

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

im. Stanisława Staszica w Krakowie

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,

INFORMATYKI I ELEKTRONIKI

Katedra Telekomunikacji

PRACA MAGISTERSKA

Analiza wpływu warunków terenowo-klimatycznych na pracę
systemów radiokomunikacyjnych

Autor : Paweł Kułakowski

Kierunek studiów : Elektronika i Telekomunikacja

Specjalność : Sieci i usługi telekomunikacyjne

Promotor : dr. inż. Wiesław Ludwin

KRAKÓW 2003

Spis treści

Spis treści	2
Wstęp	4
1. Atmosfera Ziemi	6
1.1. Skład atmosfery	6
1.2. Pionowa budowa atmosfery	8
1.3. Wielkości fizyczne określające atmosferę i zjawiska w niej występujące	9
2. Fale elektromagnetyczne	13
3. Przegląd systemów radiokomunikacyjnych	16
3.1. Systemy o strukturze komórkowej	16
3.2. Szerokopasmowe radiowe systemy dostępu abonenckiego LMDS	18
3.3. Horyzontowe linie radiowe	19
3.4. Pozahoryzontowe linie radiowe	21
3.5. Satelitarne systemy telekomunikacyjne	25
3.6. Łączność amatorska	27
4. Propagacja wielodrogowa sygnału radiowego	30
4.1. Analiza przyziemnej propagacji fal radiowych	30
4.2. Dyspersja sygnału radiowego i interferencje międzysymbolowe	32
4.3. Lokalizacja stref odbicia i szacowanie głębokości zaników wielodrogowych	33
4.4. Sposoby unikania lub zmniejszania głębokości zaników wielodrogowych	37
4.5. Pozytywne aspekty propagacji wielodrogowej	38

5. Fale radiowe w atmosferze ziemskiej	41
5.1. Refrakcja	41
5.2. Dyfrakcja	45
5.3. Rozproszenie troposferyczne	48
5.4. Opad deszczu	50
5.5. Gazy atmosferyczne	52
5.6. Chmury i mgły	54
5.7. Scyntyłacje	56
5.8. Przeniki polaryzacyjne	57
6. Przykłady obliczeń	59
6.1. Strefy odbicia	59
6.2. Zaniki wielodrogowe	62
6.3. Tłumienie przeszkody terenowej	64
6.4. Tłumienie w deszczu	66
6.5. Zaniki spowodowane scyntyłacjami	69
6.6. Tłumienie w gazach atmosferycznych	71
Wnioski i uwagi końcowe	74
Literatura	76
Załącznik A	79

Wstęp

W systemach radiokomunikacyjnych, jako medium transmisyjne wykorzystywany jest kanał radiowy. Informacja przenoszona jest przez rozchodzące się w atmosferze ziemskiej, odpowiednio zmodulowane sygnały radiowe. Urządzenia nadawcze i odbiorcze nie są połączone żadnym kablem, dzięki czemu instalacja systemu radiokomunikacyjnego jest zazwyczaj prostsza i tańsza od instalacji systemu opartego na kablu miedzianym lub światłowodowym. Dodatkowo, w niektórych przypadkach urządzenia nadawczo-odbiorcze są przenośne. Przykładem tego mogą być systemy telefonii komórkowej lub satelitarnej.

W chwili obecnej, telekomunikacja radiowa jest dziedziną rozwijającą się bardzo szybko. Tym istotniejsze wydaje się zwrócenie uwagi na trudności związane z jej specyfiką. Swoboda propagacji fal elektromagnetycznych w atmosferze ziemskiej oznacza, że stosunkowo łatwo może dojść do wzajemnego zakłócania się dwóch systemów radiokomunikacyjnych, zlokalizowanych w niewielkiej odległości od siebie. W związku z tym konieczne jest istnienie instytucji nadzorujących przydzielanie określonych pasm częstotliwości różnym służbom radiowym i systemom radiokomunikacyjnym.

Drugim problemem jest ciągła zmienność warunków propagacji fali elektromagnetycznych w atmosferze. W warstwie atmosfery najbliższej powierzchni Ziemi – troposferze, zachodzą różne zjawiska meteorologiczne oddziałujące na fale elektromagnetyczne. W innej warstwie – jonosferze, fale zmieniają kierunek propagacji w zależności od koncentracji swobodnych elektronów. Również ukształtowanie terenu w miejscu lokalizacji systemu radiokomunikacyjnego ma wpływ na rozchodzenie się fal elektromagnetycznych. Oddziaływanie zarówno atmosfery, jak i warunków terenowych jest ściśle zależne od częstotliwości fali elektromagnetycznej.

Celem tej pracy jest analiza wpływu warunków terenowych i klimatycznych na działanie systemów radiokomunikacyjnych. Skoncentrowanie się na warunkach klimatycznych oznacza, że rozważany będzie wpływ troposfery, natomiast oddziaływanie jonosfery będzie pominięte.

Układ treści pracy jest następujący. W pierwszym rozdziale przedstawiono skład i budowę atmosfery. Omówiono również podstawowe parametry opisujące stan atmosfery i występujące w niej zjawiska. W drugim rozdziale scharakteryzowano fale elektromagnetyczne. Zaprezentowano dekadowy podział widma oraz pasma częstotliwości wykorzystywane przez poszczególne systemy radiokomunikacyjne. Rozdział trzeci stanowi przegląd wybranych systemów radiokomunikacyjnych. Opisano ich budowę, stosowane zakresy częstotliwości i podatność na zmienne warunki terenowe i klimatyczne. W kolejnym rozdziale przedstawiono zjawisko wielodrogowego rozchodzenia się fal radiowych. Dokonano analizy przyziemnej propagacji fali, zjawiska dyspersji oraz przedstawiono metody lokalizacji stref odbicia fali radiowej. Zaprezentowano również pozytywne aspekty propagacji wielodrogowej. Rozdział piąty stanowi omówienie zjawisk związanych z propagacją fal radiowych w atmosferze Ziemi. Kolejno scharakteryzowano zjawiska refrakcji, dyfrakcji i rozproszenia troposferycznego, tłumienia fali radiowej przez opad deszczu, chmury, mgły i gazy atmosferyczne oraz scyntylacje i przeniki polaryzacyjne. Wreszcie w rozdziale szóstym zaprezentowano konkretne przykłady obliczeń dotyczących wpływu warunków terenowych i klimatycznych na pracę systemów radiokomunikacyjnych.

1. Atmosfera Ziemi

Atmosfera ziemna to powłoka gazowa otaczająca kulę ziemską. Razem z Ziemią obraca się wokół jej osi. Również wewnątrz samej atmosfery następują ciągłe ruchy powietrza, wywołane dopływem energii promieniowania słonecznego.

Masę atmosfery Ziemi szacuje się na $5,3 \cdot 10^{18} \text{ kg}$ [37]. Jej gęstość wynosi średnio $1,25 \text{ kg/m}^3$ przy powierzchni Ziemi w szerokościach umiarkowanych. Wraz ze wzrostem wysokości gęstość powietrza spada, stopniowo przechodząc w gęstość typową dla przestrzeni międzyplanetarnej. Około 99,9997 % masy atmosfery znajduje się w strefie od powierzchni Ziemi do wysokości 100 km.

1.1. Skład atmosfery

Głównymi składnikami atmosfery są azot, tlen, argon, dwutlenek węgla i para wodna. Oprócz nich atmosfera zawiera również niektóre gazy szlachetne, wodór, metan i ozon (tab. 1.1).

Do wysokości około 100 km, w atmosferze występują ruchy powietrza powodujące ciągłe jej mieszanie. Z tego powodu, skład atmosfery w tej strefie jest w przybliżeniu stały. Wyjątek stanowią jedynie : para wodna, dwutlenek węgla i ozon. Zawartość pary wodnej zmienia się szybko wraz ze zmieniającymi się warunkami meteorologicznymi. Najwięcej pary wodnej znajduje się w obszarach okołorównikowych, najmniej – nad zwrotnikami i nad biegunami Ziemi.

Tabela 1.1

Skład atmosfery Ziemi w procentach masy atmosfery [37]

Nazwa składnika	Symbol chemiczny	Zawartość [%]
Azot	N ₂	78,08
Tlen	O ₂	20,96
Argon	Ar	0,93
Dwutlenek węgla	CO ₂	0,036
Para wodna	H ₂ O	0,0 ÷ 4,1
Neon	Ne	0,00182
Hel	He	0,000524
Metan	CH ₄	0,00015
Krypton	Kr	0,000114
Wodór	H ₂	0,00005
Tlenek azotu	N ₂ O	0,00005
Ksenon	Xe	0,000009
Ozon	O ₃	0,000001

Na stężenie dwutlenku węgla mają wpływ zarówno specyficzne lokalne warunki klimatyczne, jak i pora dnia i roku. Podana w tabeli 1.1 wartość 0,036 % jest wartością średnią. Nad aglomeracjami miejskimi zawartość dwutlenku węgla może dochodzić nawet do 0,08 %. W ostatnim półwieczu obserwowano ciągły wzrost stężenia dwutlenku węgla od 0,0315 % w roku 1957 do 0,0355 w roku 1992.

Trzeci ze zmiennych składników atmosfery – ozon znajduje się głównie na wysokości 20 ÷ 30 km nad powierzchnią Ziemi. Jest on gazem nietrwałym, jego cząsteczki powstają i rozpadają się pod wpływem promieniowania ultrafioletowego. Stężenie ozonu zależy od pory dnia i roku, a także od szerokości geograficznej. Jego największe stężenie występuje nad biegunami, najmniejsze nad równikiem.

Na wysokości powyżej 100 km, wpływ mieszających atmosferę ruchów powietrza jest bardzo słaby. Dlatego też, w dolnej części tej strefy dominują gazy najcięższe, w tym głównie azot i tlen. Wraz z wzrostem wysokości rośnie natomiast stężenie gazów lekkich takich jak wodór czy hel. Para wodna, dwutlenek węgla i ozon w ogóle nie występują na tych wysokościach.

1.2. Pionowa budowa atmosfery

Szczegółowa analiza budowa atmosfery w pionie [37] pozwala wyróżnić pięć warstw :

- troposferę,
- stratosferę,
- mezosferę,
- termosferę
- egzosferę.

Głównym czynnikiem pozwalającym na dokonanie takiego podziału jest temperatura.

Troposfera sięga od powierzchni Ziemi do wysokości 6 ÷ 8 km nad biegunami, 10 ÷ 12 km nad szerokościami umiarkowanymi i 16 ÷ 18 km nad równikiem. W tej warstwie znajduje się prawie cała występująca w atmosferze para wodna i dwutlenek węgla. Tutaj występują chmury, z których może następować opad atmosferyczny. Temperatura w troposferze spada z wysokością o 0,6 °C na 100 metrów, dochodząc do -80 ÷ -70°C nad równikiem i -70 ÷ -45 °C nad biegunami. Bezpośrednio nad troposferą znajduje się tropopauza. Warstwa ta, o grubości 2 km, oddziela troposferę od stratosfery.

Stratosfera rozciąga się od tropopauzy do wysokości 50 ÷ 55 km. Temperatura w dolnej części tej warstwy jest stała, wyżej – rośnie do ok. 0 °C. Ten wzrost jest skutkiem absorpcji przez ozon promieniowania ultrafioletowego, pochodzącego ze Słońca. W stratosferze mogą występować nieliczne chmury – głównie cirrusy – złożone z kryształków lodu i przechłodzonej wody. Stratosfera kończy się kolejną warstwą przejściową – stratopauzą.

Powyżej stratopauzy znajduje się mezosfera, sięgająca do wysokości około 85 km. Temperatura w tej warstwie spada, aż do około -80 °C przy jej górnej granicy, zakończonej mezopauzą.

Od mezopauzy do wysokości około 800 km rozpościera się termosfera. Temperatura termosfery rośnie z wysokością, na skutek pochłaniania przez cząsteczki powietrza promieniowania słonecznego o wysokiej częstotliwości. Przy górnej granicy warstwy może osiągnąć nawet 1000 °C. Tak wysoka temperatura nie jest jednak przeszkodą dla poruszających się satelitów czy innych obiektów kosmicznych ze względu na bardzo niskie ciśnienie powietrza wynoszące około 10^{-8} hPa już na wysokości 500 km.

Nad termosferą znajduje się obszar przejścia atmosfery w przestrzeń międzyplanetarną, nazywany egzosferą. Cząsteczki znajdujące się w egzosferze mają bardzo duże prędkości pozwalające im na uwalnianie się z pola grawitacyjnego Ziemi.

Niezależnie od podziału termicznego, w atmosferze można wyróżnić obszar, w którym występuje duża gęstość cząstek zjonizowanych, a więc również duża gęstość swobodnych elektronów. Obszar ten, zwany jonosferą, rozciąga się od wysokości około 60 km praktycznie aż do przestrzeni międzyplanetarnej. W jonosferze można wyróżnić trzy obszary, gdzie gęstość elektronów swobodnych jest największa [1]. Warstwa D występuje na wysokości 60 ÷ 90 km i zanika nocą, przy braku dopływu energii słonecznej powodującej jonizację cząsteczek. Warstwa E, na wysokości 100 ÷ 120 km, utrzymuje się przez całą dobę. Trzecia warstwa – F, o największej gęstości elektronów swobodnych, dzieli się na dwie podwarstwy : F₁ i F₂. Podwarstwa F₁ (180 ÷ 240 km) występuje tylko w dzień i to latem, natomiast F₂ (230 ÷ 400 km) utrzymuje się przez cały czas.

Na rozchodzenie się fal elektromagnetycznych największy wpływ mają troposfera i jonosfera. Troposfera jest warstwą najbardziej zmienną. W niej występują duże i szybkie zmiany temperatury, ciśnienia i wilgotności. Ma to wpływ na tłumienie i rozpraszanie fal elektromagnetycznych oraz na zakrzywianie ich trajektorii. Z kolei w jonosferze występuje duża koncentracja cząstek posiadających ładunek elektryczny. Stąd warstwa ta może rozpraszać lub odbijać fale elektromagnetyczne docierające do niej z powierzchni Ziemi.

1.3. Wielkości fizyczne określające atmosferę i zjawiska w niej występujące

Stan atmosfery można określić podając jej temperaturę, ciśnienie, wilgotność, prędkość i kierunek wiatru oraz opisując występujące w niej zjawiska, takie jak opad, chmury lub mgły.

