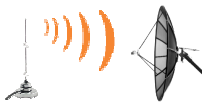
Propagacja w wolnej przestrzeni



$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi \cdot r^2} \cdot A_S$$

przy odbiorze na kierunku maksymalnego promieniowania :

$$G_{\max} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_S \quad \rightarrow \quad P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_{R\max} \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2$$

Propagacja w wolnej przestrzeni

W ogólnym przypadku (odbiór sygnału na dowolnym kierunku) :

Równanie Friisa :

$$\boxed{P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2}$$

Tłumienie wolnej przestrzeni FSL (Free Space Loss) :

$$G_T = G_R = 1 \quad \rightarrow \quad FSL = \frac{P_T}{P_R} = \left(\frac{4\pi \cdot r}{\lambda} \right)^2$$

W mierze decybelowej:

$$FSL_{dB} = 32.44 + 20 \log r_{km} + 20 \log f_{MHz}$$

Zjawiska propagacyjne

Interferencja

Odbicie

Załamanie (refrakcja)

Rozproszenie

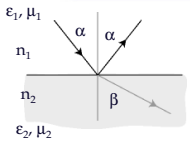
Dyfrakcja

Odbicie i załamanie

Prawa Snella (Snelliusa):

1. równość kątów padania i odbicia
2. prawo załamania:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}}{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}} = \frac{n_2}{n_1}$$



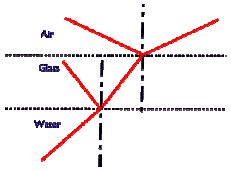
- współczynnik załamania w atmosferze:

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6}$$

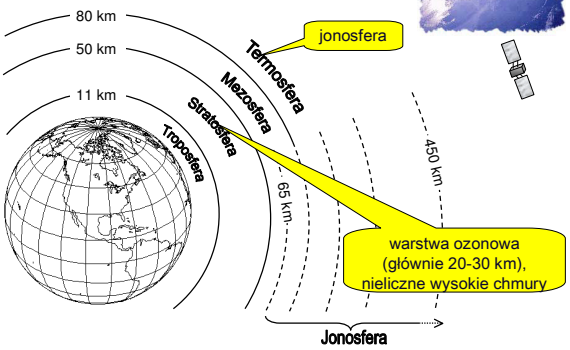
- wskaźnik refrakcji:

$$N = \frac{77.6}{T}(p + 22.2 \cdot \rho)$$

T – temperatura powietrza [K]
p – ciśnienie atmosferyczne [hPa]
ρ – gęstość pary wodnej [g/m³]



Atmosfera ziemska



Skład atmosfery

- Azot 78,09%
- Tlen 20,95%
- Argon 0,93%
- CO_2 0,035 -0,038%
- para wodna
- pozostałe

Parametry atmosfery

Propagacja fali radiowej

Rozchodzenie się fali w atmosferze ziemskiej:

- Dzięki zróżnicowanemu wpływowi atmosfery na propagację w zależności od częstotliwości możemy rozróżnić różne mechanizmy propagacji fali:
  - Fala troposferyczna (mały zasięg ale większy niż optyczny horyzont, fale ultrakrótkie);
  - Fala jonosferyczna (duży zasięg, fale krótkie);
- W radiokomunikacji satelitarnej istotny wpływ mają warstwy : troposfera i jonosfera

Troposfera #1

- Jest dolną warstwą atmosfery rozciągająca się od 8 (bieguny) -16km(równik)
- Skład gazów w miarę stały z wyjątkiem pary wodnej, jej zawartość zależy od czynników metrologicznych i maleje z wysokością. W troposferze gromadzi się ok. 90% pary wodnej atmosfery.
- Temperatura maleje z wysokością ok. 6°C/km, zdarzają się jednak inwersje temperatury.

Troposfera #2

- tłumienie sygnału w gazach atmosferycznych (głównie O_2 i H_2O)
- wpływ opadów oraz obecności chmur i mgieł
- tłumienie wywołane przez burze piaskowe
- scyntylacje
- przeniki polaryzacyjne
- wpływ refrakcji atmosferycznej: rozproszenie wiązki antenowej, zmiana kąta natarcia

Troposfera #3

- Współczynnik refrakcji zależy od ciśnienia, temperatury i wilgotności a ponieważ parametry te zmieniają się z wysokością współczynnik też się zmienia (możliwe są inwersje wartości) - troposfera jest silnie niejednorodna
- dukty troposferyczne
- Troposfera standardowa $N(h)=289e^{-0,136h}$

Troposfera #4

- W radiokomunikacji satelitarnej pierwszorzędne znaczenie ma tłumienie a refrakcja drugorzędne(inaczej niż dla komunikacji przyziemnej, gdzie refrakcja decyduje o zasięgu)
- W troposferze tłumieniu podlegają szczególnie fale o częstotliwości większej niż ok. 3GHz

