioru (DBS) w Europie stosuje się podzakres pasma Ku: 12 ÷ 14 GHz, ale dla DBS z transmisją cyfrową wykorzystuje się podzakresy pasm: Ku 12 GHz (odbiór), Ka 18 GHz (nadawanie). Wprowadzane obecnie telekomunikacyjne systemy LEO (*Low Earth Orbit*) będą pracować na częstotliwościach poniżej 3 GHz, z wyjątkiem opracowywanego systemu TELEDESIC (20 GHz i 30 GHz). Systemy satelitów przekaźnikowych, zwanych TDRSS (*Tracking and Data Relay Satellites System*), pracują z rozproszeniem widma w zakresie 2 GHz. Każdy satelita systemu GPS (*Global Positioning System*) nadaje sygnały na dwóch częstotliwościach: 1575,42 MHz i 1227,6 MHz.

Uruchamiając system łączności satelitarnej należy znać jego bilans energetyczny. Zdefiniowanie wszystkich parametrów linii umożliwia określenie jej parametrów jakościowych. Jednak tłumienie dodatkowe w linii satelitarnej, pojawiające się wskutek zjawisk propagacyjnych, można oszacować tylko statystycznie.

2. RÓWNANIA LINII SATELITARNEJ

W systemach radiokomunikacji satelitarnej są wykorzystywane satelity aktywne, to znaczy satelity wyposażone w urządzenia nadawczo-odbiorcze, zwane transponderami.

Antena naziemna promieniuje energię w kierunku satelity. Gdyby była ona izotropowa - promieniująca dookoła, to wartość mocy promieniowanej przypadającej na jednostkę kąta bryłowego P_i nie zależałaby od kierunku i wynosiłaby:

$$P_1 = \frac{P_i}{4\pi}, \quad (2)$$

gdzie: P_i - całkowita moc promieniowana (doprowadzona do anteny).

Gęstość powierzchniowa mocy promieniowanej P_{dizotr} w odległości R od tej anteny wynosiłaby:

$$P_{dizotr} = \frac{P_i}{4\pi R^2} \text{ [W/m}^2\text{]}. \quad (3)$$

W normalnych warunkach pracy antena naziemna promieniuje sygnał nie dookólnie, ale w określonym kierunku. W takim przypadku w odległości R od anteny nadawczej gęstość strumienia mocy będzie zwiększona o wielkość G_T :

$$P_d = \frac{P_i G_T}{4\pi R^2} \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (4)$$

gdzie: G_T - zysk anteny nadawczej.

Antena satelitarna odbiera tylko część energii wprost proporcjonalną do apertury antenowej A_r :

$$A_r = \frac{\eta \lambda^2 G_r}{4\pi} \text{ [m}^2\text{]} , \quad (5)$$

gdzie: λ - długość fali;

η - sprawność anteny odbiorczej;

G_r - zysk anteny odbiorczej.

Całkowita moc odbierana P_r , wynosi:

$$P_r = \frac{\eta P_i G_T G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \text{ [W]} . \quad (6)$$

Gęstość szumów N_0 , czyli moc szumów zawarta w znormalizowanej szerokości pasma 1 Hz, wynosi natomiast:

$$N_0 = kT_e , \quad (7)$$

gdzie: k - stała Boltzmana (-198,6 dBmW/K);

T_e - systemowa temperatura szumów [K].

Stosunek poziomu fali nośnej do widma gęstości szumów określa zależność:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{kT_e} , \quad (8)$$

gdzie: C - średnia moc fali przebiegu nośnego.

Należy zwrócić uwagę, że zysk energetyczny anteny odbiorczej nie stanowi jedyne go parametru, na podstawie którego można ocenić skuteczność anteny. Nawet jeśli dana antena ma duży zysk, jej skuteczność może być w znacznym stopniu zredukowana przez szumy. Dopiero stosunek zysku anteny G do temperatury szumowej systemu odbiorczego T_e stanowi prawdziwy wskaźnik dobroci anteny. Temperatura szumowa anteny zależy od wielu czynników, np. od poziomu

listków bocznych, od stosunku ogniskowej do średnicy anteny czy kąta elewacji. Im mniejszy kąt elewacji, tym więcej zakłóceń przenika do anteny przez listki boczne. W Europie sygnały, np. z satelity Intelsat 60°E - przy tych samych wartościach innych parametrów - są gorzej odbierane niż z satelity Eutelsat, znajdującego się na pozycji 13°E czy 7°E [30]. Oczywiście wpływ na to ma również tłumienie atmosfery.

Właściwości anteny najlepiej określa współczynnik przydatności anteny:

$$\frac{G}{T_e} \text{ [dB/K]}. \quad (9)$$

W przypadku transmisji cyfrowej 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 :

$$E_b = P_o T_b, \quad (10)$$

gdzie: P_o - moc na jednostkę długości bitu [W].
Stąd:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C T_b}{k T_e} = \frac{C}{N_0} T_b. \quad (11)$$

Wykorzystując zależność (6) można otrzymać:

$$\frac{C_u}{N_{ou}} = \frac{P_{ru}}{k T_e} = \frac{\eta P_i G_T G_r \lambda^2}{(4 \pi R)^2 k T_e}, \quad (12)$$

gdzie: $\frac{C_u}{N_{ou}}$ - stosunek mocy fali nośnej do szumów dla kierunku Ziemia - satelita.

Dla kierunku Ziemia - satelita równanie (12) można przedstawić następująco:

$$\frac{C_u}{N_{ou}} = 10 \lg P_T G_T - 20 \lg \frac{4\pi R_u}{\lambda} + 10 \frac{G_{ru}}{T_d} - 10 \lg k + 10 \lg \eta . \quad (13)$$

Dla kierunku satelita - Ziemia:

$$\frac{C_d}{N_{od}} = 10 \lg P_s G_{sd} - 20 \lg \frac{4\pi R_d}{\lambda} + 10 \frac{G_{rd}}{T_d} - 10 \lg k + 10 \lg \eta . \quad (14)$$

Równania (13) i (14) mają tę samą postać. Poszczególne składniki oznaczają:

- pierwszy składnik to EIRP (*Equivalent Isotropic Radiated Power*) stacji naziemnej (satelity);
- drugi składnik to tłumienie wolnej przestrzeni na trasie Ziemia - satelita (satelita - Ziemia);
- trzeci składnik to współczynnik przydatności anteny naziemnej (satelitarnej);
- czwarty składnik zależy od stałej Boltzmana;
- piąty składnik to sprawność anteny satelity (odbiorczej).

Wielkość η jest mniejsza od 1, więc składnik piąty reprezentuje straty. Dla rzeczywistych systemów w równaniach (13) i (14) należy wprowadzić szósty składnik, uwzględniający dodatkowo propagacyjne straty L_d , jakie mogą powstać wskutek zjawisk atmosferycznych na trasie satelita - Ziemia i Ziemia - satelita. Wtedy równania te przybierają postać:

$$\begin{aligned} \frac{C_u}{N_{ou}} = & 10 \lg P_T G_T - 20 \lg \frac{4\pi R_u}{\lambda_d} + 10 \frac{G_{ru}}{T_d} + \\ & - 10 \lg k + 10 \lg \eta + 10 \lg L_d , \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{C_d}{N_{od}} = 10 \lg P_s G_{sd} - 20 \lg \frac{4\pi R_d}{\lambda_d} + 10 \frac{G_{rd}}{T_d} + \quad (16)$$

$$- 10 \lg k + 10 \lg \eta + 10 \lg L_d .$$

Wielkość C/N_0 dla trasy Ziemia - satelita ma wpływ na stosunek C/N_0 na trasie satelita - Ziemia. Dlatego całkowity stosunek poziomu przebiegu nośnego do szumów na całej trasie $[C/N_0]_T$ na stacji odbiorczej określa zależność:

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_T = \frac{1}{\frac{N_{ou}}{C_u} + \frac{N_{od}}{C_d}} . \quad (17)$$

Mnożąc obie strony równania (17) przez czas trwania bitu T_b , można otrzymać wyrażenie na stosunek całkowitej energii bitu do gęstości widmowej szumu:

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_T = \frac{1}{\frac{N_{ou}}{E_{bu}} + \frac{N_{od}}{E_{bd}}} . \quad (18)$$

Z powyższych zależności wynika, że można obliczeniowo określić wszystkie parametry linii Ziemia - satelita i satelita - Ziemia z wyjątkiem szóstego składnika w równaniach (15) i (16). Parametr ten jest wielkością statystyczną zależną od parametrów propagacyjnych trasy między satelitą i Ziemią.

3. 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 (kropelki wody oraz kryształki lodu w opadach i chmurach);
- dezogniskowanie wiązki promieniowanej energii;
- zaników szybkich (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 kątów elewacji powyżej 10° już tylko deszcz może być przyczyną kilkudziesięciu decybelowego tłumienia. W niektórych strefach klimatycznych śnieg i lód zgromadzone 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, ale zmiana kierunku promieniowania.

3.1. Tłumienie w gazach atmosferycznych

Niektóre zakresy częstotliwości nie będą wykorzystywane w łączności satelitarnej ze względu na tłumienie w gazach atmosferycznych. Powodem tłumienia jest absorpcja zależna głównie od częstotliwości, kąta elewacji, położenia geograficznego oraz gęstości pary wodnej. Dla częstotliwości poniżej 10 GHz zagadnienie to jest nieistotne. Odgrywa ono dość dużą rolę dla częstotliwości większych od 10 GHz, szczególnie przy małych kątach elewacji.

3.1.1. Skład i budowa troposfery

Troposferą nazywamy dolną warstwę atmosfery zalegającą bezpośrednio nad powierzchnią Ziemi i rozciągającą się do wysokości

8 ÷ 10 km w strefach podbiegunowych, 10 ÷ 12 km w szerokościach umiarkowanych oraz 16 ÷ 18 km w okolicach równikowych. Na całej swej wysokości troposfera ma jednakowy skład procentowy gazów, taki sam jak na powierzchni Ziemi. Wyjątek stanowi zawartość pary wodnej, która zależy od warunków meteorologicznych i zmniejsza się ze wzrostem wysokości. 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 $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Średnia roczna temperatura powietrza w górnej granicy troposfery wynosi w strefach podbiegunowych -55°C , a w okolicach równikowych -80°C . Górna granica troposfery została ustalona w miejscu, w którym dalszy spadek temperatury powietrza ulega zatrzymaniu. Przyczyną stopniowego spadku temperatury powietrza ze wzrostem wysokości jest to, że promienie słoneczne przenikające troposferę zupełnie jej nie nagrzewają. Niemalże cały strumień energii słonecznej jest pochłaniany przez powierzchnię Ziemi. Z kolei nagrzana powierzchnia Ziemi jest źródłem promienia cieplnego nagrzewającego troposferę. Ważną rolę w nagrzewaniu troposfery odgrywa konwekcja.

Przylegające do powierzchni Ziemi masy powietrza nagrzewają się i unoszą w górę, ich miejsce zajmuje powietrze zimne itd. W ten sposób atmosfera jest nagrzewana od dołu, powstające zaś z powodu nierównomierności nagrzewania obszarów powierzchni Ziemi prądy wstępujące i zstępujące wywołują zawirowania w atmosferze oraz 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 1014 hPa, na wysokości 5 km zmniejsza się prawie dwukrotnie, a na wysokości 11 km spada do 225 hPa. Na wysokości 17 km (górną granicę troposfery w okolicach równikowych) ciśnienie atmosferyczne wynosi zaledwie 90 hPa.

3.1.2. Obliczanie tłumienia w gazach

Podana metoda jest stosowana do obliczania przewidywanej mediany tłumienia w gazach dla danej wartości pary wodnej ρ_w , dla zakresu częstotliwości do 350 GHz.