Temperatura powietrza T podawana jest w stopniach Celsjusza [$^{\circ}\text{C}$] (wtedy najczęściej jest oznaczana małą literą t), Kelwinach [K] lub stopniach Fahrenheita [$^{\circ}\text{F}$]. Między tymi trzema skalami istnieją związki :

$$T[\text{K}] = T[^{\circ}\text{C}] + 273, \quad (1.1)$$

$$T[^{\circ}\text{F}] = \frac{9}{5}T[^{\circ}\text{C}] + 32. \quad (1.2)$$

Średnie roczne temperatury na kuli ziemskiej wynoszą od około 30°C w centralnej części Afryki Północnej do około -30°C na biegunie południowym [10]. Generalnie średnie te są tym niższe im wyższa jest szerokość geograficzna. Ekstremalne temperatury powietrza zmierzone na Ziemi to 63°C w Dżibuti i -88°C w Wostoku na Antarktydzie. Temperatura powietrza może się bardzo szybko zmieniać, jej wahania dobowe przekraczają w niektórych przypadkach 30°C . Większe wahania temperatur, zarówno dobowe jak i roczne występują w centrum kontynentów. Mniejsze w pobliżu dużych zbiorników wodnych – mórz i oceanów. Woda, ze względu na swoje duże ciepło właściwe, dobrze magazynuje energię cieplną i spowalnia zmiany temperatury powietrza.

Ciśnienie atmosferyczne p wyrażane jest w hektopascalach [hPa], milibarach [mb] lub milimetrach słupa rtęci [mm Hg]. Związki między tymi jednostkami przedstawiają zależności:

$$1 \text{ hPa} = 1 \text{ mb}, \quad (1.3)$$

$$1 \text{ hPa} = 0,75 \text{ mm Hg}. \quad (1.4)$$

W większości przypadków ciśnienie powietrza na poziomie morza mieści się w zakresie od 980 do 1040 hPa. Jednocześnie istnieje zależność ciśnienia powietrza od szerokości geograficznej [37]. Pomiędzy zwrotnikami ($23^{\circ}27' \text{ N}$ i $23^{\circ}27' \text{ S}$) występuje pas niskiego ciśnienia. Około 30° obu szerokości geograficznych znajdują się podzwrotnikowe strefy podwyższonego ciśnienia. W szerokościach umiarkowanych tworzą się kolejne strefy niskiego ciśnienia, a nad biegunami ziemskimi obszary o wysokim ciśnieniu powietrza. W ciągu roku strefy te przemieszczają się na powierzchni Ziemi na północ i południe zgodnie z pozorną wędrówką Słońca. Na rozkład ciśnienia powietrza na kuli ziemskiej mają też wpływ duże kontynenty – zwłaszcza kontynent euroazjatycki. Ciśnienie nad nimi jest zazwyczaj niskie w lecie i wysokie zimą.

Wpływ szerokości geograficznej i rozkładu kontynentów na ciśnienie atmosferyczne sprawia, że na kuli ziemskiej formują się sezonowe lub nawet stałe ośrodki wysokiego i niskiego ciśnienia. Na Europę wpływ mają głównie : Niż Islandzki, Wyż Azorski, Wyż Syberyjski i ośrodek niżowy tworzący się w lecie nad Azją Południową.

Jednocześnie w każdym punkcie na kuli ziemskiej występują ciągle zmiany ciśnienia atmosferycznego zaburzające ogólny schemat rozkładu ciśnienia powietrza.

Dotychczasowe rozważania dotyczyły wartości ciśnienia powietrza na poziomie morza. Wraz ze wzrostem wysokości następuje szybki spadek ciśnienia. Przykładowo na wysokości 5 km wynosi ono około 500 hPa, a na wysokości 10 km – 250 hPa [37]. Całkowite ciśnienie atmosferyczne jest sumą ciśnienia suchego powietrza i ciśnienia zawartej w nim pary wodnej.

Wilgotność powietrza można mierzyć podając gęstość ρ [g/m^3] lub ciśnienie pary wodnej e [hPa, mb] w atmosferze. Z prawa Clapeyrona można wyprowadzić związek pomiędzy tymi dwiema wielkościami :

$$e[\text{hPa}] = \frac{\rho[\frac{\text{g}}{\text{m}^3}] \cdot T[\text{K}]}{216,7} \quad (1.5)$$

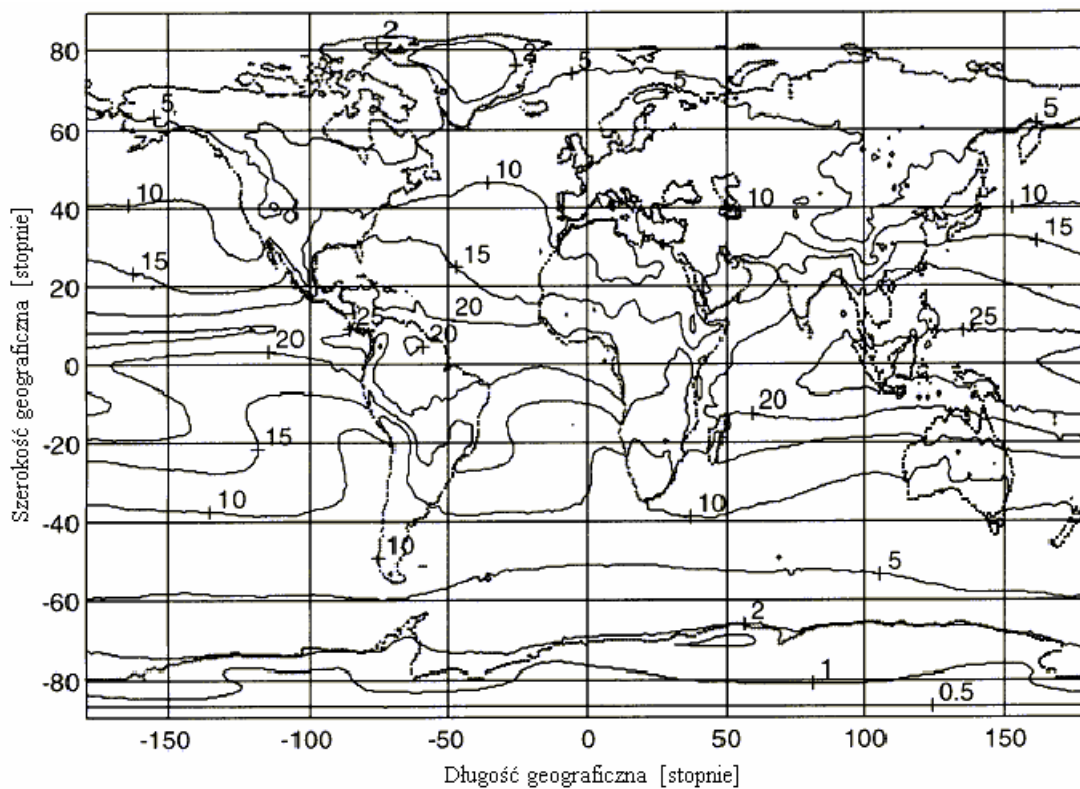
Gęstość pary wodnej w atmosferze przy powierzchni Ziemi zazwyczaj nie jest większa niż 30 g/m^3 , a średnia wartość na kuli ziemskiej to 7,5 g/m^3 [23], [26]. Gęstość pary wodnej spada wraz ze wzrostem szerokości geograficznej. Jest to skutkiem spadku temperatury. Niższa temperatura oznacza niższą gęstość pary wodnej w atmosferze, przy której para wodna zaczyna się skraplać. Większe gęstości pary wodnej występują zazwyczaj w pobliżu zbiorników wodnych – rzek, jezior, a zwłaszcza mórz i oceanów. Średnią roczną gęstość pary wodnej przedstawiono na rysunku 1.1.

Wiatr nie ma wpływu na rozchodzenie się fal elektromagnetycznych, jednak gdy ma zbyt dużą prędkość, może uszkodzić sprzęt radiowy lub zmienić ustawienie geometryczne anten. Największe prędkości wiatru mogą występować w terenie górskim, na morzu i podczas przejść cyklonów tropikalnych (Ameryka Śr., Azja Pd-Wsch, Archipelag Malajski, wybrzeża Australii).

Opad atmosferyczny to deszcz, mżawka, grad lub różne formy opadu śniegu. Wielkość opadu podawana jest w milimetrach warstwy wody, która utworzyłaby się na ziemi, gdyby woda nie wsiąkała, nie odpływała, ani nie parowała. Opady śniegu są mniej intensywne od opadów deszczu, ze względu na mniejszą gęstość śniegu. W terenie górskim opady są zazwyczaj większe. Średni roczny opad w Polsce to 650 ÷ 700 mm, w Tatrach około 1700 mm. Dla porównania, maksymalne opady notuje się w Czerrapundzi – średnia roczna wynosi tam 11 620 mm, zaś średnia suma opadów dla miesiąca lipca to 2730 mm [10].

Bardzo wysokie opady mogą występować podczas przejścia cyklonu tropikalnego. Przykładowo, cyklon na wyspie Reunion (Ocean Indyjski) w maju 1966 roku przyniósł 1144 mm opadu w ciągu jednej nocy [5].

Z kolei minimalne opady rejestrowane są w Chile. Średnia roczna w Arica wynosi 0,6 mm, a w Iquique – 1,5 mm.



Rys. 1.1. Średnia roczna gęstość pary wodnej w atmosferze [26]

2. Fale elektromagnetyczne

Fale elektromagnetyczne to zaburzenia pola elektromagnetycznego rozchodzące się w przestrzeni. Prędkość fal elektromagnetycznych jest równa :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2.1)$$

gdzie ϵ i μ są to przenikalności dielektryczna i magnetyczna ośrodka. W próżni prędkość ta jest równa prędkości światła $c \approx 299\,792.5$ km/s. Długość fali elektromagnetycznej λ jest odwrotnie proporcjonalna do jej częstotliwości f :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.2)$$

Nie istnieją znane granice częstotliwości i długości fal elektromagnetycznych. We Wszechświecie istnieją fale elektromagnetyczne o częstotliwościach 10^{21} Hz i większych - są to promienie γ wysyłane przez jądra aktywnych galaktyk. Z drugiej strony odebrano również promieniowanie o częstotliwości 10^{-2} Hz [9].

Poznane i obserwowane fale elektromagnetyczne zostało podzielone na cztery zakresy [4]. Najniższe częstotliwości i największe długości mają fale radiowe, jest to zakres do $6 \cdot 10^{11}$ Hz. Większymi częstotliwościami charakteryzują się fale świetlne, które dzielą się na :

- promieniowanie podczerwone ($f = 6 \cdot 10^{11} - 3,75 \cdot 10^{14}$ Hz),
- światło widzialne ($f = 3,75 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$ Hz),
- promieniowanie ultrafioletowe $f = 7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$ Hz).

Promienie Roentgena to fale o częstotliwościach $3 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}$ Hz. Fale elektromagnetyczne o jeszcze większych częstotliwościach nazywane są promieniami γ .

W radiokomunikacji wykorzystywane są fale radiowe o częstotliwościach od 3 kHz do 300 GHz. Aktualnie, zgodnie z międzynarodowymi zaleceniami [31] stosuje się, przedstawiony w tabeli 2.1, dekadowy podział widma częstotliwości radiowych na zakresy.

Tabela 2.1

Zakresy fal radiowych

Zakres częstotliwości	Zakres długości fal	Nazwa zakresu
3 - 30 kHz	10 – 100 km	myriametrowe VLF (<i>Very Low Frequency</i>)
30 - 300 kHz	1 - 10 km	kilometrowe LF (<i>Low Frequency</i>)
300 - 3000 kHz	100 – 1000 m	hektometrowe MF (<i>Medium Frequency</i>)
3 – 30 MHz	10 – 100 m	dekametrowe HF (<i>High Frequency</i>)
30 - 300 MHz	1 - 10 m	metrowe VHF (<i>Very High Frequency</i>)
300 - 3000 MHz	10 – 100 cm	decymetrowe UHF (<i>Ultra High Frequency</i>)
3 – 30 GHz	1 - 10 cm	centymetrowe SHF (<i>Super High Frequency</i>)
30 - 300 GHz	1 - 10 mm	milimetrowe EHF (<i>Extra High Frequency</i>)

Pasmo częstotliwości od 3 kHz do 300 GHz jest reglamentowane na świecie. Wybrane zakresy częstotliwości przeznaczone są do użytkowania przez służby ratownicze, policję, wojsko i amatorów. Inne zakresy używane są przez operatorów komercyjnych systemów radiowych, którzy muszą za to zapłacić. W tabeli 2.2 zaprezentowane są pasma częstotliwości używane przez wybrane systemy radiowe i w łączności amatorskiej.

Tabela 2.2

Pasma częstotliwości wybranych systemów radiowych i łączności amatorskiej

[13], [31], [34], [35], [38]

System radiowy	Pasma częstotliwości
Sieci komórkowe	450 ÷ 470 MHz, 820 ÷ 960 MHz, 1700 ÷ 2200 MHz
Szerokopasmowe RSDA	25 ÷ 50 GHz
Horyzontowe linie radiowe	2 ÷ 58 GHz
Pozahoryzontowe linie radiowe	0,25 ÷ 6 GHz
Systemy satelitarne	2 ÷ 50 GHz
Łączność amatorska	1,8 MHz ÷ 250 GHz

3. Przegląd systemów radiokomunikacyjnych

W prezentowanym rozdziale dokonano przeglądu architektury i elementów funkcjonalnych wybranych systemów radiokomunikacyjnych.

3.1. Systemy o strukturze komórkowej

Systemy o strukturze komórkowej to systemy komunikacji bezprzewodowej umożliwiające łączność z terminalami ruchomymi [34]. Działają one w oparciu o stacje bazowe, które utrzymują łączność z terminalami abonenckimi drogą radiową. Podstawową oferowaną usługą jest usługa telefoniczna, dlatego systemy o strukturze komórkowej określa się często mianem telefonii komórkowej.