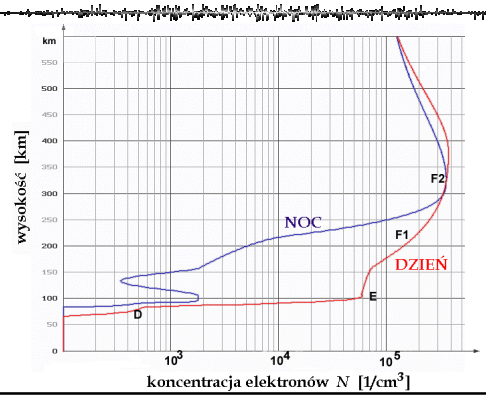
Jonosfera

- warstwa obejmująca prawie całą termosferę:
  - dolna granica: ok. 80 km
  - górna granica: 300 – 800 km
- silna koncentracja jonów i wolnych elektronów
- niejednorodność i niestacjonarność
- procesy jonizacji (prom. słoneczne: UV i X) i rekombinacji, wpływ deszczów meteorytów
- wpływ jonosfery na fale radiowe:
  - odbijanie fal radiowych
  - zjawisko Faradaya -> przeniki polaryzacyjne
- współczynnik załamania: $n^2 = 1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2$
- częstotliwość plazmowa: $f_p = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{N \cdot q_e^2}{\varepsilon_0 \cdot m_e}}$

N -> koncentracja wolnych elektronów

q_e i m_e -> ładunek i masa elektronu

Jonosfera



Rekomendacje ITU-R

International Telecommunication Union (ITU) – www.itu.int

- urząd podległy ONZ
- grupy rekomendacji:
  - ITU-T: Telecom Standardization
  - ITU-D: Telecom Development
  - **ITU-R: Radiocommunication**
- ITU-R: zalecenia dotyczące wykorzystania częstotliwości radiowych, projektowania i działania systemów radiowych, propagacji fal radiowych, kwestii bezpieczeństwa
- 15 serii rekomendacji ITU-R, m.in. S – *Fixed satellite service*, SM – *Spectrum management*, M – *Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services*, **P – *Radiowave propagation***
- numeracja dokumentów:
  np. ITU-R P.618-7 -> projektowanie łączy satelitarnych

Tłumienie w gazach atmosferycznych

Absorpcja: energia jest pochłaniana i ponownie emitowana we wszystkich kierunkach. Zmianie ulega zazwyczaj długość fali.

Rozpraszanie: długość fali pozostaje niezmieniona, lecz zmianie ulega kierunek. Część wiązki fali EM nie dociera do odbiornika.

Tłumienie w gazach atmosferycznych

Zależy od:
- częstotliwości,
- temperatury,
- kąta elewacji,
- wysokości nad poziomem morza,
- gęstości pary wodnej (wilgotności bezwzględnej).

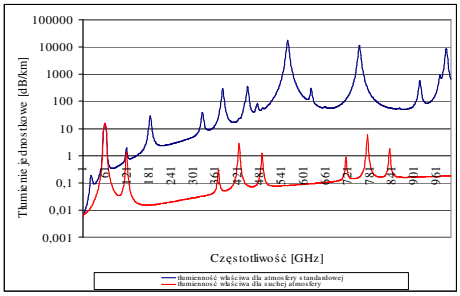
Dla częstotliwości poniżej 10 GHz może zostać zaniedbane.

Istotne dla częstotliwości powyżej 10 GHz i dla małych kątów elewacji.

Tłumienie w gazach atmosferycznych

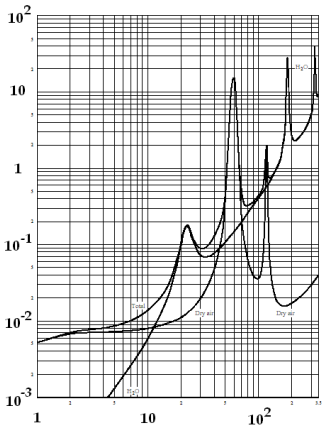
- Tłumienie atmosfery nie jest jednakowe w całym obszarze widma,
- Istnieją obszary częstotliwości – tak zwane „okna” – dla których tłumienie jest znacznie mniejsze (tak samo jak dla włókna światłowodowego)

Tłumienie w gazach atmosferycznych



Tłumienie jednostkowe [dB/km] powietrza suchego (*dry air*) i pary wodnej (H_2O) w funkcji częstotliwości f [GHz]

p = 1013 hPa
T = 15°C
ρ = 7.5 g/m^3



Tłumienie w gazach atmosferycznych

- ciągłe widmo absorpcyjne dla wody (zmierzono eksperymentalnie)
- sumowanie wpływu linii widmowych dla powietrza i pary wodnej
- nierezonansowe widmo Debye'a poniżej 10GHz
- Zakres stosowania do 1000 GHz