Danymi wyjściowymi do obliczenia tłumienia w gazach atmosferycznych są mediany (miesięczne lub roczne) wartości pary wodnej z sezonowej mapy absolutnej wilgotności powietrza, wyrażane w postaci izolinii [g/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 γ_o i dla zawartości pary wodnej γ_w dla danej częstotliwości f dla każdego z przyjętych podzakresów częstotliwości [17]:

dla $f \leq 57$ GHz

$$\gamma_o = \left[\frac{7,27 r_t}{f^2 + 0,351 r_p^2 r_t^2} + \frac{7,5}{(f - 57)^2 + 2,44 r_p^2 r_t^5} \right] f^2 r_p^2 r_t^2 \cdot 10^{-3}, \quad (19)$$

dla $63 \text{ GHz} \leq f \leq 350 \text{ GHz}$

$$\gamma_o = \left[2 \cdot 10^{-4} r_t^{1,5} (1 - 1,2 \cdot 10^{-5} f^{1,5}) + \frac{4}{(f - 63)^2 + 1,5 r_p^2 r_t^5} + \frac{0,28 r_t^2}{(f - 118,75)^2 + 2,84 r_p^2 r_t^2} \right] f^2 r_p^2 r_t^2 \cdot 10^{-3}, \quad (20)$$

dla $57 \text{ GHz} \leq f \leq 63 \text{ GHz}$

$$\gamma_o = \frac{(f-60)(f-63)}{18} \gamma_o(57) - 1,66 r_p^2 r_t^{8,5} (f-57)(f-63) + \frac{(f-57)(f-60)}{18} \gamma_o(63) . \quad (21)$$

Dla pary wodnej tłumienie γ_w [dB/km] jest dane:
dla $f \leq 350 \text{ GHz}$

$$\gamma_w = \left[3,27 \cdot 10^{-2} r_t + 1,67 \cdot 10^{-3} \frac{\rho r_t^7}{r_p} + 7,7 \cdot 10^{-4} f^{0,5} + \frac{3,79}{(f-22,235)^2 + 9,81 r_p^2 r_t} + \frac{11,73 r_t}{(f-183,31)^2 + 11,85 r_p^2 r_t} + \frac{4,01 r_t}{(f-325,153)^2 + 10,44 r_p^2 r_t} \right] f^2 \rho r_p r_t \cdot 10^{-4} , \quad (22)$$

gdzie: f - częstotliwość [GHz];

r_p - $p/1013$;

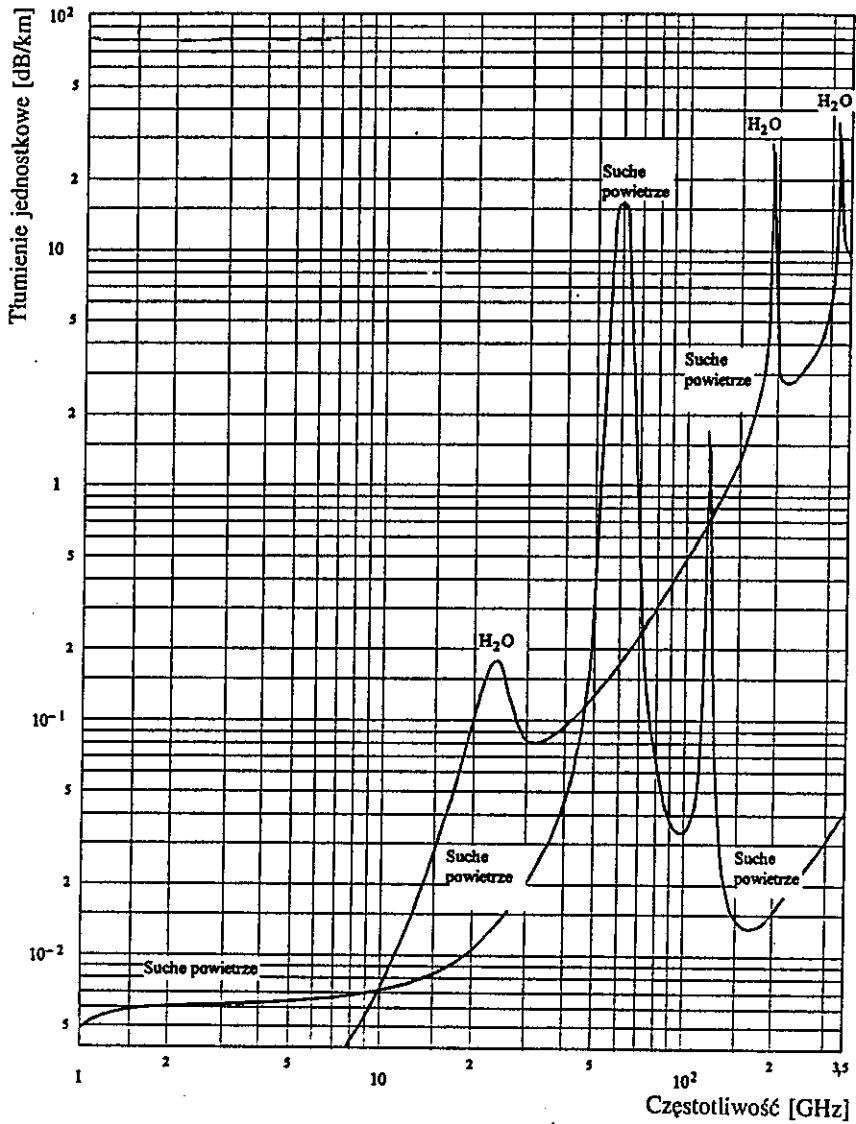
r_t - $288/(273 + t)$;

p - ciśnienie [hPa];

t - temperatura otoczenia [°C];

ρ - koncentracja pary wodnej [g/m^3].

Współczynnik tłumienia gazów atmosferycznych - wyrażony w dB/km w zależności od częstotliwości sygnału ($1 \div 350 \text{ GHz}$) - jest podawany w postaci uniwersalnej dla pionowej trasy propagacji i standardowej atmosfery o zawartości pary wodnej przy powierzchni ziemi równej $7,5 \text{ g}/\text{m}^3$. Na rys. 1 przedstawiono taką krzywą dla standardowej atmosfery, tj. ciśnienia 1013 hPa, temperatury 15°C



Rys. 1. Tłumienie właściwe pary wodnej i tlenu [17]

i zawartości pary wodnej $7,5 \text{ g/m}^3$. Uwidacznia ona charakterystyczne maksima związane z rezonansowymi częstotliwościami molekularnymi tych gazów. Z przebiegu charakterystyki H_2O widać, dlatego wybrano dla łączności satelitarnej zakresy częstotliwości poniżej 18 GHz i powyżej 27 GHz.

Krok 2. Oblicza się ekwiwalentną wysokość h_o dla suchego powietrza i ekwiwalentną wysokość h_w dla danej koncentracji pary wodnej:

dla $f < 50 \text{ GHz}$

$$h_o = 6 \text{ km} , \quad (23)$$

dla $70 \text{ GHz} < f < 350 \text{ GHz}$

$$h_o = 6 + \frac{40}{(f - 118,7)^2 + 1} \text{ [km]} , \quad (24)$$

dla $f < 350 \text{ GHz}$

$$h_w = h_{wo} \left\{ 1 + \frac{3,0}{(f - 22,2)^2 + 5} + \frac{5,0}{(f - 183,3)^2 + 6} + \frac{2,5}{(f - 325,4)^2 + 4} \right\} \text{ [km]} , \quad (25)$$

gdzie: h_{wo} : ekwiwalentna wysokość dla koncentracji pary wodnej w danym regionie klimatycznym; przyjmuje się:

$h_{wo} = 1,6 \text{ km}$ dla dobrych warunków pogodowych;

$h_{wo} = 2,1 \text{ km}$ dla deszczu.

Ta ekwiwalentna wysokość dla danej koncentracji pary wodnej jest określona w temperaturze 15° (przy gruncie). Dla innych temperatur ekwiwalentna wysokość powinna być skorygowana o 0,1% lub 1% na 1°C odpowiednio dla dobrych warunków pogodowych albo

deszczu i o 0,2% lub 2% na 1°C dla absorpcyjnych pasm (wysokość wzrasta ze wzrostem temperatury).

Krok 3. Oblicza się całkowite tłumienie A_g przez gazy atmosferyczne:

dla $\theta > 10^\circ$ (gdzie: θ - kąt elewacji):

$$A_g = \frac{\gamma_o h_o e^{\frac{-h_s}{h_o}} + \gamma_w h_w}{\sin \theta} \text{ [dB]} , \quad (26)$$

dla $\theta \leq 10^\circ$:

$$A_g = \frac{\gamma_o h_o e^{\frac{-h_s}{h_o}}}{g(h_o)} + \frac{\gamma_w h_w}{g(h_w)} \text{ [dB]} , \quad (27)$$

gdzie:

$$g(h) = 0,661x + 0,339 \sqrt{x^2 + 5,5 \left(\frac{h}{R_e} \right)} ,$$

$$x = \sqrt{\sin^2 \theta + 2 \left(\frac{h_s}{R_e} \right)} ,$$

przy czym za h jest podstawiane odpowiednio h_o lub h_w .

W tych obliczeniach R_e jest zastępczym promieniem Ziemi z uwzględnieniem zjawiska refrakcji [19]. Zwykle przyjmuje się $R_e = 8\,500$ km dla $h_s \leq 1$ km.

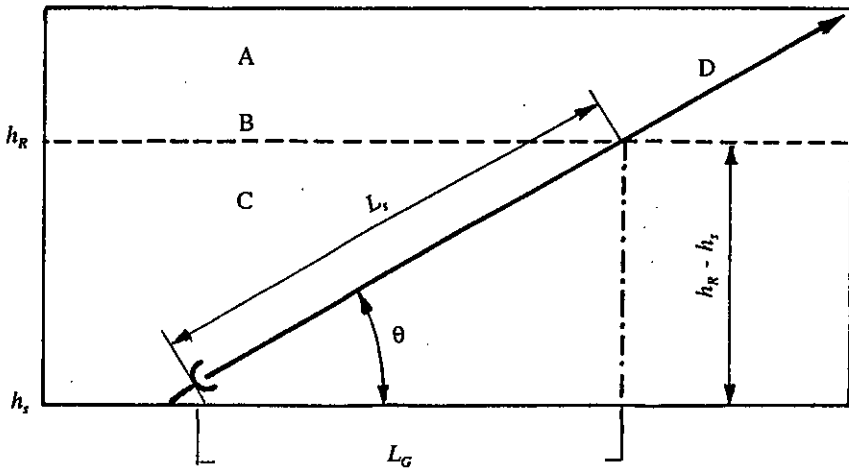
Badania zmian poziomu tłumienia atmosfery przeprowadzone dla częstotliwości 11,4 GHz w kilku punktach geograficznych w Europie

potwierdzają, że sezonowe zmiany miesięcznych median tłumienia nie przekraczają 0,1 dB.

3.2. Tłumienie w opadach atmosferycznych i chmurach

3.2.1. Opady atmosferyczne

Określony rodzaj opadów atmosferycznych, jak 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°C , nosi nazwę poziomu zamarzania (rys. 2). Powyżej poziomu zamarzania tempera-



Rys. 2. Trasa Ziemia - satelita

A - zamrożone cząstki, B - poziom zamarzania, C - ciekłe cząstki,
D - droga Ziemia - satelita

tura jest niższa od 0°C , natomiast poniżej tego poziomu temperatura jest wyższa od 0°C .

W chmurach poniżej poziomu zamarzania przechłodzone krople wody występują zazwyczaj w zakresie temperatur od 0°C do -13°C, chociaż w wyjątkowych przypadkach temperatura ta może osiągnąć -50°C.

Tworzenie się kropli deszczu czy kryształków lodu zależy od różnych czynników, takich jak np. pionowe ruchy powietrza, rozkład temperatury i związany z tym ruch 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 krople osiągają ziemię w postaci deszczu. Podczas drogi w dół mogą się one powiększać, w zależności od warunków. Prędkość opadania na ogół wzrasta wraz ze wzrostem średnicy kropli deszczu, a zależy to jeszcze od struktury wiatrów.

Krople o wielkości od 5 mm do 6 mm przy prędkości 9 m/s rozpadają się na mniejsze, które z kolei mogą rosnąć na swej drodze opadania w dół. W wyniku tego procesu graniczna wielkość kropli może wynosić od 5 mm do 6 mm.

3.2.2. Cechy charakterystyczne deszczu

Deszcz charakteryzują następujące czynniki fizyczne:

- intensywność deszczu mierzona w milimetrach na godzinę;
- rozkład wielkości kropli;
- rozkład prędkości spadania;
- temperatura kropli wody.