Obszar działania sieci telefonii komórkowej podzielony jest na komórki. Łączność z terminalami znajdującymi się wewnątrz jednej komórki prowadzi jedna stacja bazowa, wykorzystując w tym celu przydzielone jej kanały częstotliwościowe. W celu zwiększenia pojemności sieci, czyli liczby obsługiwanych abonentów, te same kanały częstotliwościowe przyznaje się kilku oddalonym od siebie stacjom bazowym. W konsekwencji, w sieci pojawiają się szumy interferencyjne współkanałowe, które są najsilniejszymi zakłóceniami w sieciach telefonii komórkowej.

Systemy o strukturze komórkowej opierają się na technikach wielodostępu TDMA (*Time Division Multiplex Access*), FDMA (*Frequency DMA*) i CDMA (*Code DMA*). Wykorzystują częstotliwości 450 ÷ 470 MHz, 820 ÷ 960 MHz i 1710 ÷ 2200 MHz. Szczegółowe przyporządkowanie częstotliwości i technik wielodostępu określonym systemom telefonii komórkowej przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1

Metody wielodostępu i zakresy częstotliwości systemów z architekturą komórkową [34]

Nazwa systemu	Metoda wielodostępu	Zakres częstotliwości
AMPS	FDMA	824 ÷ 849 MHz, 869 ÷ 894 MHz
TACS	FDMA	890 ÷ 905 MHz, 935 ÷ 950 MHz
NMT	FDMA	453 ÷ 457,5 MHz, 463 ÷ 467,5 MHz
GSM	TDMA/FDMA	890 ÷ 915 MHz, 935 ÷ 960 MHz
IS-54	TDMA/FDMA	824 ÷ 849 MHz, 869 ÷ 894 MHz
IS-95	CDMA/FDMA	824 ÷ 849 MHz, 869 ÷ 894 MHz
DCS	TDMA/FDMA	1710 ÷ 1785 MHz, 1805 ÷ 1880 MHz
UMTS	TDMA/CDMA	1885 ÷ 2025 MHz, 2110 ÷ 2200 MHz

Promienie komórek w najpopularniejszym systemie telefonii komórkowej – GSM wahają się od 500 metrów do 35 kilometrów. Najmniejsze komórki są tworzone w miastach, gdzie jest największa gęstość abonentów na jednostkę powierzchni. Komórki o dużych promieniach powstają na terenach niezurbanizowanych. Promień komórki określa maksymalną odległość pomiędzy stacją bazową a terminalem abonenta.

Moc fali radiowej rozchodzącej się w przestrzeni swobodnej jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości. Wykładnik potęgi odległości oznaczany jest zazwyczaj grecką literą γ . Pomiary prowadzone w terenach pokrytych sieciami telefonii komórkowej wskazują, że moc fali radiowej może szybciej maleć z odległością – niekiedy nawet z jej szóstą potęgą ($\gamma = 1,6 \div 6$). Zależność współczynnika γ od rodzaju terenu, w którym rozchodzi się fala radiowa, zaprezentowano w tabeli 3.2.

Tabela 3.2Zależność współczynnika γ od rodzaju terenu [34]

Rodzaj terenu	Wartość γ
Wolna przestrzeń	2
Obszar miejski	2,7 ÷ 3,5
Obszar miejski, efekt cienia radiowego	3 ÷ 5
Wnętrza budynków, bezpośrednia widoczność anten	1,6 ÷ 1,8
Wnętrza budynków, przeszkody na drodze sygnału radiowego	4 ÷ 6

W systemach o strukturze komórkowej, propagacja sygnału radiowego następuje w bezpośrednio przylegającej do ziemi części atmosfery. W większości przypadków nie ma zapewnionej widoczności optycznej anten stacji bazowej i terminala abonenta. Sygnał radiowy przebywa drogę od nadajnika do odbiornika odbijając się od przeszkód terenowych i ulegając rozproszeniu lub dyfrakcji. Często dociera do anteny odbiorczej kilkoma różnymi drogami – jest to zjawisko wielodrogowości. Wielodrogowość może spowodować wzrost mocy sygnału w odbiorniku, jednak najczęściej jej skutkiem są znaczące spadki mocy i zaniki sygnału.

3.2. Szerokopasmowe radiowe systemy dostępu abonenckiego LMDS

Szerokopasmowe radiowe systemy dostępu abonenckiego (szerokopasmowe RSDA) są standardem radiowych sieci dostępowych. W Polsce popularna jest też anglosaska nazwa tych systemów: LMDS (*Local Multipoint Distribution System*). Operatorzy szerokopasmowych RSDA mogą dostarczać dowolne usługi telekomunikacyjne: dostęp do Internetu, transmisję danych, telefonię, ISDN czy programy telewizyjne.

Systemy LMDS wykorzystują częstotliwości powyżej 25 GHz. W Stanach Zjednoczonych jest to pasmo o szerokości 1300 MHz ulokowane w trzech podzakresach [13]:

- 27,5 GHz ÷ 28,35 GHz,
- 29,1 GHz ÷ 29,25 GHz,
- 31,0 GHz ÷ 31,3 GHz.

Część sieci LMDS, należąca do operatora, ma strukturę komórkową. Tworzą ją stacje bazowe połączone siecią szkieletową. Stacje bazowe wyposażone są w anteny sektorowe. Zazwyczaj są to cztery anteny w sektorach po 90° każdy, ale mogą istnieć również sektory większe lub mniejsze (45° , 30° , $22,5^\circ$ i 15°) [13]. W celu poprawy pojemności systemu, w różnych komórkach używane są te same zakresy częstotliwości oraz dwie wzajemnie ortogonalne polaryzacje sygnału radiowego. Technikami wielodostępu są najczęściej TDMA i FDMA. Możliwy jest też wielodostęp kodowy CDMA.

Zastosowanie wysokich częstotliwości pracy systemów LMDS powoduje, że dla poprawnego działania tych sieci konieczna jest bezpośrednia widoczność między stacjami bazowymi a antenami stacji abonenckich. Przeszkodą w propagacji fal radiowych są nawet drzewa liściaste. Anteny abonenckie, paraboliczne o średnicy kilkudziesięciu centymetrów, znajdują się zazwyczaj w odległościach nie większych niż kilka kilometrów od stacji bazowej. W niektórych przypadkach mogą to być dystanse kilkunastu kilometrów, jednak oznacza to wzrost prawdopodobieństwa niedostępności połączenia lub mniejszą szybkość transmisji.

Systemy LMDS są podatne na wpływ opadu deszczu, powodującego tłumienie sygnału radiowego i zmianę jego polaryzacji. W łączach w górę (abonent - stacja bazowa) stosuje się automatyczną regulację mocy nadawczej. Stacja bazowa informuje nadajnik abonencki o spadku poziomu odbieranego sygnału i nadajnik zwiększa poziom mocy. Jednak takie rozwiązanie jest niemożliwe dla łącza w dół (stacja bazowa - abonent). Stacja bazowa transmituje sygnał o tej samej mocy do wszystkich abonentów, i nie może zmienić poziomu mocy z powodu większego tłumienia na trasie do jednego lub kilku abonentów. Dlatego w przypadku projektowania sieci LMDS bardzo istotna jest szczegółowa analiza statystyczna intensywności opadu deszczu w danym regionie.

3.3. Horyzontowe linie radiowe

Horyzontowe linie radiowe LOS (*Line-Of-Sight*) to łącza typu punkt-punkt (p-p) lub punkt-wiele punktów (p-wp) wykorzystujące częstotliwości powyżej 900 MHz. Linie te są często elementami składowymi większych sieci telekomunikacyjnych. Zazwyczaj przenoszą

ruch telefoniczny, jednak mogą służyć transmisji dowolnego typu danych. Obecnie projektuje się tylko cyfrowe linie radiowe, ale spotyka się jeszcze systemy analogowe. W obu przypadkach częstotliwość nośna jest sygnałem sinusoidalnym, jedynie technika modulacji może być cyfrowa – najczęściej FSK, PSK, QAM, lub analogowa – FM.

W horyzontowych liniach radiowych stosuje się częstotliwości od 2 do 60 GHz. W tabeli 3.3 przedstawiono zakresy częstotliwości przeznaczone w Polsce dla linii radiowych p-p i p-wp.

Tabela 3.3

Zakresy częstotliwości przeznaczone w Polsce dla linii radiowych p-p i p-wp [35]

Pasmo [GHz]	Zakres częstotliwości	Typ struktury
2,4	2,4 ÷ 2,4835	p-p, p-wp
3,5	3,41 ÷ 3,6	p-p, p-wp
5,8	5,725 ÷ 5,85	p-p, p-wp
6	5,925 ÷ 7,11	p-p
7	7,425 ÷ 7,725	p-p
8	7,725 ÷ 8,5	p-p
10	10,5 ÷ 10,68	p-p
11	10,7 ÷ 11,7	p-p
13	12,75 ÷ 13,25	p-p
15	14,5 ÷ 15,35	p-p
18	17,7 ÷ 19,7	p-p
23	22 ÷ 23,6	p-p
26	24,25 ÷ 26,6	p-p
28	27,5 ÷ 29,5	p-p, p-wp
38	37 ÷ 39,5	p-p
58	57,2 ÷ 58,2	p-p

Linia radiowa składa się z przęseł czyli odcinków przekaźnikowych. Każde przęsło to dwie stacje oraz tor radiowy między nimi. Pojedyncze przęsło może mieć długość od 2 do 70 kilometrów, choć zdarzają się przypadki przęseł zarówno dłuższych jak i krótszych. Stosowane są anteny paraboliczne, o średnicach zazwyczaj $0,3 \div 3$ m, zyskach energetycznych rzędu kilkudziesięciu dBi i kątach połowy mocy poniżej 2° . Takie anteny wymagają bardzo dokładnego zwizowania. Jest to tym trudniejsze, że fale elektromagnetyczne pomiędzy antenami dwóch stacji nie poruszają się po linii prostej. Ich tor jest zakrzywiony, co wynika ze zmian współczynnika załamania w troposferze.

Prawidłowe dobranie wysokości zawieszenia anten wymaga uwzględnienia kilku aspektów. Musi zostać zapewniona nie tylko widoczność pomiędzy antenami, ale dla swobodnej propagacji fal elektromagnetycznych pod trajektorią fali radiowej musi znajdować się wolna przestrzeń o rozmiarze 60 % pierwszej strefy Fresnela. Konieczne jest uwzględnienie profilu terenu, krzywizny Ziemi i zmian współczynnika załamania – wskaźnika refrakcji troposferycznej. W większości przęseł, sygnał radiowy dociera od nadajnika do odbiornika nie tylko drogą bezpośrednią, ale również po odbiciu od powierzchni Ziemi. Wysokość zawieszenia anten wpływa na położenie obszaru odbicia na trasie przęsła. Dlatego po ustaleniu wysokości zawieszenia anten, należy je ponownie zweryfikować, tak, aby obszar odbicia znajdował się w miejscu o stosunkowo dużym tłumieniu fali radiowej przez podłoże. Bardzo trudne, a często niemożliwe, jest zaprojektowanie przęsła linii radiowej przechodzącego nad jeziorem lub morzem. Gładka powierzchnia wodna dobrze odbija fale radiowe, a powstające wtedy zaniki wielodrogowe mogą sięgać nawet 40 dB. Również bilans energetyczny przęsła linii radiowej wymaga uwzględnienia warunków terenowych i klimatycznych, w których przęsło się znajduje. Konieczne są obliczenia tłumienia sygnału radiowego w gazach atmosferycznych i deszczu, oszacowanie poziomu zaników wynikających z wielodrogowości, szumów scyntylacji i rozmiaru przeników polaryzacyjnych.

3.4. Pozahoryzontowe linie radiowe

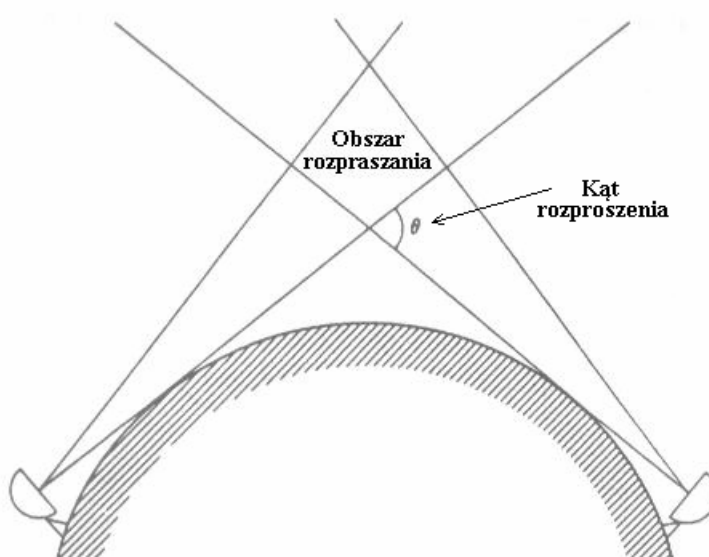
Linie radiowe działające przy braku optycznej widoczności między antenami stacji przekaźnikowych określane są mianem pozahoryzontowych OTH (*Over-The-Horizon*). Brak widoczności może wynikać z dużych odległości między stacjami i wówczas krzywizna Ziemi

powoduje, że stacje znajdują się względem siebie pod linią horyzontu. Brak widoczności może być również skutkiem istnienia przeszkody terenowej, np. wzniesienia na trasie propagacji wiązki mikrofalowej.

Przędła linii OTH mają zazwyczaj długości od 70 do 700 km. Wykorzystują częstotliwości z zakresu od 250 MHz do 6 GHz [7]. Na stacjach przekaźnikowych stosowane są anteny paraboliczne o średnicach od 2 do 40 m, umieszczane nisko nad powierzchnią Ziemi. Linie OTH znajdują zastosowanie :

- w miejscach, gdzie nie ma możliwości zbudowania krótszych przęseł linii LOS,
- w przypadkach, gdy przęśło prowadzi nad powierzchnią wody, przez teren górski lub należący do innego państwa,
- w wojskowych systemach telekomunikacyjnych.