Tłumienie w gazach atmosferycznych

$$\begin{cases} n = \dfrac{c}{v} \\ \tilde{n} = n_R(f) - jn''(f) \\ \vec{\hat{E}}(r,t) = e^{j\omega(t - \frac{\tilde{n}}{c}\vec{k}\cdot\vec{r})} \end{cases}$$

Współczynnik załamania

$$\vec{\hat{E}}(r,t) = e^{j\omega(t - \frac{n_R(f) + jn''(f)}{c}\vec{k}\cdot\vec{r})} = \underbrace{e^{-\frac{n''(f)}{c}\vec{k}\cdot\vec{r}}}\, e^{j\omega(t - \frac{n_R(f)}{c}\vec{k}\cdot\vec{r})}$$

Współczynnik tłumienia

Tłumienie w gazach atmosferycznych

Tłumienie w gazach [dB]

$$A_g = \gamma \cdot R_{km}$$

Tłumienność właściwa [dB/km]

Długość ścieżki w [km]

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_w = 0{,}1820 f \; N''(f)$$

Częstotliwość [GHz]

Tłumienie w gazach atmosferycznych

Współczynnik kształtu linii

Widmo nierezonansowe dla tlenu

Widmo nierezonansowe dla pary wodnej

$$N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f) + N''_W(f)$$

Moc linii

$$\sum_i S_{iO_2} F_{iO_2} + \sum_j S_{jV} F_{jV}$$

Tłumienie w gazach atmosferycznych

Ciśnienie suchego powietrza [hPa]

$$\theta = \frac{300}{T}$$

Uwaga:
Ciśnienie atmosferyczne
P [hPa]= p+e

$$S_{io_2} = a_1 \times 10^{-7}\, p\, \theta^3 \exp[a_2(1-\theta)]$$

Współczynniki z tab. 1 ITU-R P. 676

T - temperatura [K]

Tłumienie w gazach atmosferycznych

$$e = \frac{\rho T}{216{,}7}$$

$$\theta = \frac{300}{T}$$

$$S_{iv} = b_1 \times 10^{-1}\, e\, \theta^{3,5} \exp[b_2(1-\theta)]$$

Współczynniki z tab. 2 ITU-R P. 676

T - temperatura [K]

ρ – gęstość pary wodnej [g/m^3] (ITU-R P. 836)

Tłumienie w gazach atmosferycznych

Częstotliwość [GHz]

$$\delta = (a_5 + a_6\theta) \times 10^{-4}\, p\, \theta^{0,8}$$

$$F_{iO_2} = \frac{f}{f_i}\left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2}\right]$$

$$\Delta f = a_3 \times 10^{-4}\left(p\, \theta^{(0,8-a_4)} + 1{,}1\, e\, \theta\right)$$

Częstotliwość i-tej linii

Tłumienie w gazach atmosferycznych

Częstotliwość [GHz]

$$F_{iv} = \frac{f}{f_i}\left[\frac{\Delta f}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2}\right]$$

$$\Delta f = b_3 \times 10^{-4}\left(p\, \theta^{b_4} + b_5\, e\, \theta^{b_6}\right)$$

Częstotliwość i-tej linii

Tłumienie w gazach atmosferycznych

$$N''_D(f) = f\, p\, \theta^2 \left[\frac{6{,}14 \times 10^{-5}}{d\left[1 + \left(\frac{f}{d}\right)^2\right]} + 1{,}4 \times 10^{-12}\left(1 - 1{,}2 \times 10^{-5}\, f^{1,5}\right) p\, \theta^{1,5}\right]$$

$$d = 5{,}6 \times 10^{-4}\,(p + 1{,}1\, e)\,\theta$$

Tłumienie w gazach atmosferycznych

$$N_W''(f) = f\left(3{,}57\ \theta^{7,5}\ e + 0{,}113\ p\right)10^{-7}\ e\ \theta^3$$

Tłumienie w gazach atmosferycznych

- Obliczenia do wysokości ok. 100 km
- podział atmosfery na warstwy o grubości rosnącej wykładniczo od 10 cm przy powierzchni do 1km na wys. 100 km

Tłumienie w gazach atmosferycznych

Wysokość stacji

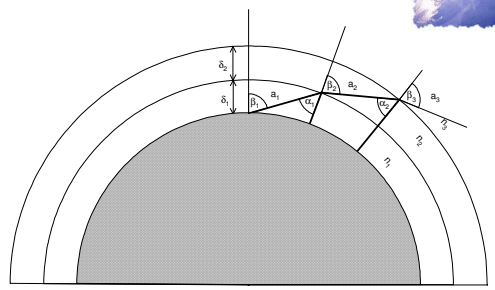
Kąt elewacji

$$A(h,\vartheta) = \int_h^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin\Phi}\, dH$$

Promień ziemski

$$\Phi = arc\cos\left(\frac{(r+h)n(h)\cos\vartheta}{(r+H)n(H)}\right)$$

Tłumienie w gazach atmosferycznych



Tłumienie przez opady i chmury

Tłumienie może być spowodowane przez:

- deszcz
- śnieg
- grad
- mgłę
- chmury

Może być zaniedbane dla częstotliwości poniżej 5 GHz.