Przegląd czynników charakterystycznych dla różnych rodzajów deszczu podano w tablicy 1.

Temperatura kropli deszczu bywa zwykle określana temperaturą uzyskiwaną przez termometr wilgotny w psychrometrze aspiracyjnym. Mogą jednak wystąpić odchylenia, głównie w przypadku deszczu utworzonego z kryształów lodu albo na początku okresu padania deszczu.

Czynniki charakteryzujące deszcz [34]

| Rodzaj deszczu | Górna granica intensywności deszczu [mm/h] | Typowa średnica kropli [mm] | Prędkość spadania [m/s] |
|---------------------|--|-----------------------------|-------------------------|
| Deszcz bardzo słaby | śladowa | 0,01 ÷ 0,1 | < 0,25 |
| Deszcz słaby | 1,0 | 0,1 ÷ 0,5 | 0,25 ÷ 1 |
| Deszcz umiarkowany | 4,0 | 0,5 ÷ 1,0 | 1 ÷ 2 |
| Deszcz silny | 15 | 1,0 ÷ 2,0 | 2 ÷ 4 |
| Deszcz ulewny | 40 | 2,0 ÷ 5,0 | 4 ÷ 7 |
| Deszcz nawalny | > 100 | > 3,0 | > 6 |

3.2.3. Deszcz normalny

Deszcz może mieć bardzo różną intensywność, która znacznie zmienia się w zależności od szerokości geograficznej, klimatu i pory roku. Ogólnie największe intensywności deszczu występują podczas burz tropikalnych oraz w wichurach typu huraganowego.

Światowy rekord intensywności deszczu wynosi 30 mm w ciągu jednej minuty. Opady takie są zazwyczaj krótkotrwałe, np. deszcz podczas burzy z piorunami rzadko trwa dłużej niż 0,5 godziny.

Normalny deszcz składa się z kropli o różnych rozmiarach i o różnych prędkościach ich opadania. Właściwości kropli zależą głównie od temperatury i zawartości wilgoci w atmosferze. W zależności od właściwości atmosfery będzie częściowe lub całkowite odparowanie padających kropli. Wskutek tego, deszcz tropikalny zwykle składa się z kropli większych niż np. deszcz w Europie Północnej.

3.2.4. Obliczanie charakterystyk statystycznych deszczów

Charakterystyki statystyczne tłumień w deszczu dla danej lokalizacji i dla częstotliwości do 30 GHz wykonuje się w następujący sposób.

Krok 1. Oblicza się efektywną wysokość h_R (rys. 2) dla danego punktu odbiorczego, znając szerokość geograficzną φ (w stopniach) [20]:

$$h_R [\text{km}] = \begin{cases} 5 - 0,075(\varphi - 23) & \varphi > 23^\circ \text{ półkula północna} \\ 5 & 0^\circ \leq \varphi \leq 23^\circ \text{ półkula północna} \\ 5 & 0^\circ \geq \varphi \geq -21^\circ \text{ półkula południowa} \\ 5 + 0,1(\varphi + 21) & -71^\circ \leq \varphi \leq -21^\circ \text{ półkula południowa} \\ 0 & \varphi < -71^\circ \text{ półkula południowa} \end{cases} \quad (28)$$

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

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta}, \quad (29)$$

gdzie: h_s - wysokość nad poziomem morza stacji naziemnej [km].

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

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{\frac{1}{2}} + \sin \theta} \quad (30)$$

Krok 3. Oblicza się horyzontalną długość drogi z zależności:

$$L_G = L_s \cos \theta. \quad (31)$$

Tablica 2

Deszczowe strefy klimatyczne [21]

| % | A | B | C | D | E | F | G | H | J | K | L | M | N | P | Q |
|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1,0 | <0,1 | 0,5 | 0,7 | 2,1 | 0,6 | 1,7 | 3 | 2 | 8 | 1,5 | 2 | 4 | 5 | 12 | 24 |
| 0,3 | 0,8 | 2 | 2,8 | 4,5 | 2,4 | 4,5 | 7 | 4 | 13 | 4,2 | 7 | 11 | 15 | 34 | 49 |
| 0,1 | 2 | 3 | 5 | 8 | 6 | 8 | 12 | 10 | 20 | 12 | 15 | 22 | 35 | 65 | 72 |
| 0,03 | 5 | 6 | 9 | 13 | 12 | 15 | 20 | 18 | 28 | 23 | 33 | 40 | 65 | 105 | 96 |
| 0,01 | 8 | 12 | 15 | 19 | 22 | 28 | 30 | 32 | 35 | 42 | 60 | 63 | 95 | 145 | 115 |
| 0,003 | 14 | 21 | 26 | 29 | 41 | 54 | 45 | 55 | 45 | 70 | 105 | 95 | 140 | 200 | 142 |
| 0,001 | 22 | 32 | 42 | 42 | 70 | 78 | 65 | 83 | 55 | 100 | 150 | 120 | 180 | 250 | 170 |

Krok 4. Określa się wartość intensywności deszczu $R_{0,01}$ przekraczaną w 0,01% roku (średniominutową). Jeżeli brak bliższych danych dotyczących opadów dla danego miejsca geograficznego, to należy wykorzystać dane ITU-R, które zawierają aktualne charakterystyki statystyczne rozkładu intensywności opadów dla piętnastu klimatycznych stref opadowych (tablica 2), odpowiadających poszczególnym obszarom globu ziemskiego. Obszar Polski w około 2/3 należy do strefy E (część północno-zachodnia) i w około 1/3 do strefy H o większej intensywności opadów.

Dla rejonu Warszawy wieloletnie pomiary intensywności opadu na potrzeby radiokomunikacji prowadzono w IŁ [27 ÷ 29]. Rozkład intensywności dla regionu Warszawy, oparty na 11-letnich pomiarach w Miedzeszynie, odpowiada dość dokładnie modelowi dla strefy H.

Krok 5. Oblicza się współczynnik redukcji $r_{0,01}$ dla 0,01% roku dla $R_{0,01} \leq 100$ mm/h:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + \frac{L_G}{L_0}} \quad (32)$$

gdzie:

$$L_0 = 35 \exp(-0,015 R_{0,01}) .$$

Dla intensywności $R_{0,01} > 100$ mm/h w obliczeniach przyjmuje się intensywność 100 mm/h.

Krok 6. Oblicza się tłumienie jednostkowe γ_R , wykorzystując współczynniki regresji α i k (tablica 3) oraz intensywność opadu określoną w kroku 4:

$$\gamma_R = k(R_{0,01})^\alpha . \quad (33)$$

Współczynniki regresji [23]

| f [GHz] | Polaryzacja pozioma | | Polaryzacja pionowa | |
|---------|---------------------|----------|---------------------|----------|
| | k | α | k | α |
| 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 7. Szacuje się tłumienie występujące w czasie większym niż 0,01 % roku z zależności [20]:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_s r_{0,01} \cdot \quad (34)$$

Krok 8. Szacuje się tłumienie występujące w innym procencie roku A_p , w zakresie od 0,001% do 1%, wykorzystując wartość tłumienia przekraczaną w 0,01% czasu:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12p^{-(0,546 + 0,043 \lg p)}, \quad (35)$$

Określając wartość prawdopodobieństwa p_R odpowiadającą danej wartości tłumienia A_p , korzysta się z zależności [20]:

$$p_R = 10^{11,628 \left(-0,546 + \sqrt{0,298 + 0,1721 \lg \left(0,12 \cdot \frac{A_{0,01}}{A_p} \right)} \right)}, \quad (36)$$

przy ograniczeniu [20], że:

$$\frac{A_{0,01}}{A_p} \geq 0,15. \quad (37)$$

Metoda ta umożliwia oszacowanie długoterminowych charakterystyk statystycznych tłumień w deszczu. Porównując dane pomiarowe z oszacowanymi można określić wieloletnią zmienność opadów.

3.2.5. Skalowanie częstotliwościowe

Statystyczne rozkłady tłumień dla danej częstotliwości, polaryzacji oraz kąta elewacji mogą być użytecznym narzędziem do skalowania. Jeśli jest znany 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 [20]:

$$A_2 = A_1 \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right)^{1 - H(\varphi_1, \varphi_2, A_1)}, \quad (38)$$

gdzie:

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

$$H(\varphi_1, \varphi_2, A_1) = 1,12 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right)^{0,5} (\varphi_1 A_1)^{0,55},$$

A_1 i A_2 - wartości tłumień w deszczu dla częstotliwości f_1 i f_2 odpowiednio.

3.2.6. Tłumienie wywołane chmurami

Dla chmur czy mgieł, składających się z małych kropeł deszczu - generalnie mniejszych niż 0,01 cm - można stosować rozkład Rayleigha i określić tłumienie przez ilość wody na jednostkę objętości.

Współczynnik tłumienia γ_c wywołanego chmurami lub mgłą określa zależność:

$$\gamma_c = K_l \cdot M, \quad (39)$$

gdzie: K_l - współczynnik tłumienia [(dB/km)/(g/cm³)];

M - zawartość wody w chmurze lub mgłę [g/cm³].

Przy częstotliwościach ok. 100 GHz i powyżej tłumienie spowodowane mgłą może być znaczne. Ilość pary wodnej zawartej w „przeziębnej” mgłę jest zwykle 0,05 g/m³ (widzialność ok. 300 m), a w gęstiej mgłę 0,5 g/m³ (widzialność ok. 50 m).

Model matematyczny rozkładu Rayleigha, który wykorzystuje model podwójny-Debye stałej dielektrycznej $\epsilon(f)$ wody, może być zastosowany do obliczenia wartości K_l dla częstotliwości do 1000 GHz [24]:

$$K_l = \frac{0,819f}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \text{ [(dB/km)/(g/cm}^3\text{)]} , \quad (40)$$

gdzie: f - częstotliwość [GHz];

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} .$$

Zespolona przenikalność dielektryczna wody jest dana zależnością [24]:

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p \left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s \left[1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right]} , \quad (41)$$

$$\epsilon'(f) = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{f_p \left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right]} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{f_s \left[1 + \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right]} + \epsilon_2 , \quad (42)$$

gdzie:

$$\epsilon_0 = 77,6 + 103,3(\Psi - 1) ,$$

$$\epsilon_1 = 5,48 ,$$

$$\varepsilon_2 = 3,51 ,$$

$$\Psi = \frac{300}{T} ,$$

T - temperatura otoczenia [K].

Częstotliwości rezonansowe f_p i f_s dla tłumienia w parze wodnej są dane zależnościami:

$$f_p = 20,09 - 142(\Psi - 1) + 294(\Psi - 1)^2 \text{ [GHz]} , \quad (43)$$

$$f_s = 590 - 1500(\Psi - 1) \text{ [GHz]} . \quad (44)$$

Wartości K_l dla zakresu częstotliwości od 5 GHz do 200 GHz i temperatury od -8°C do 20°C przedstawiono na rys. 3. Dla tłumienia wywołanego przez chmury powinna być użyta krzywa odpowiadająca 0°C .