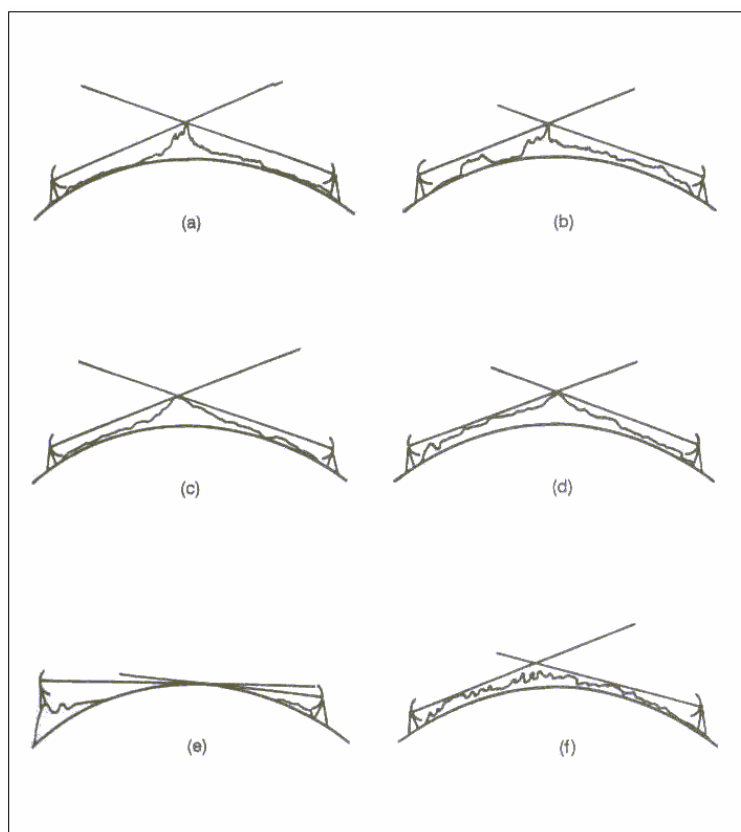
Współczesne pozahoryzontowe linie radiowe działają w oparciu o zjawisko rozproszenia troposferycznego lub dyfrakcji sygnału radiowego na przeszkodach terenowych. Rozproszenie troposferyczne jest możliwe dzięki istnieniu w atmosferze obszarów o odmiennym od otoczenia współczynnika refrakcji. Obszary takie powstają na skutek ciągłego mieszania się powietrza w atmosferze. Wiązka fal radiowych, gdy trafi na taki obszar, rozprasza się. Większość energii przechodzi bez zmiany kierunku, jednak część powraca w kierunku powierzchni Ziemi. Sygnał docierający w ten sposób do stacji odbiorczej jest tym silniejszy, im mniejszy jest kąt rozproszenia θ (rys. 3.1). Rozproszenie troposferyczne jest zjawiskiem dominującym dla dłuższych przęseł linii OTH – zazwyczaj powyżej 160 km.



Rys. 3.1. Zjawisko rozproszenia troposferycznego

Dyfrakcja, czyli ugięcie fali radiowej na przeszkodzie terenowej jest zjawiskiem charakterystycznym dla krótszych pręśel – o długościach poniżej 160 km. W zależności od rodzaju terenu, wyróżnia się sześć przypadków dyfrakcji, przedstawionych na rysunku 3.2 :

- (a) na pojedynczej, ostrej przeszkodzie terenowej, bez odbić od powierzchni Ziemi,
- (b) na pojedynczej, ostrej przeszkodzie terenowej, z odbiciami od powierzchni Ziemi,
- (c) na pojedynczym, łagodnym wzniesieniu, bez odbić od powierzchni Ziemi,
- (d) na pojedynczym, łagodnym wzniesieniu, z odbiciami od powierzchni Ziemi,
- (e) na gładkiej powierzchni Ziemi, np. obszarze wodnym,
- (f) na terenie nieregularnym.



Rys. 3.2. Porównanie różnych przypadków dyfrakcji [7]

Projektowanie pręśla pozahoryzontowej linii radiowej wymaga zaklasyfikowania obszaru, w którym znajduje się pręśło, do jednej z dziewięciu stref klimatycznych wyróżnionych przez ITU-R [21] :

1. równikowej,
2. podrównikowej kontynentalnej,
3. podrównikowej morskiej,
4. pustynnej,
5. śródziemnomorskiej,
6. umiarkowanej kontynentalnej,
- 7a. umiarkowanej morskiej i obszarach w głębi lądu,
- 7b. umiarkowanej morskiej i obszarach nadbrzeżnych,
8. polarnej.

Typ klimatu wpływa na tłumienie trasy przęsła linii OTH. Tłumienie to wynosi około $170 \div 190$ dB dla krótszych przęsła, wykorzystujących zjawisko dyfrakcji, i około $180 \div 260$ dB dla długich przęsła, działających dzięki rozproszeniu troposferycznemu fal radiowych [7]. Dodatkowo, w przęsłach opierających się na rozproszeniu troposferycznym występują krótkotrwałe i długotrwałe fluktuacje poziomu mocy sygnału. Fluktuacje krótkotrwałe są spowodowane ciągłymi zmianami rozkładu współczynnika refrakcji w atmosferze. Ich wpływ na działanie linii radiowej można ograniczyć dzięki technice odbioru zbiorczego. Stosuje się przy tym odbiór zbiorczy :

- przestrzenny,
- częstotliwościowy,
- kątowy [21].

Długotrwałe fluktuacje sygnału wynikają z dziennych i rocznych zmian temperatury, ciśnienia i wilgotności atmosfery. W klimacie umiarkowanym, większe tłumienia trasy przęsła linii radiowej obserwuje się zimą, mniejsze – latem. Fluktuacje te są silniejsze w przypadku krótszych przęsła. Pomiarów wskazują na wartości $10 \div 15$ dB dla tras o długościach $150 \div 250$ km, ale już tylko 2 dB dla trasy o długości 920 km [21]. W cyklu dziennym największe tłumienia występują w godzinach popołudniowych, najmniejsze – wczesnie rano. W innych strefach klimatycznych fluktuacje mogą mieć inny charakter. Szczególnie duże fluktuacje występują w klimacie pustynnym.

3.5. Satelitarne systemy telekomunikacyjne

W systemach satelitarnych wymiana informacji odbywa się drogą radiową za pośrednictwem sztucznych satelitów Ziemi. Według ustaleń Międzynarodowej Konferencji Radiokomunikacyjnej WARC (*World Administrative Radio Conference*) systemy satelitarne dzieli się z punktu widzenia świadczonych przez nie usług na :

- systemy służby stałej FSS (*Fixed Satellite Service*) – usługi dla abonentów stacjonarnych,
- systemy służby ruchomej MSS (*Mobile Satellite Service*) – usługi dla abonentów ruchomych, także dla jednostek lotniczych i morskich,
- systemy służby radiodifuzyjnej BSS (*Broadcast Satellite Service*) – usługi rozgłoszeniowe, programy telewizyjne i radiowe.

W każdym systemie satelitarnym można wyróżnić trzy elementy składowe :

- segment naziemny,
- segment kosmiczny,
- kanał radiowy.

Segment naziemny stanowią terminale abonenckie, ruchome lub stacjonarne, oraz sieć szkieletowa. Do sieci szkieletowej należą również stacje bazowe prowadzące łączność z terminalami abonentów poprzez segment kosmiczny. Sieć szkieletowa może komunikować się z innymi sieciami telekomunikacyjnymi przez węzły zwane adapterami sieciowymi lub węzłami tranzytowymi (*ang. gateway*). W przypadku systemu satelitarnego, świadczącego usługi rozgłoszeniowe, segment naziemny składa się z nadajnika programów telewizyjnych lub radiowych oraz odbiorników abonenckich odbierających te programy za pośrednictwem satelity.

Segment kosmiczny to satelity umieszczone na orbitach okołoziemskich. Satelity można klasyfikować za względu na typ orbity. Wyróżnia się orbity :

- niskie LEO (*Low Earth Orbit*),
- średnie MEO (*Medium Earth Orbit*),
- wysokie eliptyczne HEO (*Highly Elliptical Orbit*),
- geostacjonarne GEO (*GEOstationary orbit*).

Satelity na orbitach LEO przemieszczają się na wysokości od 500 km do 200 km nad powierzchnią Ziemi. Powyżej 2000 km rozpoczyna się pierwsza strefa Van Allena. Obszar, w którym występują protony i elektrony o dużych energiach, mogące doprowadzić poprzez siły

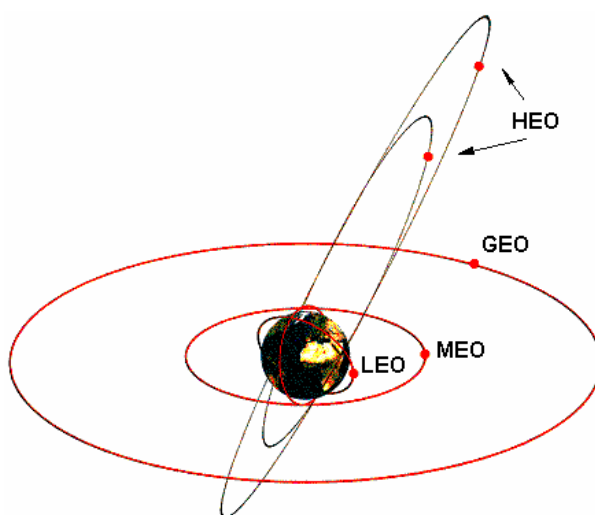
tarcia do szybkiego zniszczenia satelity. Satelita krążąc po tak niskiej orbicie musi mieć dużą prędkość – jego siła odśrodkowa musi zrównoważyć siłę grawitacji. Oznacza to, że z danego punktu na powierzchni Ziemi można prowadzić łączność z satelitą niskoorbitowym przez maksymalnie 20 minut, po tym czasie satelita znika za horyzontem. Budowa globalnego systemu opartego na satelitach niskoorbitowych wymaga instalacji kilkudziesięciu takich satelitów.

Orbity satelitów MEO znajdują się na wysokości od 8 do 12 tys. km. Ograniczenia wysokości od góry i od dołu wynikają z istnienia pierwszej i drugiej strefy Van Allena. Satelita krążący po orbicie MEO jest widziany z jednego punktu na powierzchni Ziemi przez kilka godzin. System globalny wymaga minimum 10 satelitów tego typu.

Perygeum orbity satelitów HEO wynosi około 500 km, zaś apogeum około 50 tys. km. Dzięki takim właśnie wysokościach orbity, satelita jest widoczny z danego obszaru na Ziemi jako prawie nieruchomy przez pewien okres czasu. W oparciu o kilka satelitów HEO można stworzyć system o zasięgu regionalnym.

Satelity geostacjonarne przemieszczają się po orbitach kołowych na wysokości 35 786 km nad powierzchnią Ziemi. Satelita krążący po takiej orbicie w płaszczyźnie równika ziemskiego jest widziany z powierzchni Ziemi jako obiekt nieruchomy. Wynika to z równych prędkości kątowych Ziemi i satelity.

Na rysunku 3.3 porównano wyżej wymienione typy orbit.



Rys. 3.3. Porównanie orbit różnych typów [15]

Kanały radiowe, wykorzystywane w systemach satelitarnych lokuje się w określonych na forum międzynarodowym zakresach częstotliwości przeznaczonych dla telekomunikacji satelitarnej. W tabeli 3.4 zaprezentowano zakresy częstotliwości stosowane w Stanach Zjednoczonych.

Tabela 3.4

Zakresy i pasma częstotliwości przeznaczone dla telekomunikacji satelitarnej [14], [31]

Nazwa pasma	Pasma	Zakres częstotliwości w Stanach Zjednoczonych
L	1,5 GHz	1,53 ÷ 1,559 GHz, 1,6265 ÷ 1,6605 GHz
S	2,5 GHz	2,5 ÷ 2,69 GHz
C	4/6 GHz	3,7 ÷ 4,2 GHz, 5,925 ÷ 6,425 GHz
X		7,25 ÷ 7,75 GHz, 7,9 ÷ 8,4 GHz
Ku	11/14 GHz lub 12/14 GHz	10,95 ÷ 11,2 GHz, 11,45 ÷ 12,7 GHz
Ka	20/30 GHz	17,7 ÷ 20,2 GHz, 27,5 ÷ 30 GHz
V	40 GHz	

Sygnal radiowy w łączu Ziemia-satelita przechodzi przez wszystkie warstwy atmosfery. Ponieważ systemy satelitarne wykorzystują częstotliwości powyżej 1 GHz, wpływ jonosfery na ich działanie jest znikomy. Dużo istotniejszą rolę odgrywa troposfera. Na skutek zachodzących w niej procesów, sygnał radiowy w łączu satelitarnym podlega takim zjawiskom jak tłumienie w deszczu i gazach atmosferycznych, scyntylacje i przeniki polaryzacyjne.

3.6. Łączność amatorska

Służba amatorska (krótkofalarstwo) to, według Prawa Telekomunikacyjnego, "służba radiokomunikacyjna, mająca na celu nawiązywanie wzajemnych łączności, badania techniczne oraz indywidualne szkolenie, wykonywane w celach niezarobkowych przez uprawnione osoby wyłącznie dla potrzeb własnych" [16]. Na działalność krótkofalarską, czyli posiadanie i używanie radiostacji amatorskiej, wymagana jest licencja, wydawana przez

krótkofalarskie związki radioamatorów. W Polsce jest to Polski Związek Krótkofalowców. Największą światową federacją zrzeszającą organizacje radioamatorów jest IARU (*International Amateur Radio Union*).

Radioamatorzy z całego świata nawiązują ze sobą połączenia radiowe, zwane łącznościami, które są później potwierdzane poprzez wzajemne wysłanie pocztą tzw. kart QSL. Podczas łączności, radioamatorzy posługują się krótkofalarskimi znakami wywoławczymi (np. SP3AR lub SQ8QED), które stanowią ich identyfikatory i zastępują dane osobowe. Najczęściej stosowanymi rodzajami łączności są [12]:

- telegrafia (CW) – komunikacja przy użyciu alfabetu Morse'a,
- łączność głosowa z analogowymi modulacjami AM, FM lub SSB,
- Packet Radio – cyfrowa transmisja pakietowa z szybkością bitową do 9,6 kbit/s,
- dalekopisowa łączność RTTY – cyfrowa transmisja znaków w kodzie ASCII lub Baudota z modulacją AFSK.