Jego znaczenie wzrasta gwałtownie dla wyższych częstotliwości.

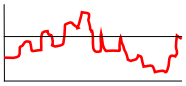
Deszcz w ujęciu statystycznym #1

Rodzaje modeli opadowych:

- Oparte na pomiarach tłumienia
- Oparte na syntezie tłumienia na bazie danych meteorologicznych

Deszcz w ujęciu statystycznym #2

Chwilowe natężenie opadów:



- [mm/h]
- czas obserwacji 1 min

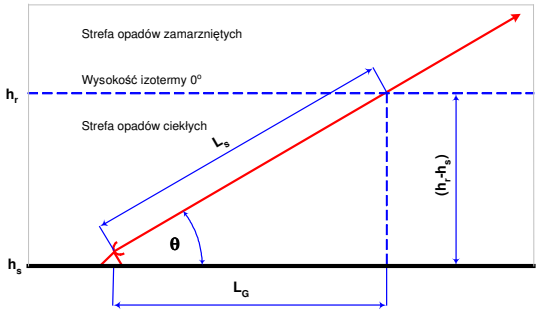
- Wymagany okres gromadzenia danych
- Przez jaki czas w ciągu roku chwilowe natężenie opadów przekracza daną wartość?
  - czyli: przez jaki czas w ciągu roku system będzie niedostępny z powodu opadów?

Cechy modelu opadowego

Model opadowy musi ujmować:

- Struktura pozioma opadu
- Struktura pionowa opadu
- Intensywność opadów

Struktura opadu wg ITU



Metoda ITU-R (wg P.530)

- *Step 1*: wyznaczyć wysokość kolumny deszczu
- *Step 2:* określić długość ścieżki w kolumnie deszczu
- *Step 3*: wyznaczyć długość rzutu poziomego ścieżki
- *Step 4*: wyznaczyć intensywność deszczu przekraczaną dla 0,01% średniego roku obliczyć tłumienie przekraczane dla 0,01% średniego roku
- *Step 5*: określić współczynnik skrócenia ścieżki r_{001}
- *Step 6*: wyznaczyć tłumienność właściwą zależną od częstotliwości, polaryzacji i intensywności deszczu
- *Step 7*: wyznaczyć wartość tłumienia nie przekraczaną przez p% czasu w skali roku

Wyznaczanie tłumienia #1

Obliczenie wysokości kolumny deszczu $\mathbf{h_R}$ [km] w zależności od szerokości geograficznej $\boldsymbol{\varphi}$:

$$\mathbf{h_R}\ [\mathrm{km}] = \begin{cases} 5 - 0{,}075(\varphi - 23) & \text{dla} \quad \varphi > 23^0\mathrm{N} \\ 5 & \text{dla} \quad 0^0 \le \varphi \le 23^0\mathrm{N} \\ 5 & \text{dla} \quad 0^0 \ge \varphi \ge -21^0\mathrm{S} \\ 5 + 0{,}1(\varphi + 21) & \text{dla} \quad -71^0 \le \varphi \le -21^0\mathrm{S} \\ 0 & \text{dla} \quad \varphi < -71^0\mathrm{S} \end{cases}$$

Wyznaczanie tłumienia #2

Obliczenie długości ścieżki $\mathbf{L_S}$ [km] w kolumnie deszczu :

dla $\boldsymbol{\theta} \ge 5^0$

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\sin\theta}$$

dla $\boldsymbol{\theta} < 5^0$

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{\sqrt{\sin^2\theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e}} + \sin\theta}$$

Wyznaczanie tłumienia #3

Obliczenie długości rzutu poziomego ścieżki w kolumnie deszczu:

$$\mathbf{L_G} = L_S \cos\theta$$

Wyznaczanie tłumienia #4

Wyznaczenie intensywności deszczu $R_{0,01}$ przekraczanej dla 0,01% czasu w średnim roku (na podstawie ITU-R P.837)

- metoda 1 (mniej dokładna): odczyt wartości $R_{0,01}$ z map zawartych w ITU-R 837
- metoda 2 (bardziej dokładna): obliczenie wartości $R_{0,01}$ na podstawie danych zebranych w ciągu 15 lat przez ECMWF (Europejskie Centrum Prognoz Pogody)

Wyznaczanie R0.01 #4.1

- Pliki:
  „ESARAINPR6.TXT”,
  „ESARAIN_MC.TXT”,
  „ESARAIN_MS.TXT”
  zawierają wartości parametrów P_{r6}, M_c, M_s dla punktów na Ziemi o współrzędnych geograficznych zawartych w plikach „ESARAINLAT.TXT” i „ESARAINLON.TXT”.
- Z plików możemy odczytać wartości parametrów P_{r6}, M_c, M_s z dokładnością do 1,5° długości i szerokości geograficznej.