Aby otrzymać tłumienie A wywołane chmurami dla danego progu prawdopodobieństwa, statystyczna całkowita zawartość wody W , [kg/m²] w kolumnie deszczu dla danego położenia geograficznego powinna być znana i wówczas:

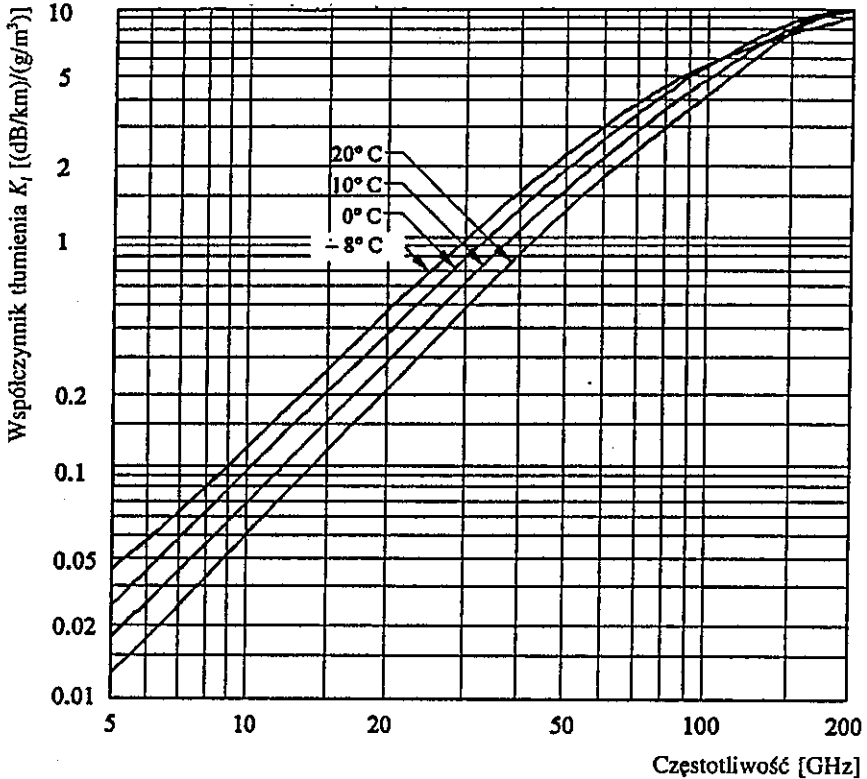
$$A = \frac{W_l K_l}{\sin \theta} , \quad (45)$$

gdzie: θ - kąt elewacji;

K_l - wartość odczytana z rys. 3.

Statystyczną zawartość wody w kolumnie otrzymuje się z pomiarów radiometrycznych. Przy braku tych danych, można wyliczyć

tlumienie przyjmując W , równe $0,5 \text{ kg/m}^2$, odpowiadające zawartości wody $0,5 \text{ g/m}^3$ i grubości chmur 1 km .



Rys. 3. Tłumienie przez krople wody [24]

Z przeprowadzonych ostatnio pomiarów wynika, że tłumienie w chmurach typu stratocumulus jest od $0,5 \text{ dB}$ do 1 dB przy częstotliwości 150 GHz , natomiast w chmurach o dużej zawartości wody typu cumulonimbus tłumienie to wynosi od 4 dB do 5 dB przy 100 GHz i sięga 8 dB przy 150 GHz .

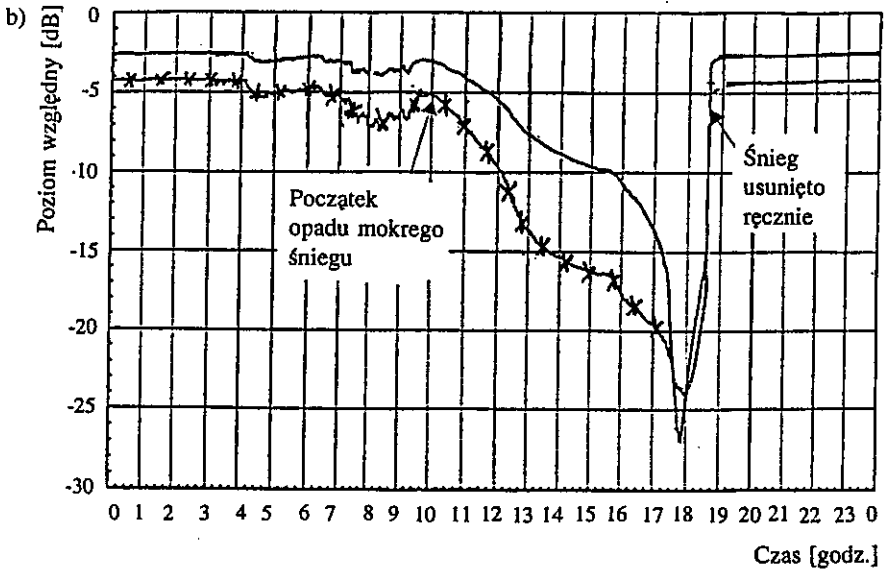
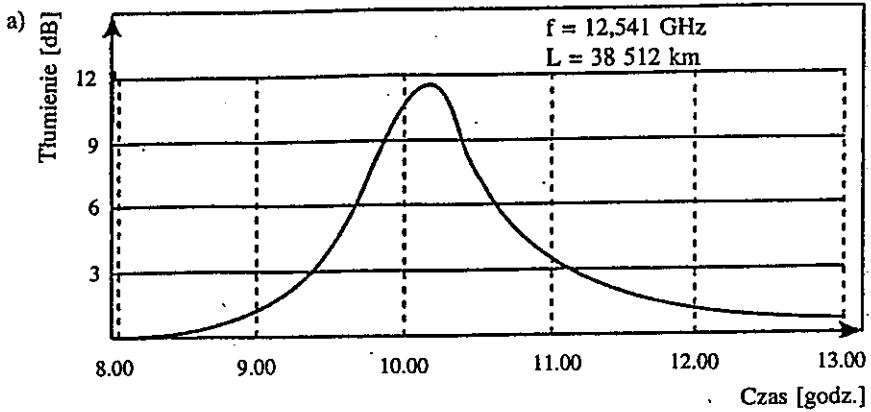
3.2.7. Tłumienie przez śnieg

Suchy śnieg jest mieszaniną cząstek lodu i przestrzeni wypełnionej powietrzem. Kryształy lodu mają kształt, zapewniający minimalny stosunek ich powierzchni do objętości. Woda w śniegu zbiera się w punktach łączenia ziaren kryształu lodu. Całkowita przenikalność dielektryczna lodu (materiał o niskich stratach) oraz wody (materiał o dużych stratach) zależy od częstotliwości i temperatury.

W ogólnym przypadku dielektryczna przenikalność śniegu jest funkcją częstotliwości, temperatury, objętościowej zawartości wody, gęstości śniegu, kształtu cząstek lodu i postaci wody. W przypadku niejednorodnego materiału, jakim jest śnieg, dielektryczna przenikalność ϵ może być wyrażona wartością zastępczą. Definiowana ona jest dla jednorodnego materiału, w którym rozchodząca się fala jest tak tłumiona i z taką fazą, jak przy propagacji w rzeczywistym ośrodku. Jeśli niejednorodność materii jest dużo mniejsza od długości fali, to można, wykorzystując prosty model, znaleźć związek dielektrycznej przenikalności mieszaniny z elektrycznymi przenikalnościami jej składowych.

Opad śniegu, nawet intensywny nie powoduje praktycznie żadnego tłumienia na trasie satelitarnej. Nawet nagromadzenie się grubej warstwy suchego śniegu w antenie jest „niezauważalne” przez mikro-fale, gdyż powoduje wzrost tłumienia rzędu 0,1 dB. Dopiero gdy śnieg zaczyna topnieć, zostaje zachwiana równowaga fazowa promieniowania docierającego do ogniska reflektora, co jest równoznaczne ze zmniejszeniem zysku energetycznego. Na rys. 4a przedstawiono tłumienie na trasie satelita - Ziemia wywołane topniejącym śniegiem w antenie.

Na rys. 4b zilustrowano inną sytuację, a mianowicie już padający mokry śnieg osadza się na powierzchni czaszy anteny „deformując” ją mechanicznie - dla fal elektromagnetycznych czasza anteny nie jest wówczas częścią parabol, lecz tworzy nieregularną płaszczyznę [10].



Rys. 4. Tłumienie na trasie satelitarnej

a) sygnału 12 GHz wywołane topniejącym śniegiem w czaszy anteny;

b) sygnału 20 GHz i 27 GHz wywołane opadem mokrego śniegu

— 20 GHz; * * * 27 GHz

Efektom tego jest zauważalne, znaczne i długotrwałe tłumienie sygnału. Należy zwrócić uwagę, że te dwa przypadki nie wiążą się z warunkami propagacyjnymi na trasie satelitarnej. Zapobiegać tym niekorzystnym sytuacjom można przez:

- 1) stosowanie anten podgrzewanych;
- 2) stosowanie anten podświetlanych (offsetowych).

Pierwszy z tych sposobów jest oczywisty, drugi zaś wymaga przypomnienia, że reflektory anten offsetowych pracują niemal pionowo, czy z kątem elewacji (pochylenia) zaledwie kilku stopni, co zapobiega gromadzeniu się śniegu w antenie.

3.2.8. Badania propagacyjne na trasie Miedzeszyn - satelita

Metody prognozowania charakterystyk propagacyjnych fal radiowych są oparte na wykorzystaniu metod obrazujących stan atmosfery, a więc deszczu, klimatycznych właściwości regionu geograficznego itd. Dane pomiarowe służą sprawdzeniu tych modeli i metod prognozowania, a także - choć rzadziej - są wyjściowymi materiałami do prognozowania drogą ekstrapolacji dla innych warunków propagacji.

Od wielu lat prowadzono takie badania w Instytucie Łączności w Miedzeszynie. Podstawowymi członami kompleksu pomiarowego do badań propagacji fal w liniach satelitarnych oraz horyzontowych były: dwie ziemskie linie radiowe w pasmach częstotliwości 12 GHz i 18 GHz, linia satelitarna w pasmie 12 GHz, a także czujniki intensywności opadu, rozmieszczone wzdłuż linii horyzontowych przebiegających pod linią satelitarną. Dane pomiarowe zbierał komputerowy system rejestracji i przetwarzania danych [7].

Badania na trasie satelitarnej prowadzono z wykorzystaniem satelity Łucz 1, a później satelity Olympus. Organizacja pomiarów satelitarnych była następująca: na tarasie budynku IŁ zamontowano antenę paraboliczną średnicy 3 m wraz z rozkiem umieszczonym w jej ognisku i konwerterem 12 GHz/1 GHz. Następnie zastosowano

konwerter 1 GHz/80 MHz wraz ze wzmacniaczem oraz odbiornik wąskopasmowy typu SLE. Umożliwiło to odbieranie sygnału radiolaterni satelity Łucz 1.

● Parametry badanej linii satelitarnej

Parametry satelity Łucz 1

| | |
|--------------------|------------|
| Pozycja na orbicie | 14° W |
| EIRP | 36,8 dBW |
| Polaryzacja | pionowa |
| Częstotliwość | 11 541 MHz |

Parametry trasy

| | |
|------------------------------|-----------|
| Długość trasy | 39 219 km |
| Tłumienie wolnej przestrzeni | 205,9 dB |
| Kąt wzniesienia | 22° |
| Azymut | 224,3° |

Parametry anteny odbiorczej

| | |
|----------|-------|
| Średnica | 3 m |
| Zysk | 47 dB |

Parametry odbiornika

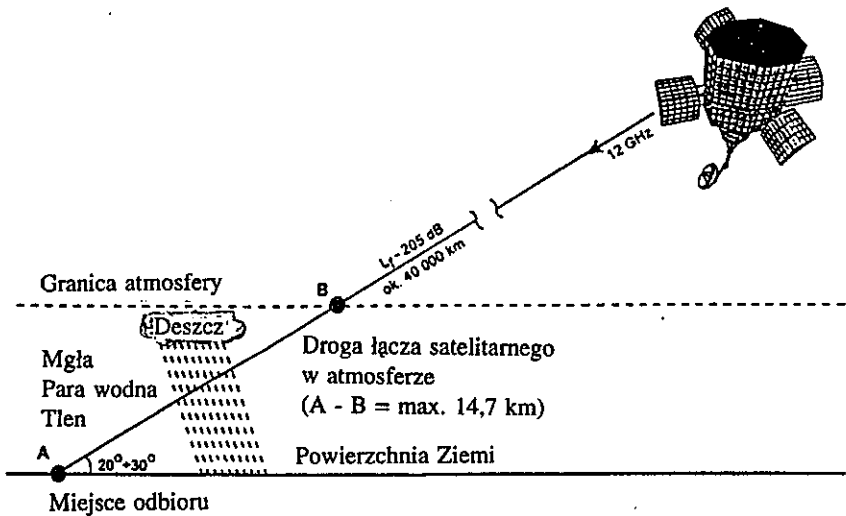
| | |
|--|-----------|
| Współczynnik szumów | 6,5 dB |
| Wzmocnienie pierwszego wzmacniacza częstotliwości pośredniej | 54 dB |
| Szerokość pasma | 8,5 MHz |
| Współczynnik szumów wzmacniacza 80 kHz | 1,45 dB |
| Stołość częstotliwości heterodyny | 50 kHz/°C |

Parametry odbiornika pośredniej 80 MHz

| | |
|---|-----------|
| Pierwsza częstotliwość pośrednia | 10,7 MHz |
| Druga częstotliwość pośrednia | 198,1 kHz |
| Szerokość pasma częstotliwości pośredniej | 3 kHz |

Przy tych parametrach satelity oraz stanowiska odbiorczego dynamika mierzalnych zmian sygnału wynosiła 21 dB. Wartość ta wahała się w cyklu dobowym odpowiednio do zmian położenia satelity.