Do nawiązania amatorskiej łączności radiowej wykorzystywane są praktycznie wszystkie zjawiska umożliwiające dalekosiężną propagację fal radiowych w atmosferze. Mogą to być przypadki propagacji troposferycznej :

- przy bezpośredniej widoczności anten,
- po jednokrotnym lub kilkukrotnym odbiciu się fali radiowej od powierzchni Ziemi,
- dzięki dyfrakcji fali na przeszkodach terenowych,
- dzięki troposferycznemu rozproszeniu fali radiowej.

Do trudniejszych technik należą łączności jonosferyczne opierające się na rozproszeniu lub odbiciu się fali radiowej od swobodnych elektronów znajdujących się w jonosferze. Możliwe są również łączności z odbiciem od Księżyca lub przy wykorzystaniu sztucznych satelitów służby amatorskiej.

Radioamatorzy używają różnego rodzaju anten. Najczęściej są to anteny [12]:

- drutowe,
- pionowe,
- Yagi,
- pętlowe,
- magnetyczne,
- LPDA (logarytmiczno-periodyczne),
- paraboliczne.

Łączności amatorskie przeprowadzane są w przeznaczonych do tego celu zakresach częstotliwości (tab. 3.5).

Tabela 3.5
Zakresy częstotliwości służby amatorskiej [38]

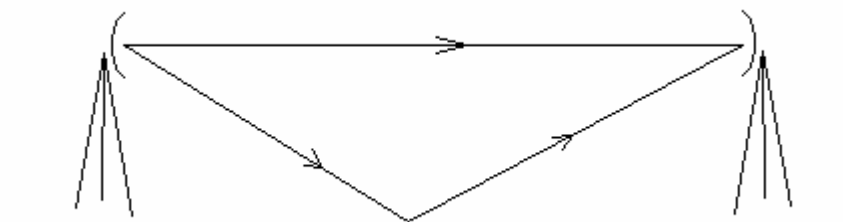
Zakres częstotliwości [MHz]	Zakres częstotliwości [GHz]
1,81 ÷ 1,980	1,24 ÷ 1,3
3,5 ÷ 3,800	2,3 ÷ 2,45
7 ÷ 7,1	3,4 ÷ 3,47
10,1 ÷ 10,15	5,65 ÷ 5,85
14 ÷ 14,35	10 ÷ 10,5
18,068 ÷ 18,168	24 ÷ 24,25
21 ÷ 21,45	47 ÷ 47,2
24,89 ÷ 24,99	75,5 ÷ 81
28 ÷ 29,7	119,98 ÷ 120,02
50 ÷ 52	142 ÷ 149
144 ÷ 146	241 ÷ 250
430 ÷ 440	

4. Propagacja wielodrogowa sygnału radiowego

W większości systemów radiokomunikacyjnych, fala radiowa dociera od anteny nadawczej do anteny odbiorczej nie tylko po drodze bezpośredniej, ale też po odbiciu od powierzchni Ziemi. Może istnieć więcej niż jedna fala radiowa odbijająca się od powierzchni Ziemi i docierająca do anteny odbiorczej – zależy to od ukształtowania terenu. Z kolei od rodzaju terenu i pokrywającej go roślinności będzie zależał poziom mocy fali odbitej. Fala docierająca bezpośrednio i fale odbite od gruntu interferują ze sobą w odbiorniku, co jest najczęściej zjawiskiem niekorzystnym, generującym głęboki zanik sygnału.

4.1. Analiza przyziemnej propagacji fal radiowych

Najprostszy model przyziemnej przestrzennej propagacji fal radiowych zakłada, że anteny nadawcza i odbiorcza znajdują się wysoko nad płaską powierzchnią Ziemi [36]. Fala radiowa dociera do anteny odbiorczej dwoma drogami – bezpośrednio i po odbiciu od powierzchni Ziemi (rys. 4.1). Te dwie fale interferują ze sobą w pobliżu anteny odbiorczej. Natężenie fali wypadkowej jest sumą wektorową natężeń pól obu fal. W zależności od różnicy faz wektorów może nastąpić wzmocnienie sygnału, całkowite jego wytłumienie lub sytuacja pośrednia.



Rys. 4.1. Model przyziemnej przestrzennej propagacji fal radiowych

W takiej sytuacji, natężenie wypadkowej fali radiowej w odbiorniku dane jest zależnością, zwaną wzorem Wwiedenskiego [3] :

$$E = \frac{2\sqrt{60G_A P_\Sigma}}{r} \left| \sin \frac{2\pi f h_1 h_2}{cr} \right| \quad (4.1)$$

gdzie:

P_Σ - moc czynna emitowana przez antenę nadawczą,

G_A - zysk energetyczny anteny na kierunku nadawania,

r - odległość pomiędzy antenami,

f - częstotliwość fali radiowej,

h_1, h_2 - wysokości zawieszenia anten nadawczej i odbiorczej,

c - prędkość światła.

Przy wyprowadzeniu równania (4.1) przyjmuje się następujące założenia :

– wysokości zawieszenia anten są niewielkie w porównaniu z odległością między nimi:

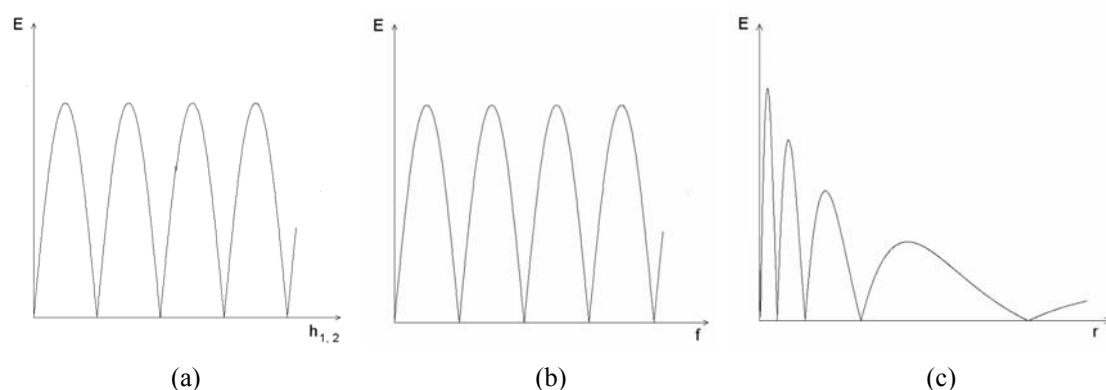
$$\frac{h_1 + h_2}{r} \ll 1$$

– zyski energetyczne anten nadawczej i odbiorczej dla kierunków nadawania/odbioru obu fal radiowych (bezpośredniej i odbitej) są w przybliżeniu takie same,

– różnica dróg optycznych obu fal radiowych jest niewielka w porównaniu z długością całej drogi r i jednocześnie jest porównywalna z długością fali λ ,

– przy odbiciu fali radiowej od powierzchni Ziemi następuje tylko zmiana jej fazy o π , zaś amplituda pozostaje praktycznie bez zmian .

W oparciu o wzór Wwiedenskiego możliwa jest ocena zależności natężenia fali radiowej w miejscu lokalizacji odbiornika od wysokości zawieszenia obu anten, częstotliwości fali i odległości między antenami. Zależności te, w funkcji wysokości zawieszenia jednej z anten lub częstotliwości fali, mają podobny przebieg (rys. 4.2.a i b). Okresowo powtarzające się minima tych funkcji oznaczają głębokie zaniki sygnału. W przypadku zależności natężenia fali radiowej od odległości, również występują minima oznaczające zaniki (rys. 4.2.c). Jednocześnie, wraz ze wzrostem odległości wypadkowa wartość natężenie pola fali radiowej dąży do zera.



Rys. 4.2. Zależności natężenia fali radiowej w odbiorniku od wysokości zawieszenia anten (a), częstotliwości fali (b) i odległości (c)

Z analizy wzoru Wwiedenskiego wynikają dwa wnioski. Po pierwsze, wybór właściwych wysokości zawieszenia anten umożliwia uniknięcie głębokich zaników wielodrogowych, spowodowanych niekorzystną interferencją fal radiowych w pobliżu anteny odbiorczej. Po drugie, zaniki wielodrogowe są zanikami selektywnymi, tzn. szczególnie silne tłumienia sygnałów występują dla konkretnych, powtarzających się okresowo częstotliwości. Drugi wniosek można potwierdzić obliczając różnicę dróg optycznych dla fali bezpośredniej i odbitej od powierzchni Ziemi. Gdy różnica ta jest równa nieparzystej wielokrotności połowy długości fali – dochodzi do całkowitego wytłumienia fali radiowej w odbiorniku :

$$\frac{\lambda}{2} \cdot (2n + 1) = \Delta r, \quad n \in N \quad , \Delta r - \text{różnica dróg optycznych}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$f = \frac{c(2n + 1)}{2 \cdot \Delta r}, \quad n \in N \quad (4.2)$$

Częstotliwości, dla których występują głębokie zaniki, powtarzają się z okresem równym $\frac{c}{\Delta r}$.

4.2. Dyspersja sygnału radiowego i interferencje międzysymbolowe

Kolejnym skutkiem propagacji wielodrogowej jest zjawisko dyspersji. Gdy fala radiowa propaguje między anteną nadawczą a anteną odbiorczą różnymi drogami, różnica czasów propagacji powoduje, że dochodzi do dyspersji czyli rozmycia sygnału radiowego w

czasie. Jeżeli różnica ta jest porównywalna z czasem trwania pojedynczego symbolu w sygnale radiowym, występują zakłócenia interferencyjne międzysymbolowe ISI (*InterSymbol Interference*), które pogarszają bitową stopę błędów sygnału. Miarą dyspersji jest τ_d - różnica najkrótszego i najdłuższego z czasów propagacji między anteną nadawczą i odbiorczą, która może być obliczona z zależności :

$$\tau_d = \frac{l_{\max} - l_{\min}}{v} \quad (4.3)$$

gdzie :

l_{\max}, l_{\min} - odpowiednio najdłuższa i najkrótsza trasa, wzdłuż której propaguje fala radiowa,
 v - prędkość fali radiowej.

Poza propagacją wielodrogową, dyspersję mogą powodować opóźnienia sygnału radiowego powstające w atmosferze. W troposferze, jest to skutkiem fluktuacji wartości wskaźnika refrakcji wzdłuż trasy propagacji fali radiowej (rozdział 5.1). Z kolei w jonosferze, opóźnienie sygnału radiowego jest proporcjonalne do gęstości elektronów swobodnych.

Spowodowane dyspersją zakłócenia interferencyjne międzysymbolowe można zredukować, ograniczając propagację wielodrogową w danym systemie radiowym. Inną metodą jest transmitowanie okresu ochronnego po każdym symbolu informacji. Takie rozwiązanie oznacza jednak zmniejszenie szybkości transmisji.

4.3. Lokalizacja stref odbicia i szacowanie głębokości zaników wielodrogowych

W rzeczywistym systemie radiokomunikacyjnym, fale radiowe opuszczające antenę nadawczą mogą odbijać się od powierzchni Ziemi w kilku miejscach i trafiać do anteny odbiorczej. Zależy to od ukształtowania terenu na trasie pomiędzy stacją nadawczą a stacją odbiorczą. Problem ten jest szczególnie istotny przy projektowaniu horyzontowych linii radiowych i szerokopasmowych radiowych systemów dostępu abonenckiego RSDA. Znając

wysokości zawieszenia anten i profil hipsometryczny trasy można wyznaczyć położenie i szerokość strefy odbicia, korzystając z zależności [8] :

$$D_I = r \cdot \frac{h_1}{h_1 + h_2} \quad (4.4)$$

$$D_G = r \cdot \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}} \quad (4.5)$$

gdzie:

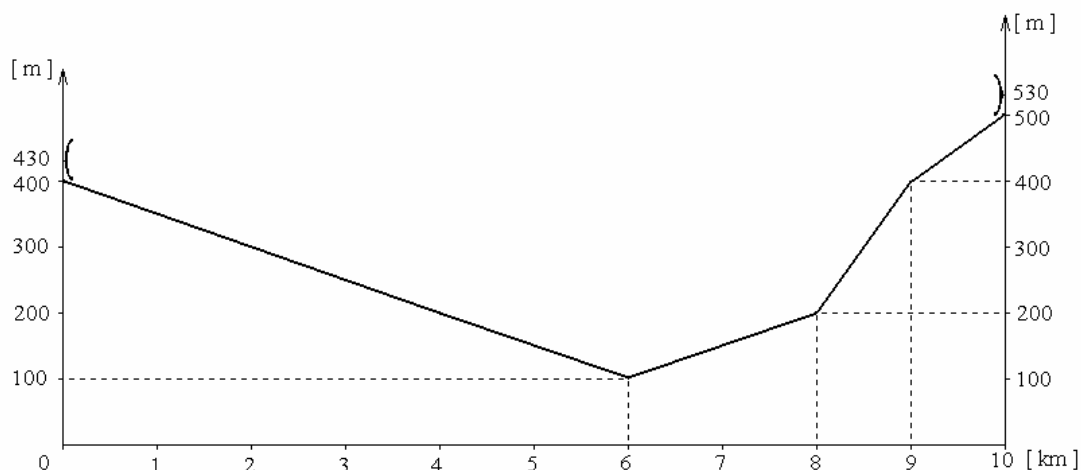
r - długość trasy linii radiowej,

h_1 - wysokość anteny niżej zawieszanej,

h_2 - wysokość anteny wyżej zawieszanej.

Strefa odbicia zaczyna się w odległości D_I i kończy w odległości D_G , licząc od anteny niżej. W metodzie tej nie jest znana wysokość h_0 , względem której należy obliczać wysokości zawieszenia anten. Dlatego wstępnie za h_0 przyjmuje się dowolną wysokość, np. najniższy punkt na trasie propagacji. Po wyznaczeniu strefy odbicia, za h_0 należy przyjąć wysokość środka tej strefy i obliczenia powtórzyć uzyskując nową strefę odbicia i nową wysokość h_0 . Powyższe czynności należy powtarzać tak długo, aż kolejne strefy odbicia będą różniły się od siebie o wartość pomijalnie małą.