Wyznaczanie R0.01 #4.2

- Mając dane P_{r6}, M_c, M_s możemy obliczyć P_0:

$$P_0 = P_{r6}\left(1 - e^{-0,0117 M_s / P_{r6}}\right)$$

- A następnie:

$$R_p = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

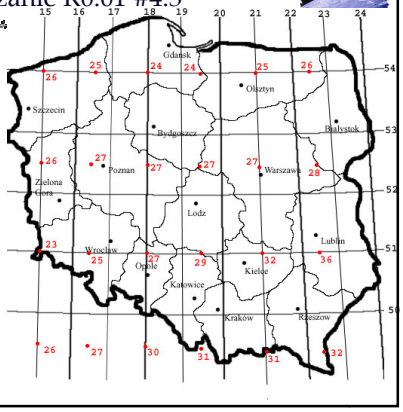
R_p to intensywność przekraczana dla p% roku, czyli w tym przypadku trzeba podstawić p=0,01

$$A = ab$$
$$B = a + c\ln(p/P_0)$$
$$C = \ln(p/P_0)$$

$$a = 1,11$$
$$b = \frac{M_c + M_s}{22932 P_0}$$
$$c = 31,5b$$

Wyznaczanie R0.01 #4.3

- Wyznaczone metodą ITU-R wartości $R_{0,01}$ [mm/h] dla 24 punktów znajdujących się na terenie Polski i w bezpośrednim sąsiedztwie:



Wyznaczanie tłumienia #5

Wyznaczenie współczynnika skrócenia ścieżki

Wprowadza poprawkę związaną z możliwą niejednorodnością warstwy chmur i opadów.

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + \frac{L_G}{L_0}}$$

gdzie:

$\mathbf{L_0}$ = 35exp(-0,015$R_{0.01}$) [km]

Wyznaczanie tłumienia #6

- Wyznaczenie tłumienności właściwej związanej z deszczem γ_R w zależności od częstotliwości, polaryzacji i intensywności deszczu $R_{0,01}$ (na podstawie ITU-R P.838):

$$k = \frac{1}{2}\left[k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau\right]$$

$$\gamma_R = kR^{\alpha}$$

$$\alpha = \frac{1}{2k}\left[k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau\right]$$

Wartości współczynników k i α dla wybranych wartości częstotliwości oraz polaryzacji pionowej (V) i poziomej (H) znajdują się w tabeli ITU-R P.838

Współczynniki k i α

Częstotliwość [GHz]	k_H	k_V	α_H	α_V
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312
8	0.00454	0.00395	1.327	1.310
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.030
30	0.187	0.167	1.021	1.000
35	0.263	0.233	0.979	0.963
40	0.350	0.310	0.939	0.929
45	0.442	0.393	0.903	0.897
50	0.536	0.479	0.873	0.868
60	0.707	0.642	0.826	0.824
70	0.851	0.784	0.793	0.793

Wyznaczanie tłumienia #7

Step 7:

Wartość tłumienia dla p = 0,01% wynosi:

$$\mathbf{A_{0.01} = \gamma_R * L_S * r_{0.01}\ [dB]}$$

Step 7a:

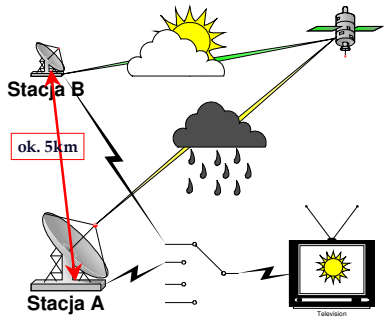
Dla innych wartości **p** (z zakresu 0.001% - 1%) tłumienie w opadach można wyliczyć z następującego wzoru:

$$A_p = A_{0,01} * 0{,}12\, p^{-(0{,}546 + 0{,}043 \log p)}$$

Redukcja wpływu tłumienia w opadach

- Poprawa bilansu energetycznego
  - Zwiększenie średnicy anteny
  - Zastosowanie sprzętu o lepszych parametrach szumowych
- Zastosowanie odbioru zbiorczego