Rejestracja danych pomiarowych została przeprowadzona przez opracowany oraz wdrożony w IŁ komputerowy system automatycznej rejestracji i przetwarzania danych radiometeorologicznych, oparty na komputerach typu IBM PC. W każdym z czterech punktów pomiarowych trasy - przebiegających pod linią satelitarną - zainstalowano komputer z czujnikiem do rejestrowania 1-minutowej intensywności opadu. W punkcie odbiorczym w Miedzeszynie, oprócz intensywności opadu, rejestrowano m.in. natężenie sygnału satelitarnego z okresem próbkowania 4 s. Zebrane dane podlegały weryfikacji i obróbce statystycznej w celu uzyskania charakterystyk mierzonych wielkości oraz występujących zależności między nimi.



Rys. 5. Droga sygnału na trasie satelita - Ziemia

Pomiary przeprowadzono na trasie satelita - Miedzeszyn wykorzystując radiolatarnie satelity (*beacon*). Satelita emitował niemodulowany sygnał o polaryzacji liniowej, a w IŁ rejestrowano poziom tego sygnału. Przy kącie wzniesienia trasy 22° , tylko odcinek 15 km - z całej 39 219 km długości trasy - jest narażony na deszcz (rys. 5), dlatego wzdłuż trasy ustawiono pięć deszczomierzy, a mianowicie w punkcie odbiorczym (Miedzeszyn) oraz w następujących odległościach od niego: 2,2 km (Julianów), 4,9 km (Kępa), 8,7 km (Powsin) i 12,1 km (Kierszek).

● Warunki propagacyjne na trasie satelitarnej

Decydującą rolę w tłumieniu sygnału odgrywa tłumienność związana z propagacją w przestrzeni między dwiema antenami, składająca się z dwu wielkości: tłumienności głównej i dodatkowej.

Tłumienność główna odpowiada tłumieniu sygnału w warunkach propagacji wolnej przestrzeni; dla trasy długości 39 219 km i częstotliwości 11 541 MHz wynosi ona 205,9 dB.

Występująca we wzorze (6) wielkość $\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$ nazywa się tłumieniem swobodnej przestrzeni. Określa ona stosunek mocy, wypromieniowanej przez izotropową antenę nadawczą, do mocy odbieranej przez izotropową antenę odbiorczą, gdy obie anteny są umieszczone w swobodnej przestrzeni. Wielkość tę zwykle podaje się w mierze logarytmicznej:

$$L_f = 20 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2.$$

Satelita geostacjonarny znajduje się najbliżej Ziemi, dla punktu podsatelitarnego - w odległości 35 803 km. Dla innych punktów

odbiorczych ta odległość jest większa i można przyjąć, że dla północnych krańców Europy wynosi 40 000 km. Wtedy tłumienie na trasie tej długości i częstotliwości 12 GHz (długość fali $\lambda = 25$ mm) - z satelity do Ziemi - wynosi 206,07 dB, natomiast dla kierunku z Ziemi do satelity - jest wykorzystywana częstotliwość 14 GHz (długość fali $\lambda = 21,4$ mm) i wówczas tłumienie wynosi 207,4 dB.

Tłumienność dodatkowa jest spowodowana zanikami sygnału w wyniku opadów atmosferycznych. Zmienia się ona w funkcji czasu, oscylując wokół wartości zerowej w dobrych warunkach propagacyjnych i osiągając wartość nawet kilkudziesięciu decybeli w warunkach głębokich zaników sygnału. Wzrost tłumienności powoduje zmniejszenie się stosunku mocy sygnału do szumów na wejściu odbiornika i w konsekwencji pogorszenie jakości transmisji.

Na trasach satelitarnych, przy kątach wzniesienia $> 20^\circ$, nie występują tłumienia wywołane dużymi zmianami współczynnika refrakcji (wielodrogowością), jak w przypadku tras ziemskich.

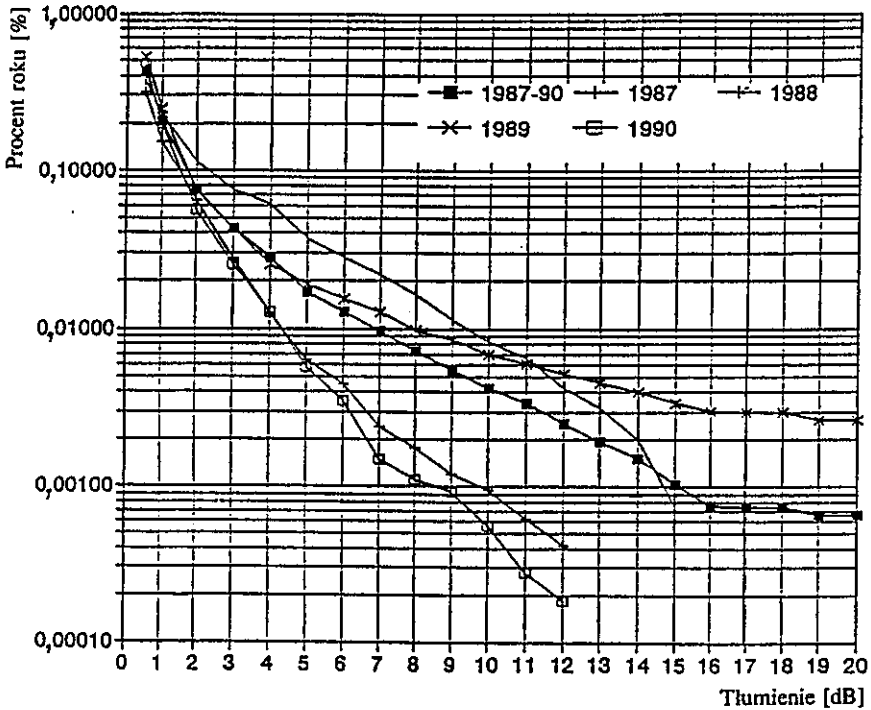
● Wyniki pomiarów

Miarą niezawodności propagacyjnej linii satelitarnej jest prawdopodobieństwo przekroczenia danego tłumienia w określonym czasie. Właśnie w wyniku tych pomiarów otrzymuje się charakterystyki statystyczne, przedstawiające procent czasu przekroczenia danego poziomu tłumienia.

Poniżej omówiono wyniki czteroletnich badań przeprowadzonych na trasie satelita Łucz 1 - IŁ.

Roczne rozkłady i średnioroczny rozkład tłumienia fali dla wszystkich rodzajów opadów zaprezentowano na rys. 6. Natomiast odpowiednie rozkłady dla najgorszego miesiąca zilustrowano na rys. 7. Zaniki sygnałów są na ogół powodowane przez opady deszczu w cie-

plej porze roku, ale również występują w okresie chłodnym, spowodowane głównie opadem deszczu z gradem. Tłumienie wywołane przez grad z deszczem nie wpłynęło jednak w istotny sposób w badanym okresie na przebieg charakterystyki.



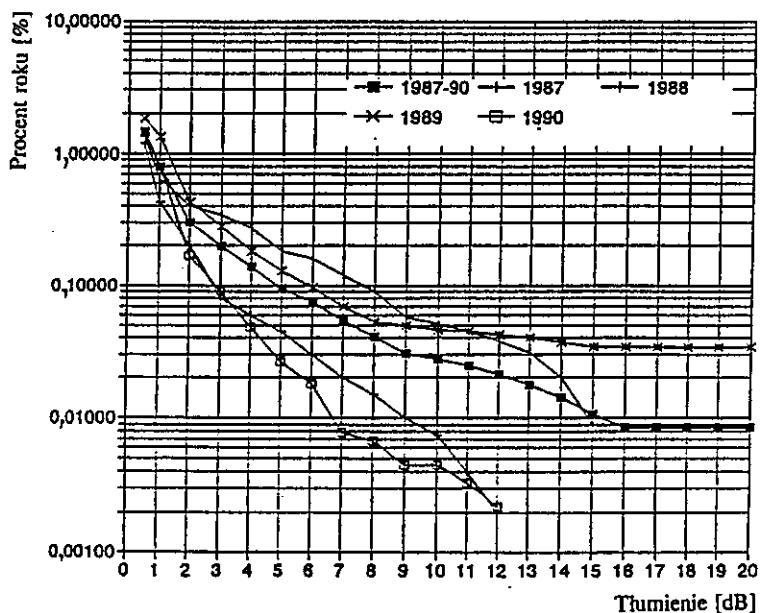
Rys. 6. Roczne rozkłady tłumień fali (11,5 GHz) w latach 1987 ÷ 1990 i ich średnioroczny rozkład na trasie satelitarnej Miedzeszyn - Łucz I dla wszystkich rodzajów opadu

Średnioroczny rozkład tłumienia fali wywołanego tylko przez deszcz, w latach 1987 ÷ 1990, przedstawiono w tabelicy 4.

Tablica 4

Rozkład tłumienia wywołanego przez deszcz w linii satelitarnej Łucz 1 - IŁ

| Prawdopodobieństwo występowania [%] | Tłumienie [dB] | Prawdopodobieństwo występowania [%] | Tłumienie [dB] |
|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|
| 0,3 | 0,66 | 0,01 | 5,37 |
| 0,2 | 0,92 | 0,005 | 7,80 |
| 0,1 | 1,52 | 0,003 | 9,90 |
| 0,05 | 2,21 | 0,002 | 11,46 |
| 0,03 | 2,90 | 0,001 | 14,37 |
| 0,02 | 3,66 | | |



Rys. 7. Rozkład tłumień fali dla najgorszego miesiąca z lat 1987 ÷ 1990 i ich średni najgorszy miesiąc na trasie satelitarnej Miedzeszyn - Łucz 1 dla wszystkich rodzajów opadu

3.3. Przeciwdziałanie szkodliwym efektom intensywnych opadów

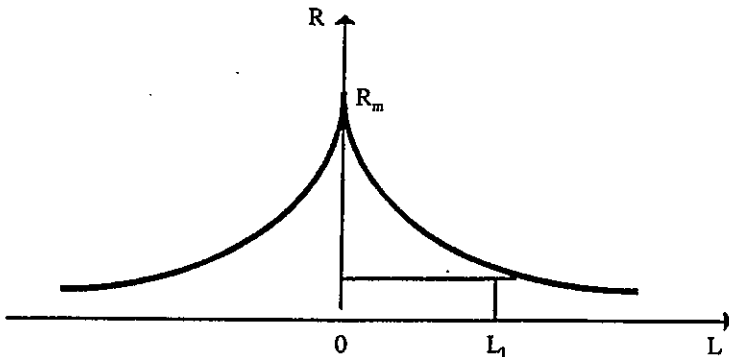
Opady z chmur konwekcyjnych (burzowych) są krótkotrwałe, lecz intensywne (przekraczają nieraz intensywność 100 mm/h). Krople deszczu (w postaci ciekłej) wznoszą się prawie do izotermy -15°C , gdyż jest to układ dynamiczny i krople deszczu są tylko przechłodzone. Wtedy intensywny opad występuje w postaci kolumny o średnicy $1\div 2$ km, sięgającej wówczas do wysokości 1 km, a nawet 2,5 km powyżej izotermy 0°C . Ta ostatnia wysokość odpowiada wysokości izotermy -15°C . W wyniku badań w różnych strefach klimatycznych świata przyjęto wykładniczy model intensywności opadu, wyrażony funkcją [36]:

$$R = R_m \exp(-\delta |L|), \quad (46)$$

gdzie: R_m - intensywność (rys. 8);

L - odległość od centrum w płaszczyźnie poziomej;

δ - współczynnik.