Powyższa metoda ma niestety istotną wadę. Gdy poszczególne odcinki terenu są nachylone do powierzchni Ziemi pod pewnym, niezerowym kątem, kierunek odbicia fal radiowych będzie zupełnie inny niż przewidywany. Dla każdego takiego odcinka terenu, należałoby przeorientować układ współrzędnych tak, aby odcinek ten stał się poziomy. Następnie należałoby obliczyć nowe współrzędne anten i sprawdzić, czy strefa odbicia znajduje się na badanym odcinku. Możliwe, że na trasie pomiędzy stacją nadawczą a stacją odbiorczą będzie znajdowało się kilka, a nawet kilkanaście takich stref. Taka metoda postępowania wymaga znajomości dokładnego profilu hipsometrycznego trasy i programu komputerowego wspomagającego prowadzenie obliczeń dla każdego odcinka trasy. Kod takiego programu w języku C znajduje się w załączniku A. W oparciu o wspomniany program przeprowadzono obliczenia dla przykładowego profilu hipsometrycznego trasy. Profil ten zaprezentowano na rysunku 4.3, a wyniki obliczeń – wykonane metodą tradycyjną i przy pomocy programu – znajdują się w tabeli 4.1.



Rys. 4.3. Profil hipsometryczny trasy przyjęty do obliczeń stref odbicia

Tabela 4.1

Porównanie wyników obliczeń stref odbicia dla profilu hipsometrycznego z rys. 4.3.

Metoda	Strefy odbicia [m]
według wzorów (4.3) i (4.4)	4 164 ÷ 4 579
według programu z załącznika A	452 ÷ 1 784 6 253 ÷ 7 102 9 000 ÷ 9 693

Powyższe rozważania pozwalają stwierdzić, że wysokości zawieszenia anten h_1 i h_2 mają decydujący wpływ na położenie stref odbicia. Zmieniając wysokości h_1 i h_2 można zmieniać położenie tych stref. Najkorzystniej jest, gdy strefy odbicia fali zakłócającej leżą w obszarach, które silnie tłumią padającą na nie fale radiową. Są to, np. gęste lasy lub krzewy. Tereny o gładkiej powierzchni, a zwłaszcza obszary wodne dobrze odbijają fale radiowe, wywołując głębokie zaniki sygnału na wejściu odbiornika. W tabeli 4.2 zestawiono różne rodzaje terenu i odpowiadające im głębokości zaników wielodrogowych.

Tabela 4.2

Głębokości zaników fali radiowej odpowiadające różnym rodzajom terenu w strefach odbić [7]

Typ terenu w strefie odbicia	Głębokość zaników [dB]
Gęsty las	0 ÷ 2
Teren słabo zadrzewiony, krzewy	2 ÷ 5
Wysokie trawy	5 ÷ 10
Niskie trawy, pofalowana powierzchnia wody	10 ÷ 20
Gładka powierzchnia wody lub ziemi	20 ÷ 40

Istnieją szczegółowe metody wyznaczania głębokości zaników wielodrogowych w horyzontowych liniach radiowych. Najczęściej, zaniki wielodrogowe powstałe na skutek odbicia fali radiowej od powierzchni gruntu analizowane są wspólnie z zanikami wynikającymi z :

- propagacji wielodrogowej fali radiowej w samej atmosferze,
- rozproszenia fali radiowej w atmosferze,
- nietypowego kierunku propagacji fali w atmosferze i spowodowanego tym pogorszenia się zysków energetycznych anten nadawczej i odbiorczej.

Metody ITU-R, Barnetta i firmy Siemens umożliwiają sumaryczną ocenę wpływu wszystkich powyższych zjawisk na powstawanie zaników w liniach LOS. Najpopularniejszą z nich jest metoda ITU-R [19], pozwalająca obliczyć procent czasu w skali najgorszego miesiąca w roku, w którym zaniki przekraczają określoną wartość tłumienia A . Zależność dla małych procentów czasu, czyli dla bardzo głębokich zaników, przybiera postać :

$$p_w = r^{3,2} \left(1 + \frac{|h_1 - h_2|}{r}\right)^{-0,97} \cdot 10^{-3,9 - 0,003dN_1 + 0,032f - 0,00085h_t - A/10} \cdot S_a^{-0,42} \quad (4.6)$$

gdzie:

p_w – procent czasu w skali najgorszego miesiąca w roku, w którym zaniki wielodrogowe przekraczają A [dB],

r – długość trasy radiowej [km],

h_1, h_2 – wysokości zawieszenia anten [m],

h_L – wysokość nad poziom morza anteny niższej [m],

dN_1 – zmiana współczynnika refrakcji atmosfery w najniższych 65 metrach nie przekraczana przez 1 % czasu roku,

f – częstotliwość fali radiowej [GHz],

s_a – współczynnik zróżnicowania wysokościowego terenu.

Metoda ITU-R pozwala też na obliczenie procentu czasu, w którym przekraczane są zaniki o małej głębokości oraz obliczanie procentu czasu, kiedy występują wzmocnienia sygnału.

4.4. Sposoby unikania lub zmniejszania głębokości zaników wielodrogowych

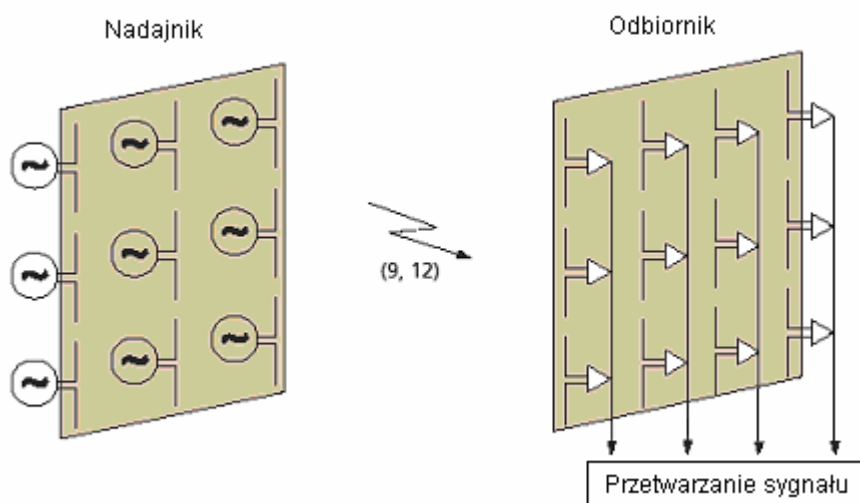
W celu przeciwdziałania zanikom wielodrogowym bardzo często stosuje się odbiór zbiorczy – przestrzenny, kątowy lub częstotliwościowy. Jest to jednak rozwiązanie kosztowne, dlatego szuka się innych, prostszych metod niwelowania tego zjawiska. Do najważniejszych z nich należą [19]:

1. Regulacja wysokości zawieszenia anten w celu przesunięcia stref odbicia w obszary o silniejszym tłumieniu fali radiowej przez powierzchnię gruntu.
2. Zwiększanie kąta inklinacji (kąta nachylenia względem płaszczyzny poziomej) trajektorii fali bezpośredniej przez umieszczenie jednej z anten maksymalnie wysoko, drugiej – nisko, na wieżach lub masztach antenowych. Dzięki temu zwiększa się kąt między falą bezpośrednią i falą odbitą, co przy małych kątach połowy mocy anten, powoduje silniejsze tłumienie fal odbitych. Dodatkowe wzmocnienie tego efektu można uzyskać przez nieznaczne zwiększenie kątów elewacji obu anten.
3. Odpowiedni wybór lokalizacji stacji radiowej, który spowoduje zasłonięcie anteny, przez naturalne przeszkody terenowe (skały, wzniesienia, itp.), przed ewentualną falą odbitą. Analogicznie, można sztucznie zasłonić część przestrzeni dookoła anteny. Technika ta może jednak spowodować zwiększenie tłumienia fali bezpośredniej, na skutek ograniczenia przestrzeni uczestniczącej efektywnie w przenoszeniu energii między antenami .

4. Wykorzystywanie polaryzacji wertykalnej fali radiowej dla tras znajdujących się nad obszarami wodnymi. Przy kącie padania fali na powierzchnię wody większych od $0,7^\circ$ i częstotliwości fali radiowej powyżej 3 GHz, tłumienie powierzchni wody dla fali o polaryzacji wertykalnej jest większe o 2 do 17 dB w porównaniu z tłumieniem dla fali spolaryzowanej horyzontalnie [19].

4.5. Pozytywne aspekty propagacji wielodrogowej

Istnieją również koncepcje wykorzystania zjawiska propagacji wielodrogowej w celu zwiększenia przepustowości systemów radiokomunikacyjnych. Jedną z nich są układy wieloantenowe MIMO (*Multiple In Multiple Out*), zwane również MEA (*Multi Element Array*) [6]. Są to łącza radiowe, w których po stronie nadawczej znajduje się układ anten nadających różne sygnały radiowe na tej samej częstotliwości radiowej. Po stronie odbiorczej występuje podobny układ anten. Każda z anten odbiera sygnał będący sumą sygnałów nadawanych przez wszystkie anteny nadawcze (rys. 4.4). Dzięki istnieniu propagacji wielodrogowej, kanał radiowy między każdą z anten nadawczych i odbiorczych ma inną transmitancję, czyli funkcję przenoszenia. Wówczas dany sygnał radiowy jest odbierany przez konkretną anteną odbiorczą z innym tłumieniem. Pozwala to na oddzielenie od siebie poszczególnych sygnałów radiowych po stronie odbiorczej systemu i zwiększenie przepustowości łącza radiowego proporcjonalnie do liczby anten.



Rys. 4.4. Schemat systemu MIMO z 9-oma antenami nadawczymi i 12-oma antenami odbiorczymi [6]

Koncepcja systemów MIMO została opublikowana w 1996 roku. Jej autorzy, Gerard Foschini i Michael Gans, przyjęli następujące założenia przy jej opracowaniu. Transmitancje poszczególnych kanałów radiowych nie zmieniają się albo zmieniają się bardzo powoli. Warunkiem koniecznym jest zatem to, by prędkość przemieszczania się anten nadawczych/odbiorczych była ograniczona, a najlepiej gdy anteny te są zamocowane na stałe w określonych miejscach w przestrzeni. Po drugie, pasmo częstotliwości, w którym prowadzona jest transmisja jest na tyle wąskie, że można założyć, że transmitancje kanałów są stałe w całym zakresie analizowanych częstotliwości. Ponadto transmitancje kanałów nie są znane w nadajniku, ale są znane w odbiorniku, który na bieżąco śledzi ich zmiany. Transmisja prowadzona jest w środowisku z dużą ilością obiektów odbijających i rozpraszających nadawane sygnały, co sprzyja propagacji wielodrogowej. W efekcie, w antenie odbiorczej nie można wyróżnić głównego sygnału dochodzącego drogą bezpośrednią, lecz odbieranych jest kilka dużej mocy sygnałów docierającymi z różnych kierunków. Odległości między poszczególnymi antenami nadawczymi i odbiorczymi są równe co najmniej połowie długości emitowanej fali radiowej. Wtedy współczynnik korelacji wzajemnej odbieranych sygnałów jest, z prawdopodobieństwem bliskim jedności, nie większy niż 0.5, co umożliwi rozdzielenie sygnałów radiowych po stronie odbiorczej.

Od roku 1996 prowadzone są intensywne badania nad dalszym rozwojem systemów MIMO, w tym przede wszystkim w zastosowaniach szerokopasmowych i z poruszającymi się antenami. Istnieją pewne koncepcje zastosowania systemów MIMO w sieciach telefonii komórkowej trzeciej generacji UMTS.

Innym pomysłem wykorzystania propagacji wielodrogowej jest technika "*multiuser diversity*" przeznaczona dla interfejsu radiowego stacja bazowa-terminal abonenta w sieciach telefonii komórkowej [11]. Koncepcja "*multiuser diversity*" zakłada prowadzenie przez stację bazową komunikacji z tymi abonentami, którzy w danym czasie mają z nią najlepsze połączenie. W terminalach abonenckich wykonywane są ciągłe pomiary parametrów kanału radiowego, a wyniki tych pomiarów są przesyłane na bieżąco do stacji bazowej. Na tej podstawie w stacji bazowej wybierane są te terminale, dla których stosunek mocy sygnału nośnego do szumu ma największą wartość i tylko z nimi w danej chwili prowadzona jest łączność. Jeżeli w określonej komórce znajduje się duża liczba terminali abonenckich i warunki propagacyjne zmieniają się szybko, to statystycznie żaden z terminali nie będzie

poszkodowany. A fakt, że stosunek mocy sygnału do mocy szumu będzie miał dużą wartość umożliwi prowadzenie transmisji z większą szybkością. Na przykład będzie możliwe wykorzystanie techniki modulacji z większą liczbą punktów w konstelacji stanów. Zmienność warunków propagacyjnych może być zapewniona właśnie w środowisku propagacji wielodrogowej, szczególnie przy szybko poruszających się terminalach abonenckich. Technika "*multiuser diversity*" została zaprezentowana w pracy [11].

5. Fale radiowe w atmosferze ziemskiej

Rozdział ten stanowi przegląd zjawisk związanych z propagacją fal radiowych w atmosferze ziemskiej. Kolejno omówione zostaną zjawiska :

- refrakcji,
- dyfrakcji,
- rozpraszania w troposferze,
- tłumienia w deszczu, gazach, chmurach i mgle,
- scyntylacji,
- przenieńców polaryzacyjnych.

5.1. Refrakcja

Refrakcja to zjawisko załamania fali radiowej wynikające z niejednorodności atmosfery. Każda fala elektromagnetyczna, przechodząc z jednego ośrodka do drugiego – o innym współczynniku załamania, załamuje się zgodnie z prawem Snelliusa. Współczynnik załamania atmosfery nie jest wielkością stałą, co powoduje że trajektorie fal elektromagnetycznych propagujących w atmosferze są zakrzywiane.

Współczynnik załamania atmosfery n jest tylko nieznacznie większy od 1, dlatego przyjęło się, zamiast niego, operować innym parametrem – wskaźnikiem refrakcji N , określonym przez zależność:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (5.1)$$

Średnia wartość wskaźnika refrakcji dla poziomego morza wynosi 315.

Szczegółowe mapy tego wskaźnika dla miesiący lutego i sierpnia zaprezentowano na rysunkach 5.1 i 5.2.