Odbiór zbiorczy- przestrzenny



Tłumienie w chmurach i mgłach

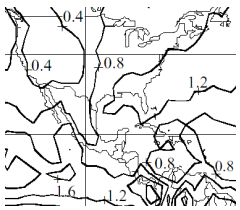
- mikroskopijne kropelki wody, kryształki lodu lub ich mieszanina, powstające przy powierzchni gruntu (mgły) lub do wysokości kilkunastu kilometrów (chmury)
- zawartość wody:
  - obiekty lodowe: do 0.01 g/m³
  - chmury wodne: do 5 g/m³
- obliczanie tłumienia przy projektowaniu łącza satelitarnego (ITU-R P.840):

$$A_c = \frac{L \cdot K_l}{\sin\theta}\ [\mathrm{dB}]$$

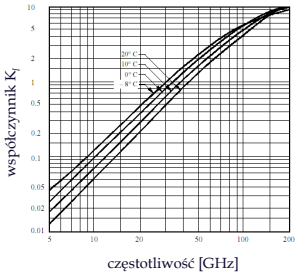
L – całkowita zawartość wody w słupie powietrza od powierzchni Ziemi do górnej warstwy atmosfery liczona na jednostkę powierzchni [kg/m²]

K_l – współczynnik proporcjonalności [(dB/km)/(g/m³)]

θ – kąt elewacji anteny stacji naziemnej



fragment mapy z wartościami *L* przekraczanymi przez 1% czasu w skali roku



• problematyczność danych meteorologicznych (zaledwie kilkuletnie statystyki), zalecane własne pomiary, np. przy użyciu radiosondy

Scyntylacje

• losowe i gwałtowne fluktuacje amplitudy, fazy, polaryzacji i kierunku propagacji fali radiowej spowodowane nieregularnością zmian wskaźnika refrakcji – czyli nieregularnymi zmianami wilgotności, temperatury i ciśnienia powietrza

• zjawisko znaczące w łączach satelitarnych, dla dużych częstotliwości (f > 10 GHz) i małych kątów elewacji anten stacji naziemnych (θ < 15°)

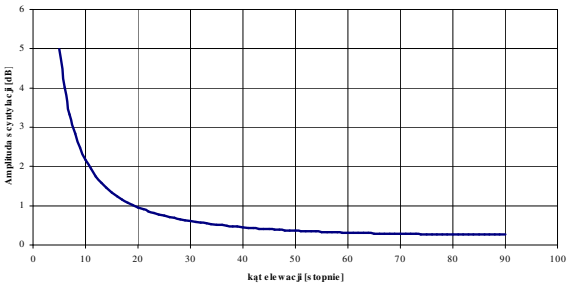
• tłumienia sygnału na skutek scyntylacji:
-> procedura wg ITU-R P.618

Rodzaje scyntylacji

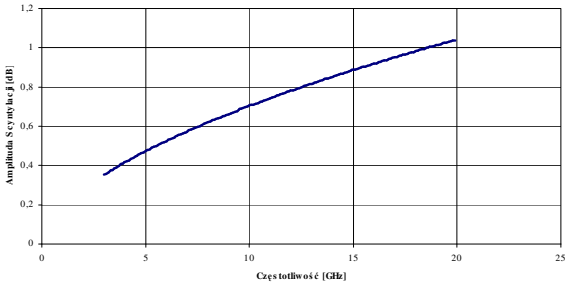
•Jonosferyczne -istotne dla częstotliwości poniżej 3GHz

•Troposferyczne- istotne dla częstotliwości większych niż 10GHz

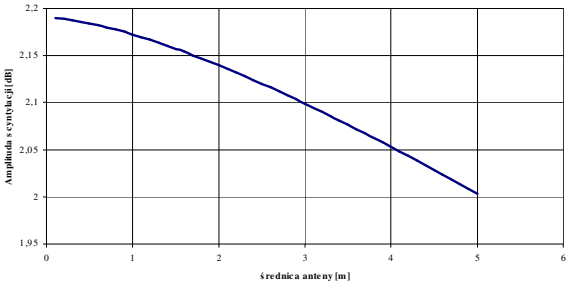
Scyntylacje a kąt elewacji



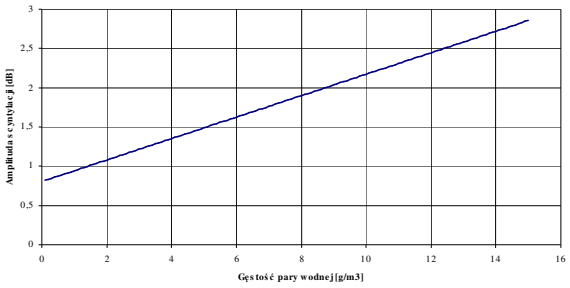
Scyntylacje a częstotliwość



Scyntylacje a średnica anteny



Scyntylacje a gęstość pary wodnej



Wyznaczanie poziomu scyntylacji

t – średnia powierzchniowa temperatura atmosfery danego miejsca dla miesiąca lub dłuższego okresu czasu [K]
ρ – średnia powierzchniowa gęstość pary wodnej [g/m^3]
f – częstotliwość, 4 GHz ≤ f ≤ 20 GHz
θ - kąt elewacji (θ ≥ 4°)
D – fizyczna średnica anteny stacji naziemnej [m]
η - współczynnik wykorzystania apertury