Rys. 8. Model wykładniczy opadu deszczu

R - intensywność opadu, L - odległość od centrum w płaszczyźnie poziomej

Średnicę kolumny D określa się przez promień L_1 , przy którym $R = 1$ mm/h:

$$D = 2L_1 = \frac{2 \ln(R_m)}{\delta} . \quad (47)$$

Skończone rozmiary kolumn deszczowych wywołujących silne tłumienia sugerują korzyści ze stosowania systemów zbiorczych przestrzenne. Ocenę korzyści daje łączny rozkład prawdopodobieństwa przekroczenia określonych tłumień, przedstawiony w zależności od odległości punktów odbiorczych. Ważna jest orientacja linii łączącej oba punkty względem głównego kierunku przemieszczania zjawisk burzowych i względem kierunku, z jakiego jest widziany satelita.

● Stacje naziemne z odbiorem zbiorczym

Do poprawy niezawodności pracy linii satelitarnych można stosować odbiór zbiorczy częstotliwościowy lub przestrzenny. Odbiór zbiorczy częstotliwościowy polega na tym, że stacja pracuje na dwóch różnych częstotliwościach. Umożliwia to wyeliminowanie zjawiska wielodrogowości, jakie występuje na trasach o bardzo małych kątach nachylenia.

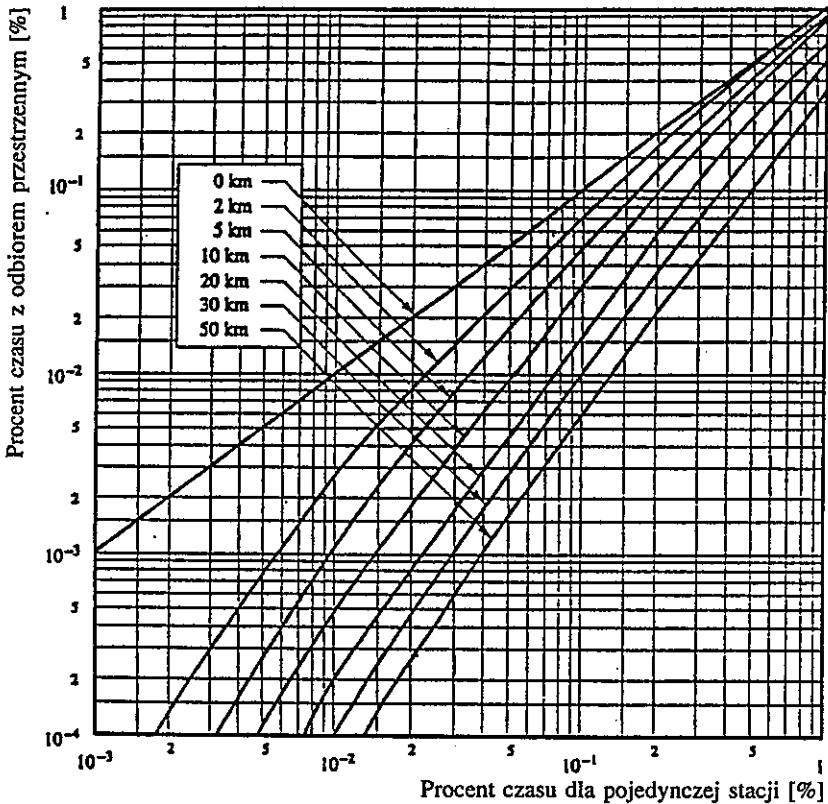
Aby uniezależnić się od opadów atmosferycznych, wykorzystuje się zależność rozmiarów kolumn deszczowych od intensywności opadu (48) i stosuje się systemy zbiorcze przestrzenne.

Odbiór zbiorczy przestrzenny polega na tym, że w danym obszarze pracuje kilka stacji (co najmniej dwie) w pewnych odległościach od siebie. Skuteczność odbioru zbiorczego przestrzennego jest funkcją odległości między stacjami. Współczynnik poprawy I dla stacji z odbiorem przestrzennym wyraża się zależnością [20]:

$$I = \frac{p_1}{p_2} = \frac{1}{(1 + \beta^2)} \left(1 + \frac{100 \beta^2}{p_1} \right) \approx 1 + \frac{100 \beta^2}{p_1}, \quad (48)$$

gdzie: p_1 i p_2 - procenty czasu odpowiednio dla pojedynczej stacji
i z odbiorem zbiorczym;

β - parametr zależny od właściwości linii (49).



Rys. 9. Zależność między procentem czasu z odbiorem przestrzennym (dla 2 stacji) i bez odbioru przestrzennego dla tego samego tłumienia dla trasy satelita - Ziemia [20]

Z dużej liczby pomiarów przeprowadzonych w zakresie częstotliwości 10 ÷ 20 GHz, a szczególnie 11÷13,6 GHz, określono zasadniczą zależność wartości β^2 od odległości d między stacjami, a słabą korelację z kątem elewacji i częstotliwością. Wyraża się to empiryczną zależnością:

$$\beta^2 = 10^{-4} d^{1,33} \quad (49)$$

Zależność tę między procentem czasu z odbiorem przestrzennym (dla 2 stacji) i bez odbioru przestrzennego dla tego samego tłumienia dla trasy satelita - Ziemia przedstawiono na rys. 9. Parametrem jest odległość między stacjami.

3.4. Zmiana polaryzacji fali przez niejednorodności atmosferyczne

W celu lepszego zagospodarowania widma radiowego jest stosowane powszechnie powtórne wykorzystanie częstotliwości przy użyciu ortogonalnych polaryzacji. Technikę tę ograniczają zjawiska depolaryzacji, pochodzące w szczególności od intensywnych opadów deszczu.

3.4.1. Polaryzacja fali

Kierunkiem polaryzacji fali nazywa się w radiotechnice kierunek wektora pola elektrycznego. Fala jest spolaryzowana liniowo, jeśli wektory pola elektrycznego leżą w płaszczyźnie polaryzacji, to jest w płaszczyźnie, w której leżą proste wyznaczające kierunek natężenia pola elektrycznego i kierunek rozchodzenia się fali. Fala jest spolaryzowana pionowo, gdy płaszczyzna polaryzacji jest prostopadła do powierzchni ziemi lub do innej płaszczyzny przyjętej za płaszczyznę odniesienia. Fala spolaryzowana liniowo może mieć polaryzację

poziomą lub skośną. W praktyce fala o polaryzacji liniowej czy kołowej nie istnieje. Przy polaryzacji skośnej wszystkie trzy wektory pola elektromagnetycznego są nachylone względem ziemi. Zakłada się, że istnieje fala płaska, której składowa o polaryzacji pionowej wyraża się wzorem:

$$E_{pion} = E_1 \cos\left(\omega t - \frac{x}{c}\right) \quad (50)$$

oraz przesunięcie względem niej w fazie o kąt ϕ składowej o polaryzacji poziomej:

$$E_{poz} = E_2 \cos\left(\omega t - \frac{x}{c} + \zeta\right), \quad (51)$$

gdzie: E_1, E_2 - amplituda;

ω - pulsacja;

t - czas;

x - odległość;

c - prędkość światła.

Inaczej mówiąc, istnieją dwie prostopadłe do siebie składowe natężenia pola przechodzące przez maksima i zero w różnych momentach. Wypadkowa takich dwóch składowych nie ma stałego kierunku, lecz wiruje w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali, obiegając elipsę. Równania (50) i (51) są równaniami parametrycznymi tej elipsy. Przy polaryzacji eliptycznej wypadkowa natężenia pola nigdy nie jest zerem, gdyż poszczególne składowe przechodzą przez zero w różnych chwilach. Otrzymuje się natężenie pola pulsujące między wartościami wyznaczonymi przez małą i dużą oś elipsy, przy czym chwilowy kierunek polaryzacji w danym miejscu jest zmienny. W ciągu jednego okresu w.cz. wypadkowa obiega elipsę dookoła, czyli wykonuje obrót o 360° .

Polaryzacja eliptyczna jest najbardziej ogólnym przypadkiem polaryzacji, gdyż tylko w szczególnych przypadkach elipsa polaryzacji może stać się kołem lub odcinkiem linii prostej; np. gdy E_1 i E_2 są równe oraz $\zeta = 90^\circ$, to elipsa przechodzi w koło i otrzymuje się polaryzację kołową.

3.4.2. Depolaryzacja

Występowanie cząstek opadu w atmosferze - dla linii satelitarnych pracujących powyżej 10 GHz - jest przyczyną powstawania ortogonalnej składowej fali. Deszcz nie tylko powoduje wzrost tłumienia, ale także i inne skutki, z których najważniejszym jest depolaryzacja.

Zjawisko depolaryzacji powstaje wskutek tego, że krople deszczu, pod wpływem wiatru, spadają z reguły pod kątem (do pionu) i nie są kuliste. Krople deszczu w trakcie opadania spłaszczają się tym bardziej, im większa jest ich średnica.

Wobec występowania gradientu pionowej prędkości wiatru, osie symetrii kropeł są odchylone od „pionu” (kierunku prostopadłego do kierunku propagacji fali i do poziomu). Najsilniejsze hamowanie wiatru występuje w przygruntowej warstwie atmosfery. W związku z tym jest tam najwyższy gradient pionowej prędkości wiatru i najsilniejsza zmiana polaryzacji fali. Również w chmurach burzowych występują silne odchylenia osi symetrii kropeł od pionu w obrębie znacznych fragmentów chmury.

Zjawisko to opisuje współczynnik dyskryminacji skrośnej XPD . Wylicza się go z rozkładów tłumień dla polaryzacji zgodnych CPA, a dla zakresu częstotliwości $8 \text{ GHz} \leq f \leq 35 \text{ GHz}$ i dla kątów elewacji $\theta \leq 60^\circ$. Procedura postępowania jest następująca.

Krok 1. Wylicza się czynnik c_f zależny od częstotliwości [20]:

$$c_f = 30 \lg f \quad (52)$$

dla $8 \leq f \leq 35 \text{ GHz}$

Krok 2. Oblicza się człon c_A zależny od tłumienia w deszczu [20]:

$$c_A = V(f) \lg A_p, \quad (53)$$

gdzie:

$$V(f) = 12,8f^{0,19} \quad \text{dla } 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz}$$

$$V(f) = 22,6 \quad \text{dla } 20 < f \leq 35 \text{ GHz}$$

A_p - tłumienie w deszczu występujące w zadanym procencie czasu, dla polaryzacji zgodnych.

Krok 3. Oblicza się współczynnik polaryzacji c_τ :

$$c_\tau = -10 \lg[1 - 0,484(1 + \cos 4\tau)], \quad (54)$$

gdzie: τ - kąt nachylenia wektora pola elektrycznego odniesiony do poziomu (dla polaryzacji kołowej $\tau = 45^\circ$).

Współczynnik $c_\tau = 0$ dla $\tau = 45^\circ$ i osiąga maksymalną wartość 15 dB dla $\tau = 0$ lub 90° .

Krok 4. Oblicza się człon zależny od kąta elewacji c_θ :
dla $\theta \leq 60^\circ$

$$c_\theta = -40 \lg(\cos \theta). \quad (55)$$

Krok 5. Oblicza się człon c_σ zależny od niepożądanego kąta przesunięcia:

$$c_\sigma = 0,0052 \sigma^2, \quad (56)$$

gdzie: σ - skuteczna standardowa dewiacja rozkładu niepożądanego kąta odchylenia kropli deszczu, wyrażona w stopniach; σ przyjmuje wartość 0° , 5° , 10° i 15° odpowiednio dla 1%, 0,1%, 0,01% i 0,001% roku.