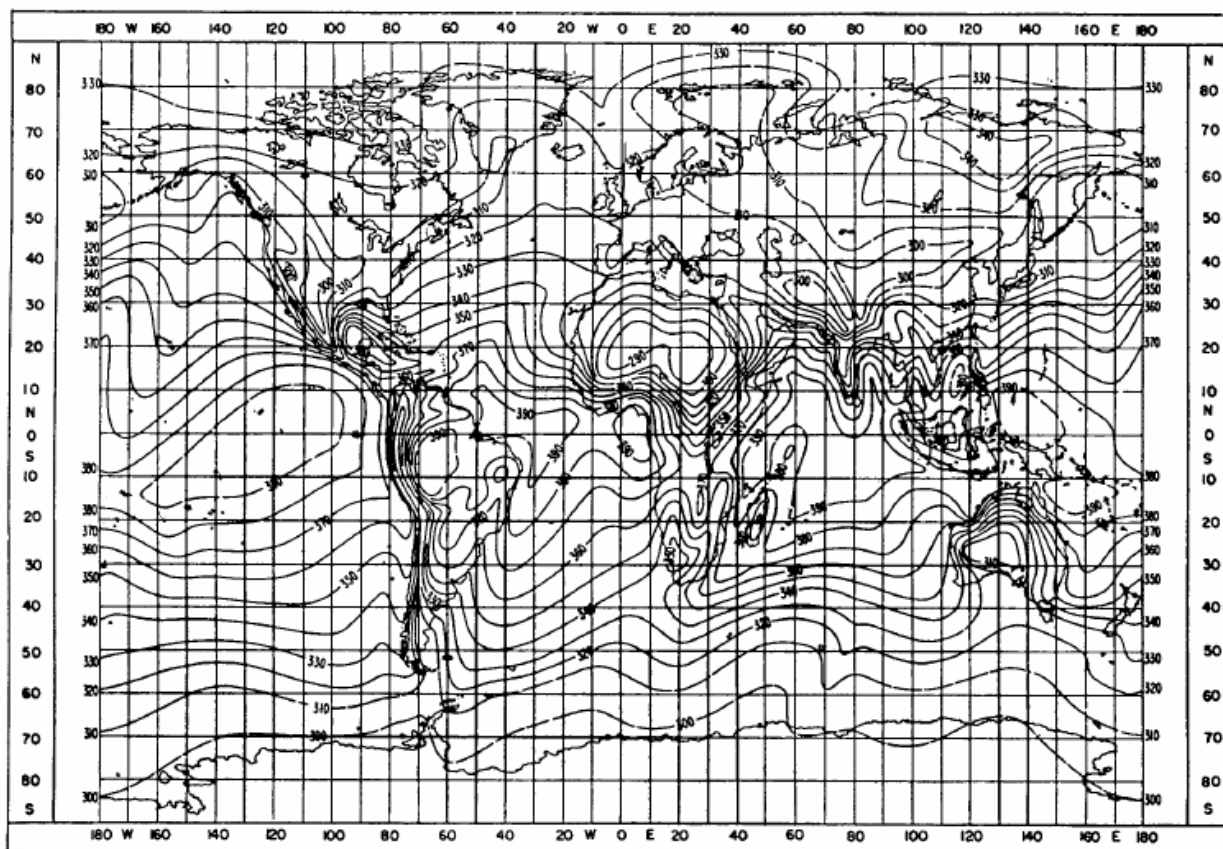
Wskaźnik refrakcji zależy od temperatury T , ciśnienia p i wilgotności e atmosfery [18]:

$$N = \frac{77,6}{T} \left(p + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (5.2)$$

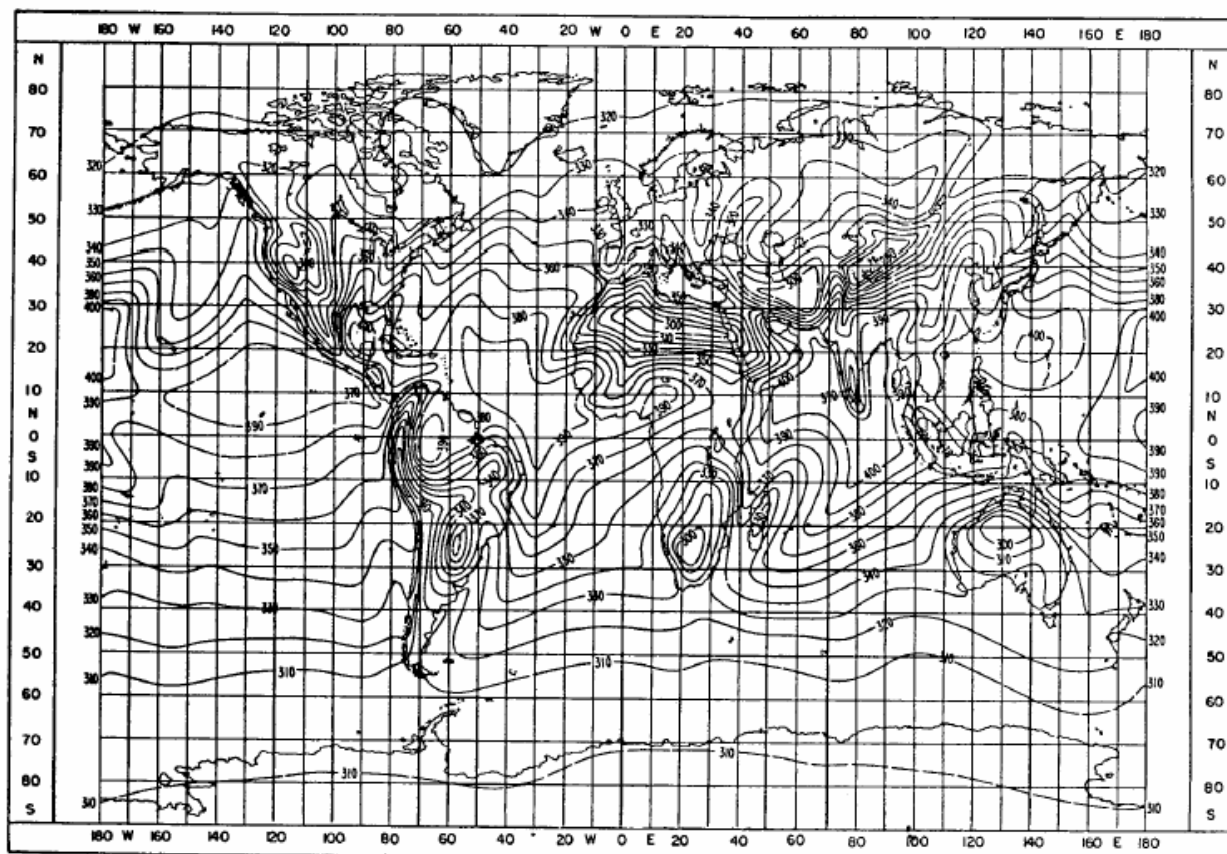
Zarówno ciśnienie, jak i wilgotność atmosfery zazwyczaj maleją wraz ze wzrostem wysokości. Dlatego też wartość wskaźnika refrakcji najczęściej maleje z wysokością ze średnią szybkością 40 jednostek na kilometr. W takiej sytuacji trajektoria fali radiowej jest skierowana wypukłością ku górnym warstwom atmosfery. Gdy gradient wskaźnika refrakcji jest stały ($dN/dh = \text{const}$), fala radiowa porusza się po łuku koła o promieniu ρ [24] :

$$\rho = \frac{-10^6}{\frac{dN}{dh}} \quad (5.3)$$

Zmiany wskaźnika refrakcji w płaszczyźnie poziomej są zazwyczaj zaniedbywane.



Rys. 5.1. Średnia wartość wskaźnika refrakcji na poziomie morza dla miesiący lutego [18]



Rys. 5.2. Średnia wartość wskaźnika refrakcji na poziomie morza dla miesiąca sierpnia [18]

Refrakcję atmosferyczną można określić również za pomocą współczynnika nasilenia refrakcji K . Związek pomiędzy współczynnikiem K , a gradientem wskaźnika refrakcji przedstawia zależność [7]:

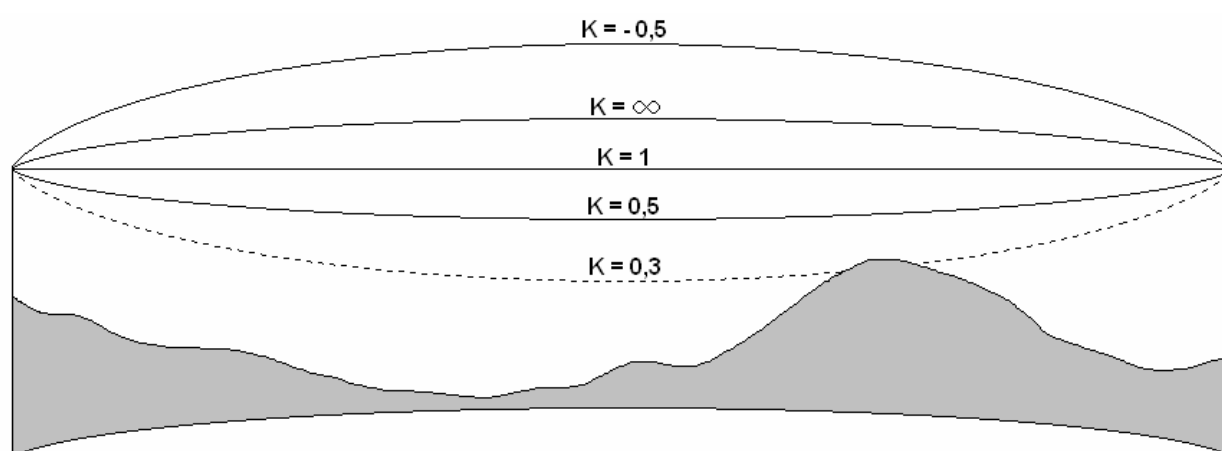
$$K \approx \left(1 + \frac{dN}{dh} \cdot \frac{1}{157}\right)^{-1} \quad (5.4)$$

Różne typy refrakcji, związane z różnymi wartościami gradientu wskaźnika refrakcji i współczynnika K , zostały przedstawione w tabeli 5.1.

Tab. 5.1
Typy refrakcji atmosferycznej (R - promień kuli ziemskiej)

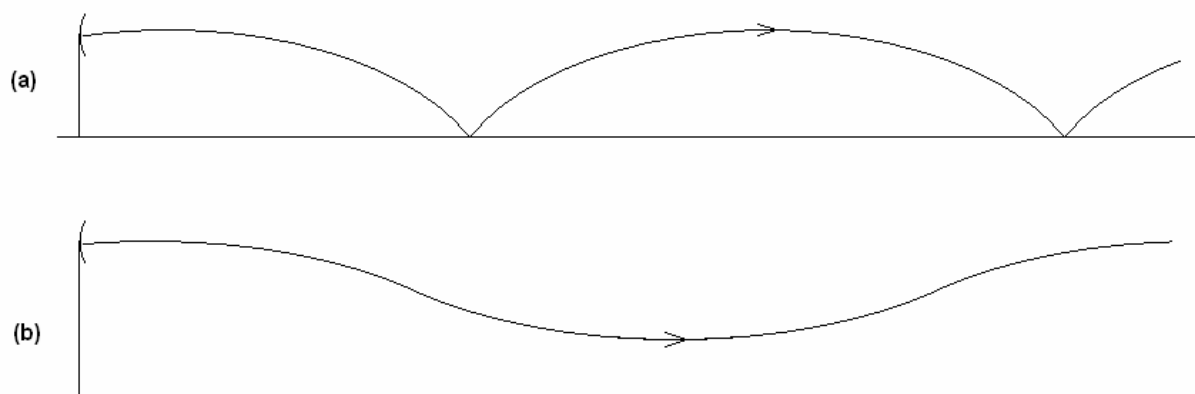
Typ refrakcji	gradient wskaźnika refrakcji $\frac{dN}{dh}$	promień krzywizny fali radiowej ρ	współczynnik nasilenia refrakcji K
superrefrakcja	< -157	$< R$	< 0
r. krytyczna	-157	R	∞
r. normalna	-40	25 000 km	1,33
r. zerowa	0	∞	1
r. ujemna	> 0	< 0	$0 \div 1$

Skutkiem refrakcji jest przede wszystkim zakrzywienie trajektorii fal radiowych propagujących w atmosferze. Najczęściej, fale radiowe są odchylane w kierunku powierzchni Ziemi – gradient wskaźnika refrakcji jest ujemny. Jednak przy niekorzystnych warunkach atmosferycznych, fala radiowa może być zakrzywiana do góry i może się zdarzyć, że w ogóle nie dotrze do stacji odbiorczej (rys. 5.3). Podczas projektowania danego systemu radiokomunikacyjnego, należy tak dobrać wysokości zawieszenia anten, aby nawet przy najbardziej niekorzystnej wartości współczynnika nasilenia refrakcji, fala radiowa mogła swobodnie propagować na trasie pomiędzy anteną nadawczą a odbiorczą. Jest to szczególnie istotne przy projektowaniu horyzontowych linii radiowych i systemów LMDS.