Wyznaczanie poziomu scyntylacji krok 1

Wyznaczenie ciśnienia pary wodnej e[hPa]

$$e = \frac{\rho \cdot t}{216{,}7}$$

Wyznaczanie poziomu scyntylacji krok 2

Wyznaczenie wartości współczynnika refrakcji (czynnika zależnego od pary wodnej)

$$N_{wet} = 3{,}732 * 10^5 \frac{e}{T^2}$$

Wyznaczanie poziomu scyntylacji krok 3

wyznaczenie odchylenia standardowego amplitudy sygnału σ_{ref}

$$\sigma_{ref} = 3{,}6 * 10^{-3} + 10^{-4} * N_{wet} [dB]$$

Wyznaczanie poziomu scyntylacji krok 4

Wyznaczenie efektywnej długości ścieżki L sygnału

h_L=1000m

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2\theta + 2{,}35 * 10^{-4}} + \sin\theta} [m]$$

h_L-wysokość warstwy turbulencji

Wyznaczanie poziomu scyntylacji krok 5

Wyznaczenie współczynnika uśredniania apertury g(x)

$$\begin{cases} g(x) = \sqrt{3{,}86(x^2+1)^{11/12} * \sin\left[\frac{11}{6} arctan \frac{1}{x}\right] - 7{,}08x^{5/6}} \\ x = 1{,}22 D_{eff}^2 (f/L) \\ D_{eff} = \sqrt{\eta} D[m] \end{cases}$$

Wyznaczanie poziomu scyntylacji krok 6

Wyznaczenie odchylenie standardowego sygnału dla rozważanego okresu niedostępności i ścieżki propagacyjnej

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

Wyznaczanie poziomu scyntylacji krok 7

wyznaczenie współczynnika zależnego od czasu niedostępności a(p)

$$a(p) = -0{,}061(\log_{10} p)^3 + 0{,}072(\log_{10} p)^2 + -1{,}71\log_{10} p + 3{,}0$$

0,01< p ≤ 50

Scyntylacje i tłumienie w opadach

$$A_s(p) = a(p) * \sigma[dB]$$

Wpływ opadów i scyntylacji rozpatrujemy łącznie

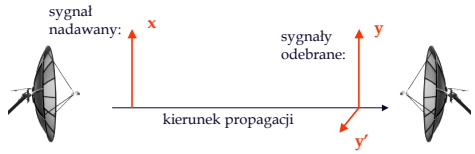
$$A(p) = \sqrt{A_R^2(p) + A_S^2(p)}[dB]$$

A_R – tłumienie w deszczu [dB]
A_S – tłumienie związane ze scyntylacjami [dB]

Przeniki polaryzacyjne XPD
(Cross Polar Discrimination)

Przyczyny:

- zjawiska troposferyczne: zmiany wskaźnika refrakcji, propagacja wielodrogowa, opady deszczu i śniegu
- jonosfera: skręcanie polaryzacji pod wpływem pola EM (efekt Faradaya)

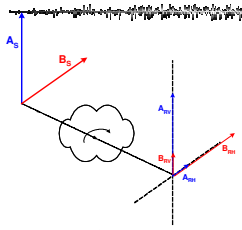


ANTENA NADAWCZA

$$XPD = 20\log\frac{y}{y'} \text{ [dB]}$$

ANTENA ODBIORCZA

Współczynniki XPD i XPI



XPD (*Cross Polarization Discrimination*) współczynnik dyskryminacji polaryzacyjnej to stosunek mocy składowej pożądanej do składowej ortogonalnej powstałej w wyniku przejścia przez medium depolaryzujące.

$$XPD = 20 \cdot \log\left(\frac{A_{RV}}{A_{RH}}\right)[dB]$$

$$XPI = 20 \cdot \log\left(\frac{A_{RV}}{B_{RV}}\right)[dB]$$

lub

$$XPI = 20 \cdot \log\left(\frac{B_{RH}}{A_{RH}}\right)[dB]$$

XPI (*Cross Polarization Isolation*) współczynnik izolacji polaryzacyjnej to stosunek mocy składowej o pożądanej jednego sygnału do składowej niepożądanej (ortogonalnej) drugiego sygnału.

XPI określa jak bardzo jeden sygnał jest zakłócany przez drugi.

Metoda obliczania XPD

Zalecenie **ITU-R P.618-7** podaje metodę obliczenia współczynnika XPD zależnego od czynników hydrometeorologicznych (kolumny deszczowe i chmury lodowe).