Krok 6. Oblicza się XPD_{rain} deszczu nieprzekraczany dla danego procentu czasu [20]:

$$XPD_{rain} = c_f - c_A + c_\tau + c_\theta + c_\sigma . \quad (57)$$

Krok 7. Oblicza się człon c_{ice} zależny od kryształków lodu:

$$c_{ice} = XPD_{rain} \frac{(0,3 + 0,1 \lg p)}{2} \quad (58)$$

dla $8 \leq f \leq 35$ GHz

Krok 8. Oblicza się XPD_p nieprzekraczany dla danego procentu roku, uwzględniając wpływ lodu:

$$XPD_p = XPD_{rain} - c_{ice} . \quad (59)$$

Długoterminowe statystyczne rozkłady XPD otrzymane z pomiarów na jednej częstotliwości i takiego samego kąta polaryzacji mogą być przeskalowane na inne częstotliwości i inny kąt polaryzacji według pól empirycznej zależności:

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \lg \left[\frac{f^2 \sqrt{1 - 0,484 (1 + \cos 4 \tau_2)}}{f_1 \sqrt{1 - 0,484 (1 + \cos 4 \tau_1)}} \right] , \quad (60)$$

gdzie: XPD_1 i XPD_2 - wartości nieprzekraczalne w określonym procencie roku dla częstotliwości f_1 i f_2 oraz kątów polaryzacji τ_1 i τ_2 .

Jak widać z doświadczenia, istnieje silna korelacja między depolaryzacją w deszczu przy częstotliwościach 6 GHz i 4 GHz na trasach satelitarnych, aczkolwiek w dłuższym czasie depolaryzacja na trasie do satelity (*Uplink*) jest kompensowana na trasie do Ziemi (*Downlink*) [31].

Z badań w pasmie C wynika także, że 99% odchyień przebiega wolniej niż ± 4 dB/s i $\pm 1,5$ stopnia/s. Dlatego stała czasu kompensacji depolaryzacji systemu dla tych częstotliwości powinna być około 1 s. Jednak korelacja ta występuje tylko dla intensywnych opadów. W niektórych przypadkach, gdy depolaryzacja sygnałów nie może być wyraźnie skojarzona ze zjawiskiem deszczu, jest ona przypisywana działaniu chmur lodowych na trasie propagacji.

3.5. Scyntyłacje i zaniki wielodrogowe

Zagadnienia scyntyłacji i zaników wielodrogowych tylko zasygnalizowano w niniejszym opracowaniu, gdyż są to zjawiska praktycznie nie występujące na trasach satelitarnych na terytorium Polski - o kącie nachylenia $> 20^\circ$. Zjawisko wielodrogowości opisano w [5].

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi troposferę są: ciśnienie p (mierzone w hPa), temperatura bezwzględna T (mierzona w K) oraz wilgotność bezwzględna e .

Wartość współczynnika refrakcji w troposferze niewiele różni się od jedności. Dlatego ze względów praktycznych przyjęto posługiwać się tzw. wskaźnikiem refrakcji N , określonym w sposób następujący [22]:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 . \quad (61)$$

Wskaźnik współczynnika refrakcji zależy od wielkości meteorologicznych:

$$N = \frac{77,6}{T} \left(p + \frac{4180}{T} e \right) . \quad (62)$$

Wartość współczynnika refrakcji zależy od strefy klimatycznej, pory dnia i roku. Maleje ona z wysokością: na poziomie morza wy-

nosi około 290 jednostek N , na wysokości 10 km npm - około 90 jednostek N .

Przy analizie warunków propagacji jest konieczna znajomość rozkładu współczynnika refrakcji w środowisku. Zakrzywienie toru fali w atmosferze zależy od gradientu N w warstwie penetrowanej przez falę. Gradient N w warstwie od powierzchni gruntu do wysokości 50 ÷ 100 m określa zakrzywienie toru fali w liniach ziemskich, podczas gdy do projektowania linii satelitarnych oraz w zagadnieniach radiolokacji bardziej przydatny jest gradient N w warstwie od powierzchni gruntu do wysokości 500 ÷ 1 000 m. Gradient N ulega zmianie w czasie i przestrzeni, przy czym w warstwie przygruntowej zmienność jego jest największa. Najczęściej mediana gradientu N wynosi -40/km.

Wartość scyntytacji troposferycznych zależy od struktury zmian współczynnika refrakcji i wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości i długości trasy przez ośrodek, a maleje wraz ze zmniejszaniem się szerokości wiązki. Dla małych procentów roku czy dla dużych zaników (większych od 10 dB) obserwowanych przy małych kątach elewacji ($\leq 4^\circ$ i $\leq 5^\circ$ dla tras nad wodą) widać istotny wpływ scyntytacji. Można zauważyć również zaniki o charakterze podobnym do zaników wielodrogowych w ziemskich liniach radiowych [5], które są skorelowane z gradientem współczynnika refrakcji.

Metoda obliczania statystycznych rozkładów troposferycznej scyntytacji dla tras o kącie elewacji większym od 4° wykorzystuje średnie miesięczne (lub z dłuższego okresu) temperatury t [$^\circ\text{C}$] i wilgotności względnej H oraz dane klimatyczne charakterystyczne dla danego miejsca.

Krok 1. Dla wartości t wylicza się ciśnienie nasycenia pary wodnej e_s , [19]:

$$e_s = a \exp\left(\frac{bt}{t + c}\right), \quad (63)$$

gdzie: t - temperatura [$^{\circ}\text{C}$];

| | |
|------------------|------------------|
| dla wody: | dla lodu: |
| $a = 6,1121$ | $a = 6,1115$ |
| $b = 17,502$ | $b = 22,452$ |
| $c = 240,97$ | $c = 272,55$ |

Krok 2. Oblicza się człon refrakcji N_{wet} z zależności:

$$N_{wet} = 3,732 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (64)$$

gdzie: e - ciśnienie pary wodnej [hPa];

T - temperatura bezwzględna [K].

Krok 3. Oblicza się standardową dewiację amplitudy sygnału σ_{ref} z zależności [20]:

$$\sigma_{ref} = 3,6 \cdot 10^{-3} + N_{wet} \cdot 10^{-4}. \quad (65)$$

Krok 4. Oblicza się efektywną długość trasy L [20]:

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2\theta + 2,35 \cdot 10^{-4}} + \sin\theta}, \quad (66)$$

gdzie: h_L - wysokość warstwy turbulencyjnej; można przyjąć

$$h_L = 1\,000 \text{ m.}$$

Krok 5. Oblicza się efektywną średnicę anteny D_{eff} , mając daną jej średnicę geometryczną D i sprawność η :

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} D. \quad (67)$$

Krok 6. Oblicza się współczynnik uśrednienia anteny $g(x)$ z zależności [18]:

$$g(x) = \sqrt{3,86(x^2 + 1)^{\frac{11}{12}} \sin\left[\frac{11}{6} \arctg \frac{1}{x}\right] - 7,08x^{\frac{5}{6}}}, \quad (68)$$

gdzie:

$$x = 1,22 D_{eff}^2 \left(\frac{f}{L}\right),$$

f - częstotliwość nośnej [GHz].

Krok 7. Oblicza się standardowe odchylenie dla rozważanego okresu i trasy propagacyjnej:

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{\frac{7}{12}} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1,2}}. \quad (69)$$

Krok 8. Oblicza się współczynnik procentu czasu $a(p)$ dla danego procentu roku p zawartego w przedziale $0,01 < p \leq 50$:

$$a(p) = -0,061 \lg p^3 + 0,072 \lg p^2 - 1,71 \lg p + 3,0. \quad (70)$$

Krok 9. Oblicza się głębokość zaników scyntylacyjnych w danym procencie roku p :

$$A_s(p) = a(p) \sigma. \quad (71)$$

Powyższa procedura obliczania miesięcznych i długoterminowych statystycznych scyntylacji amplitudy jest przetestowana dla zakresu częstotliwości od 7 GHz do 14 GHz, ale jej stosowanie jest zalecane do 20 GHz.

Chociaż tłumienie w deszczu jest dominujące w zakresie częstotliwości większych od 10 GHz, to jednak efekt scyntylacji nie po-

winien być pomijany, szczególnie dla kątów elewacji mniejszych od 10° . W tym przypadku całkowite tłumienie A sygnału można wyliczyć z zależności:

$$A(p) = \sqrt{A_R^2(p) + A_s^2(p)}, \quad (72)$$

gdzie: A_R - tłumienie w deszczu [dB];

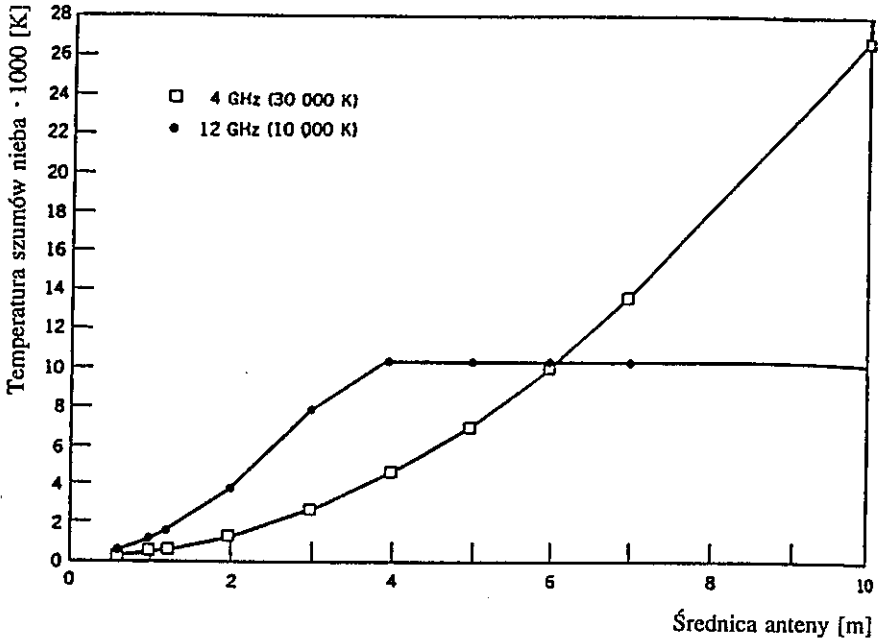
A_s - tłumienie wywołane scyntyllacją.

3.6. Zakłócenia stacji satelitarnej przez Słońce

W okresie wiosny i jesieni są takie dni, w których w porze południowej (zależy od położenia satelity) odbiór programów satelitarnych ulega zauważalnemu pogorszeniu. Słońce znajduje się wtedy - patrząc z punktu widzenia danej instalacji antenowej - dokładnie za satelitą. Oddziałujące wówczas na zestaw odbiorczy promieniowanie Słońca powoduje wzrost szumów pogarszających jakość odbioru. Pora dnia, w jakiej to zjawisko można zaobserwować, zależy z jednej strony od położenia satelity, na którego jest skierowana antena, a z drugiej strony od miejscowości, w której ta antena jest zainstalowana.

Słońce emituje widmo elektromagnetyczne w zakresie wszystkich częstotliwości, a więc zawiera ono także promieniowanie radiowe z pasma mikrofalowego. Promieniowanie to wytwarza szum w liniach satelitarnych, szczególnie gdy Słońce znajduje się w wiązce anteny odbiorczej. Średnica kątowa Słońca widziana z Ziemi wynosi $0,5^\circ$ i przesuwana się $0,5^\circ$ w ciągu 2 minut [16], stąd interferencja Słońca ze stacją naziemną trwa tylko kilka minut w określonym dniu. Na rys. 10 pokazano temperaturę szumów nieba w czasie, gdy antena jest skierowana dokładnie na Słońce. Jest to najgorszy z możliwych przypadków i powoduje zwykle przerwę w pracy systemu.

Należy zauważyć, że efekt ten jest niezwykle groźny dla anten o większych średnicach. Mniejsze anteny mają większe szerokości wiązki i $0,5^\circ$ średnica kątowa Słońca zajmuje tylko niewielką część wiązki. Słońce jest otoczone zimną przestrzenią, która neutralizuje jego efekt.



Rys. 10. Temperatura szumów nieba, gdy Słońce jest w wiązce anteny stacji naziemnej [16]

Już antena paraboliczna średnicy 4 m na częstotliwości 12 GHz „widzi” pełną tarczę Słońca (rys. 10). Efekt ten jest szczególnie widoczny w niższych zakresach częstotliwości - pasma *L* i *S* - gdzie stosuje się anteny o większych średnicach (proporcjonalnie do długości fali).

3.7. Opóźnienie w liniach satelitarnych

Sygnał radiowy rozchodzi się z prędkością światła. To oznacza, że powstaje opóźnienie między sygnałem wysyłanym i odbieranym. Czas opóźnienia sygnału t między satelitą i stacją naziemną wynosi:

$$t = \frac{L}{c}, \quad (73)$$

gdzie: L - długość trasy [km];

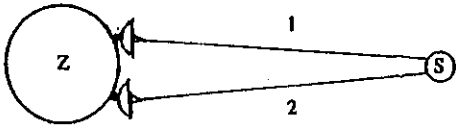
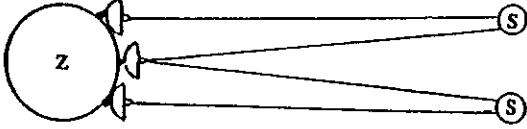
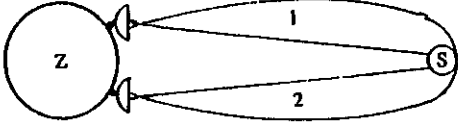
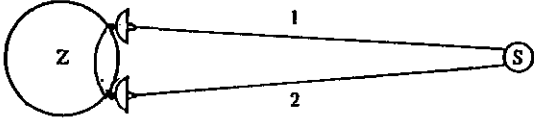
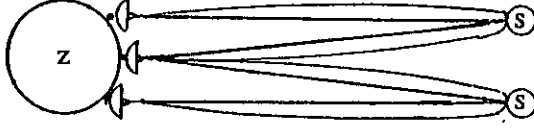
c - prędkość światła 299,792 km/s.

Odległość satelity geostacjonarnego od Ziemi wynosi od 35 786 km do 41 679 km. Pierwsza wartość to odległość, gdy stacja naziemna jest w punkcie podsatelitowym, natomiast druga - gdy stacja naziemna „widzi” satelitę pod kątem 0° elewacji. To odpowiada czasowi opóźnienia między satelitą i Ziemią od 0,1193 s do 0,1389 s. Zwykle linie satelitarne zawierają pojedynczy skok, tj. od jednego odbiorcy do drugiego (Ziemia - satelita - Ziemia) i z powrotem (przez inne linie Ziemia - satelita - Ziemia). Całkowity czas opóźnienia zawiera się między 0,477 s i 0,556 s. Stłumienie echa wymaga specjalnej aparatury, ponieważ lokalne telefony wykorzystują tylko jedną parę drutów do odbioru i nadawania. Do wyeliminowania tego zjawiska są używane przyrządy kontroli echa.

W tablicy 5 pokazano kilka możliwych tras satelitarnych do transmisji bez echa (transmisja tylko do odbiorcy, np. telewizja rozsiewcza) oraz transmisji z pojedynczym i podwójnym skokiem, a także w łączności, wykorzystującej łącze satelitarne i naziemne.

Zmienność opóźnienia jest istotna dla cyfrowych satelitarnych systemów komunikacyjnych. Dla zakresu poniżej 10 GHz jonosferyczny czas opóźnienia jest z reguły mniejszy niż troposferyczny, chociaż w pewnych przypadkach powinien być on również uwzględniany. Generalnie, dla satelitów telekomunikacyjnych dodatkowy czas opóźnienia powodowany przez elementy opadu może być pominięty.

Opóźnienie powstałe w łączach satelitarnych

| | |
|---|---|
| 1. Transmisja jednokierunkowa (bez echa) | |
|  | <p>Pojedynczy skok, dwukrotne opóźnienie na trasie ok. 80 000 km - 267 ms</p> |
|  | <p>Podwójny skok, czterokrotne opóźnienie na trasie ok. 160 000 km - 533 ms</p> |
| 2. Transmisja dwukierunkowa (z echem) | |
|  | <p>Pojedynczy skok, czterokrotne opóźnienie na trasie ok. 160 000 km - 533 ms</p> |
|  | <p>„Pół skoku”, dwukrotne opóźnienie + naziemne całkowite ok. 300 ms</p> |
|  | <p>Podwójny skok, ośmiokrotne opóźnienie na trasie około 320 000 km - 1,1 s</p> |
| <p>Objaśnienia: Z - Ziemia; S - satelita</p> | |

3.8. Dezogniskowanie wiązki energii promieniowanej

Regularny spadek wskaźnika refrakcji ze wzrostem wysokości powoduje zakrzywienie toru fali i objawia się jako dezogniskowanie wiązki fal radiowych oraz prowadzi do błędu kąta nacelowania anteny odbiorczej czy nadawczej. Efekt ten wzrasta przy malejącym kącie elewacji, gdy droga fali przez atmosferę wydłuża się. Straty dezogniskowania A_{bs} mogą być pominięte przy kątach elewacji większych od 3° dla szerokości geograficznych mniejszych od 53° i kątów większych, rzędu 6° , dla wyższych szerokości geograficznych. Dla wszystkich szerokości geograficznych - a szczególnie mniejszych od 53° - straty dezogniskowania dla średniego roku i kątów elewacji mniejszych od 5° można określić [20]:

$$A_{bs} = 2,27 - 1,16 \lg(1 + \theta_0) , \quad (74)$$

gdzie: θ_0 - pozorny kąt [mrad] wywołany efektem refrakcji.

Dla szerokości geograficznych większych od 60° straty dezogniskowania dla kątów elewacji mniejszych od 6° w średnim najgorszym miesiącu można określić:

$$A_{bs} = 13 - 6,4 \lg(1 + \theta_0) . \quad (75)$$

Dla szerokości geograficznych większych Ψ między 53° i 60° , medianą stratę dezogniskowania można oszacować przez liniową interpolację dwóch powyższych równań (A_{bs} dla $< 53^\circ$ i $> 60^\circ$) jako [20]:

$$A_{bs} = A_{bs(> 60^\circ)} - \frac{60}{7} \Delta A_{bs} + \frac{1}{7} \Delta A_{bs} \Psi , \quad (76)$$

gdzie:

$$\Delta A_{bs} = A_{bs(> 60^\circ)} - A_{bs(< 53^\circ)} .$$

Duży problem stanowi również pozorny błąd kąta elewacji w związku z wymaganą dokładnością nacelowania anten w systemach satelitarnych. Błąd kąta elewacji wywołany refrakcją wynosi $0,65^\circ$, $0,35^\circ$ i $0,35^\circ$ odpowiednio dla kątów elewacji 1° , 3° i 5° dla tropikalnego klimatu nadmorskiego. Dla polarnego klimatu kontynentalnego wartości te wynoszą odpowiednio $0,44^\circ$, $0,25^\circ$ i $0,17^\circ$. Dla innych klimatów wartości błędu kąta elewacji zawierają się między tymi ekstremalnymi wartościami. Dobowe zmiany wskaźnika refrakcji powodują wahania tego kąta ok. $0,1^\circ$ przy kącie elewacji 1° , ale gwałtownie zmniejszają się ze wzrostem kąta elewacji.

3.9. Tłumienie przez burze piaskowe

Bardzo mało znany jest efekt wpływu elementów piasku czy pyłu na radiowe sygnały dla tras nachylonych. Dostępne dane wskazują, że na częstotliwościach poniżej 30 GHz wysoka koncentracja cząstek, a także duża wilgotność powodują znaczące efekty propagacyjne. W celu opisu ilościowego tego zjawiska są konieczne dalsze badania.

WYKAZ LITERATURY

1. Arbesser-Rastburg B., Paraboni A.: European Research on Ka-band Slant Path Propagation. Proc. IEEE, No. 6, 1997.
2. Bogucki J.: Badanie depolaryzacji. VI Krajowe Sympozjum Nauk Radiowych URSI, Warszawa, 17 marca 1990.
3. Bogucki J.: Deszcz a propagacja mikrofal w troposferze. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 10, 1993.
4. Bogucki J.: Satelita - jego radiolatarnia, stabilizacja i propagacja. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 4, 1997.

5. Bogucki J.: Wpływ warunków propagacji na niezawodność pracy horyzontowych linii radiowych. *Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne*, nr 3, 1997.
6. Bogucki J., Dusiński A.: Pomiary radiometryczne. *Biuletyn Informacyjny IŁ*, nr 9, 1995.
7. Bogucki J., Kawecki A., Kocimowski B., Skonieczny W.: Doświadczalny ośrodek badań propagacji mikrofal na trasach horyzontowych i satelitarnych. *Referaty Problemowe IŁ*, z. 89, 1987.
8. Bogucki J., Wielowieyska E.: Tłumienie dodatkowe w łączy satelitarnym. *Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne*, nr 1, 1998.
9. Brussard A.: A meteorological model of rain-induced cross polarization. *Antennas and Propagation*, No. 1, 1976.
10. Crane R.K.: Comparative evaluation of several rain attenuation prediction models. *Radio Science*, No. 4, 1985.
11. Crane R.K.: Prediction of attenuation by rain. *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-28, 1980.
12. Crane R.K., Dissanayake A.W.: ACTS propagation experiment: Attenuation Distribution Observations and prediction model comparisons. *Proc. IEEE*, No. 6, 1997.
13. Elbert R.B.: *Introduction of satellite communication*. Artech House, Norwood, 1987.
14. Feldhake G.: Estimating the Attenuation due to Combined Atmospheric Effects on Modern Earth-Space Paths. *Antennas & Propagation Magazine*, No. 4, 1997.
15. Fiser O., Rezacova D.: Diurnal and seasonal variations of water vapour and cloud water attenuation in microwave frequency bands. *Radioengineering*, No. 6, 1997.
16. Gordon G.D., Morgan W.L.: *Principles of communications satellites*. John Wiley & Sons Inc., New York 1993.
17. ITU-R, Rec. 676-3: Attenuation by atmospheric gases in the frequency range 1 ÷ 350 GHz. Geneva 1995.

18. ITU-R, Rec.678-1: Characterization of the natural variability of propagation phoneme. Geneva 1994.
19. ITU-R, Rec. P.453: The radio refractive index: its formula and refractivity data. Geneva 1997.
20. ITU-R, Rec. P.618.5: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunications systems. Geneva 1997.
21. ITU-R, Rec.837-1: Characteristics of precipitation for propagation modelling. Geneva 1995.
22. ITU-R, Rec.837-2: Effects of tropospheric refraction on radio-wave propagation. Geneva 1995.
23. ITU-R, Rec.838: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Geneva 1994.
24. ITU-R, Rec.840-1: Attenuation due to clouds and fog. Geneva 1994.
25. Kantor L.Y.: Handbook of satellite telecommunication and broadcasting. Artech House, Norwood, 1987.
26. Kawecki A.: Charakterystyki tłumieniowe propagacji fal na częstotliwościach 11,5 i 18,6 GHz podczas deszczu na trasie 15,4 km w pobliżu Warszawy. Prace IŁ, nr 108, 1997.
27. Kawecki A.: Korelacja intensywności deszczu z tłumieniem mikrofal. Prace IŁ, nr 108, 1997.
28. Kawecki A.: Niektóre aspekty przewidywania tłumienia fali wywołanego przez deszcze oraz korelacja intensywności deszczu z tłumieniem. Prace IŁ, nr 104, 1995.
29. Kawecki A.: Wieloletnie charakterystyki intensywności deszczu w Miedzeszynie na potrzeby radiokomunikacji. Prace IŁ, nr 106, 1996.
30. Lepper P.: Sattech. Technika telewizji satelitarnej. Przedsiębiorstwo Techniczne HARPO Sp. z o.o., Gliwice 1991.
31. Nowland W.L., Olsen R.L., Shkarofsky I.P.: Theoretical relationship between rain depolarization and attenuation. Electronic Letters, No. 22, 1977.

32. Oguchi T.: Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and anther hydrometers. Proc. IEEE, No. 9, 1983.
33. Ogulewicz S.: Wpływ troposfery na propagację fal radiowych w relacjach Ziemia-satelita-Ziemia. Postępy Astronautyki, nr 12, 1979.
34. PN-91E-04555/22: Polska norma: Warunki środowiskowe występujące w przyrodzie. Opady atmosferyczne i wiatr.
35. Skonieczny W.: Pomiar intensywności deszczu dla potrzeb radiokomunikacji. Prace IŁ, nr 95, 1987.
36. Stutzman W.L., Dishman W.K.: A simple model for estimation of rain induced attenuation along earth - space paths at millimetre wavelengths. Radio Science, No. 6, 1982.