Parametry:

- A_p [dB] tłumienność w deszczu
- τ [°] kąt pochylenia płaszczyzny polaryzacji w stosunku do polaryzacji horyzontalnej (dla polaryzacji wertykalnej: τ=90°, horyzontalnej: τ =0° , kołowej: τ =45°)
- f [GHz] częstotliwość
- θ [°] kąt elewacji
- p [%] procent czasu niedostępności łącza

Krok 1 i 2

Obliczenie czynnika zależnego od częstotliwości C_f

$$C_f = 30 \cdot \log f \qquad \text{dla } 8 \le f \le 35 \text{ GHz}$$

Obliczenie czynnika zależnego od tłumienności w deszczu C_A

$$C_A = V(f) \cdot \log(A_p)$$

gdzie:

$$V(f) = 12{,}8 \cdot f^{0{,}19} \qquad \text{dla } 8 \le f \le 20\,\text{GHz}$$

$$V(f) = 22{,}6 \qquad \text{dla } 20 \le f \le 35\,\text{GHz}$$

Krok 3 i 4

Obliczenie współczynnika wpływu polaryzacji C_τ

$$C_\tau = -10 \cdot \log[1 - 0{,}484 \cdot (1 + \cos 4\tau)]$$

Współczynnik ten wynosi zero dla polaryzacji kołowej (τ=45°), natomiast dla polaryzacji horyzontalnej i wertykalnej osiąga maksimum.

Obliczenie czynnika zależnego od kąta elewacji C_θ

$$C_\theta = -40 \cdot \log(\cos\theta) \qquad \text{dla } \theta \le 60°$$

Krok 5 i 6

Obliczenie czynnika zależnego od kąta inklinacji kropli deszczu C_σ

$$C_\sigma = 0{,}0052 \cdot \sigma^2$$

Gdzie σ to odchylenie standardowe dystrybuanty kąta inklinacji kropli deszczu.

p	σ
1 %	0°
0,1 %	5°
0,01 %	10°
0,001 %	15°

Obliczenie wartości współczynnika XPD_{rain} nie przekraczanego przez p% czasu w skali roku

$$XPD_{rain} = C_f - C_A + C_\tau + C_\theta + C_\sigma$$

Krok 7 i 8

Obliczenie czynnika zależnego od kryształów lodu C_{ice}

$$C_{ice} = \tfrac{1}{2} \cdot XPD_{rain} \cdot (0{,}3 + 0{,}1 \cdot \log p)$$

Obliczenie wartości współczynnika XPD nie przekraczanego przez p% czasu w skali roku z uwzględnieniem wpływu kryształów lodu

$$XPD_p = XPD_{rain} - C_{ice}$$

Zjawisko Faradaya

Zjawisko Faradaya – polega na skręceniu płaszczyzny polaryzacji fali elektromagn. w polu magnetycznym równoległym do kierunku jej rozchodzenia się.

Rotacja Faradaya – skręcenie płaszczyzny polaryzacji fali w jonosferze. Zależy od częstotliwości fali, wielkości pola magnetycznego i gęstości elektronowej plazmy.

Kąt rotacji Faradaya :

$$\theta = 2.36 \cdot 10^2 \cdot B_{av} \cdot N_T \cdot f^{-2}$$

Gdzie

Bav - średnia indukcja magnetyczna Ziemi [Wb/m2]

N_T - TEC – *total electron content* [el/ m2]

Dla częstotliwości 10 GHz można zaobserwować skręcenie płaszczyzny polaryzacji o 1°, dla f < 10 GHz kąt skręcenia jest większy, natomiast dla f > 10 GHz zjawisko rotacji Faradaya jest już mniej istotne. Wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu częstotliwości.

Zjawisko Faradaya a XPD

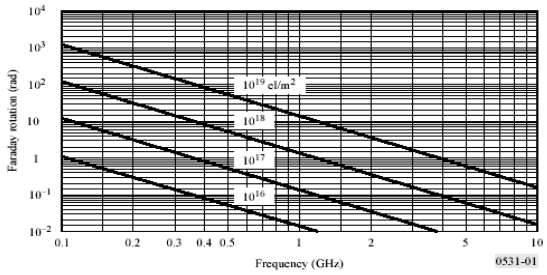
Zależność między kątem rotacji Faradaya a współczynnikiem XPD przedstawia się następującym wzorem:

$$XPD = -20 \log (\tan\theta) \text{ [dB]}$$

Przeniki polaryzacyjne XPD - rotacja Faradaya

FIGURE 1

Faraday rotation as a function of TEC and frequency



Przeniki polaryzacyjne XPD
(Cross Polar Discrimination)

W praktyce wartości współczynnika XPD nie powinny być niższe niż 25 dB w systemach powszechnego użytku oraz 35 dB w systemach profesjonalnych.

Dziękuję za uwagę