Rys. 5.3. Propagacja fali radiowej przy różnej wartości współczynnika nasilenia refrakcji K

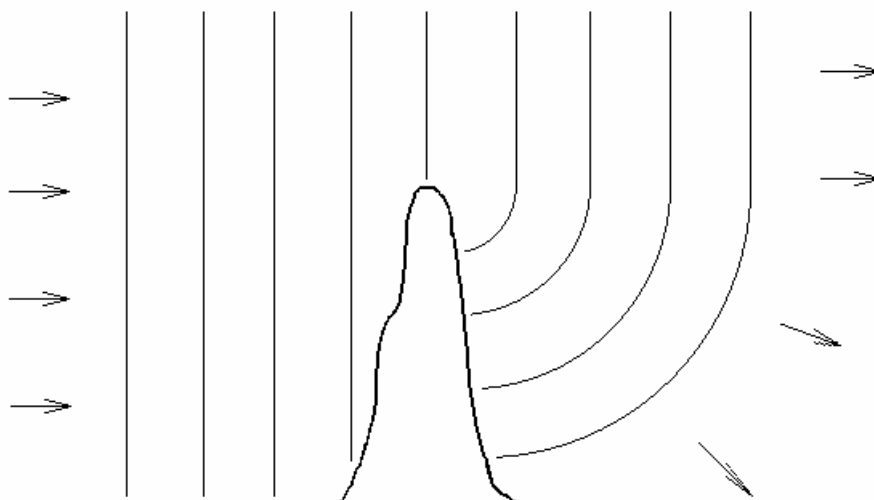
W pionowym przekroju atmosfery rzadko kiedy gradient wskaźnika refrakcji jest wielkością stałą. Oznacza to, że fale radiowe mogą propagować po różnych krzywych, w szczególności nie tylko po wycinkach kół. Taka sytuacja sprzyja propagacji wielodrogowej i rozproszeniu fal radiowych w atmosferze. Oba te zjawiska zwiększają prawdopodobieństwo wystąpienia głębokich zaników sygnału radiowego w antenie odbiorczej. W specyficznych warunkach, może też dojść do powstania duktów atmosferycznych (rys. 5.4). Dukty przyziemne tworzą się, gdy występuje zjawisko superrefrakcji. Z kolei dukty uniesione powstają, gdy wskaźnik refrakcji gwałtownie wzrasta do pewnej wysokości, a następnie zaczyna szybko maleć. Dukty atmosferyczne umożliwiają propagację fal radiowych na bardzo duże odległości i z tego powodu są często wykorzystywane w amatorskiej łączności radiowej. Z drugiej strony tak długodystansowa propagacja fal radiowych może wywoływać zakłócenia odległych systemów radiokomunikacyjnych.



Rys. 5.4. Dukty atmosferyczne – (a) przyziemny, (b) uniesiony

5.2. Dyfrakcja

Dyfrakcja dotyczy każdego rodzaju fal i polega na ugięciu fali na przeszkodzie o rozmiarze porównywalnym lub większym od długości fali (rys. 5.5). Do opisu zjawiska dyfrakcji wykorzystuje się zasadę Huyghensa, mówiącą o tym, że wszystkie punkty czoła fali można potraktować jako źródła nowych fal kulistych [9].



Rys. 5.5. Zjawisko dyfrakcji na przeszkodzie

W systemach radiokomunikacyjnych zastosowanie znalazła dyfrakcja fal radiowych na przeszkodach terenowych – wniesieniach, wysokich budynkach – znajdujących się na drodze propagacji fali. Dzięki dyfrakcji, fale radiowe docierają również do miejsc, które są zasłonięte przeszkodami terenowymi i nie istnieje bezpośrednia widoczność między nimi a anteną nadawczą. Zjawisko dyfrakcji jest wykorzystywane w pozahoryzontowych liniach radiowych. Jest również uwzględniane przy obliczaniu zasięgów stacji bazowych sieci telefonii komórkowej oraz w amatorskiej łączności radiowej.

Dyfrakcja występuje również wtedy, gdy przeszkoda terenowa znajduje się poniżej linii bezpośredniej propagacji fali. Ponieważ wszystkie punkty czoła fali radiowej są źródłami fal wtórnych, to w propagacji fali między antenami nadawczą i odbiorczą uczestniczą również punkty znajdujące się poza linią bezpośredniej propagacji fali. W celu analizy tego zjawiska zdefiniowano pojęcie stref Fresnela. Pierwsza strefa Fresnela jest to taki obszar, w którym drogi propagacji punktów czoła fali na trasie od anteny nadawczej do odbiorczej różnią się co najwyżej o $\lambda/2$ od drogi propagacji bezpośredniej (rys. 5.6).

Analogicznie zdefiniowano kolejne strefy Fresnela. N -ta strefa odpowiada drodze propagacji nie dłuższej niż $n \cdot \lambda/2$ od drogi propagacji bezpośredniej. Strefy Fresnela mają kształty elipsoid obrotowych, których osią główną jest linia łącząca obie anteny. Promień każdej strefy Fresnela jest największy w połowie odległości od obu anten – i jest dany zależnością :

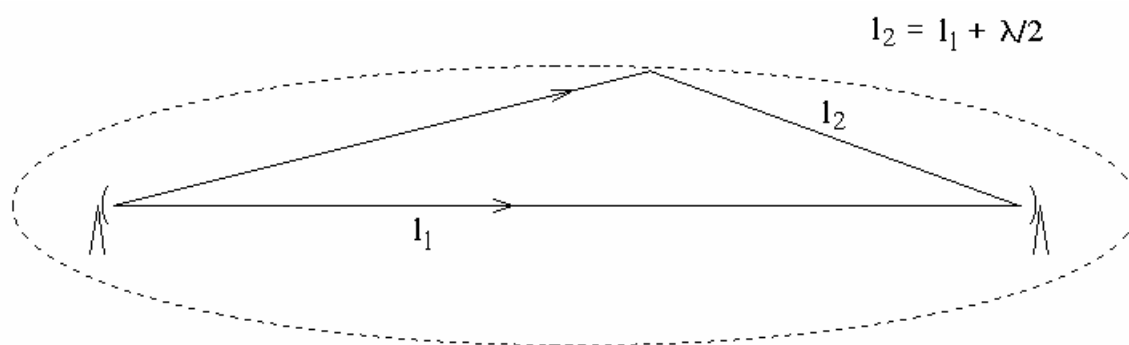
$$R_n \approx 17,3 \sqrt{\frac{n}{F_{GHz}} \left(\frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right)} \quad (5.5)$$

gdzie :

R_n - promień n-tej strefy Fresnela [m],

F_{GHz} - częstotliwość fali nośnej [GHz],

d_1, d_2 - odległości od anten nadawczej i odbiorczej [km].



Rys. 5.6. Pierwsza strefa Fresnela

Podczas projektowania systemów radiowych wymagających bezpośredniej widoczności między antenami, należy zadbać o czystość pierwszej strefy Fresnela, czyli o brak przeszkód w tym obszarze. Gdy przeszkody wystąpią, fala radiowa będzie ulegać tłumieniu – większemu dla łagodnych wzniesień, a mniejszemu w przypadku ostrych przeszkód terenowych.

Średnią wielkość tego tłumienia można oszacować z zależności [19]:

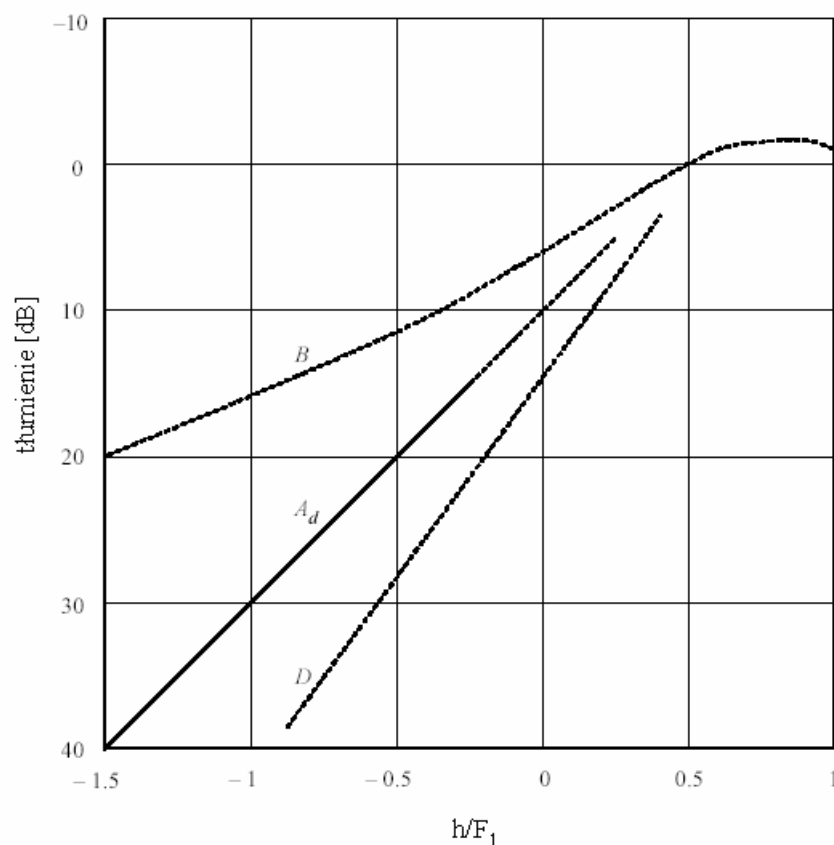
$$A_d = -20 \frac{h}{F_1} + 10 \quad (5.6)$$

A_d - wielkość tłumienia [dB],

h - różnica wysokości między przeszkodą a linią bezpośredniej propagacji fali radiowej [m],

F_1 - promień pierwszej strefy Fresnela w miejscu wystąpienia przeszkody [m].

Zależność (5.6) jest słuszna dla tłumienia większego od 15 dB. Na rysunku 5.7 zaprezentowano wykres obrazujący tę zależność. Dodatkowo, na tym samym wykresie, przedstawiono wielkości tłumienia dla skrajnych przypadków dyfrakcji – na ostrej przeszkodzie terenowej (krzywa B) i na łagodnym wzniesieniu (krzywa D).



Rys. 5.7. Wielkość tłumienia dyfrakcji w zależności od czystości pierwszej strefy Fresnela [19]

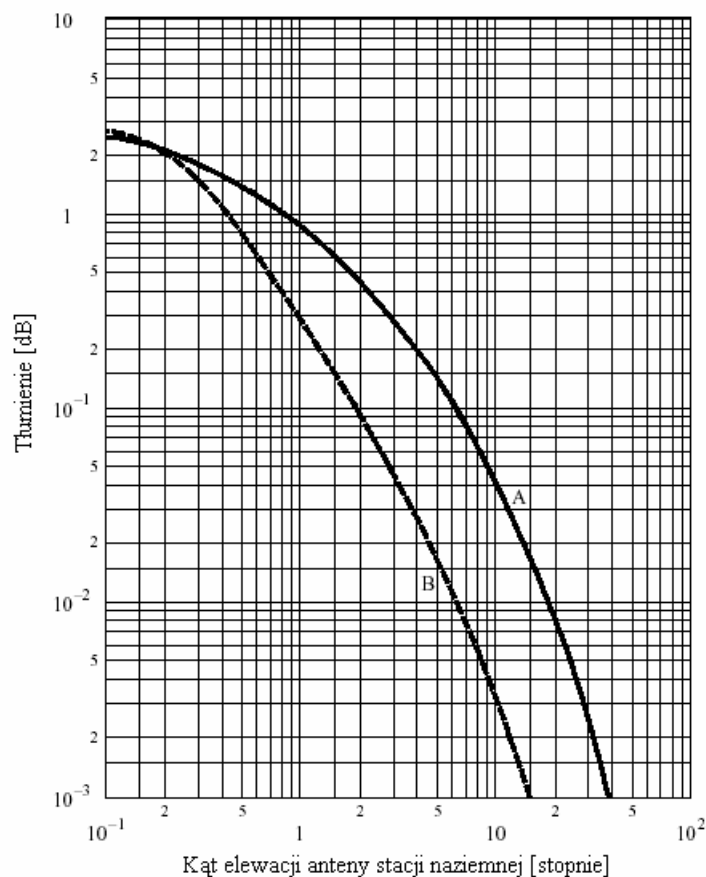
5.3 Rozproszenie troposferyczne

Atmosfera Ziemi jest w ciągłym ruchu. Jest to następstwem nierównomiernego ogrzewania jej przez Słońce i wymiany energii cieplnej między poszczególnymi jej warstwami a powierzchnią Ziemi. Na skutek mieszania się powietrza w atmosferze powstają obszary, w których wskaźnik refrakcji ma wyraźnie inną wartość niż w otaczającym je powietrzu. Najczęściej zdarza się to blisko powierzchni Ziemi – tam ruchy powietrza są najbardziej intensywne.

Gdy fala radiowa trafia na obszar o wskaźniku refrakcji znacznie różniącym się od otoczenia, dochodzi do jej rozproszenia. Większość energii fali radiowej przechodzi przez ten obszar bez zmiany kierunku, część rozprasza się, a część odbija z powrotem w kierunku powierzchni Ziemi i może dotrzeć do anteny odbiorczej. Moc fali odbitej od obszaru rozpraszającego jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalna do czwartej potęgi kąta rozproszenia θ (rys. 3.1.).

Zjawisko rozproszenia troposferycznego jest wykorzystywane w pozahoryzontowych liniach radiowych i łączności amatorskiej. Aby kąt rozproszenia był jak najmniejszy, stosowane są bardzo małe kąty elewacji anten. Kąty połowy mocy anten powinny być również jak najmniejsze. Wartością graniczną podawaną przez [1] jest $1,7^\circ$.

Istnieje również negatywna strona rozproszenia troposferycznego. W systemach satelitarnych, w łączności między stacją naziemną a satelitą geostacjonarnym dochodzi do tłumienia fali radiowej na skutek jej rozproszenia w troposferze. Tłumienie to nie przekracza 3 dB i jest najsilniejsze dla małych kątów elewacji anten stacji naziemnych. Na rysunku 5.8 przedstawiono zależność średniej wartości tego tłumienia i jego odchylenia standardowego od kąta elewacji anteny stacji naziemnej.



Rys. 5.8. Zależność średniej wartości tłumienia wynikającego z rozproszenia wiązki fali radiowej (A) i jego odchylenia standardowego (B) od kąta elewacji anteny stacji naziemnej w łączności z satelitą geostacjonarnym [24]

Dla kątów elewacji nie przekraczających 5° , tłumienie wynikające z rozproszenia troposferycznego można również oszacować ze wzoru [22] :

$$A_{bs} = 2,27 - 1,16 \log(1 + \theta_0) \quad (5.7)$$

gdzie :

A_{bs} - tłumienie wynikające z rozproszenia fali radiowej [dB],

θ_0 - kąt elewacji anteny stacji naziemnej [mrad].

5.4. Opad deszczu

Opad deszczu powoduje tłumienie fali radiowej na skutek jej absorpcji i rozproszenia na kropkach wody. Tłumienie to jest tym silniejsze im :

- intensywniejszy jest opad deszczu,
- dłuższy jest odcinek trasy radiowej, na której opad występuje,
- większa jest częstotliwość fali radiowej.

Ponadto, fala o polaryzacji horyzontalnej jest silniej tłumiona od fali o polaryzacji wertykalnej.

W celu oszacowania wartości tłumienia fali radiowej przez opad deszczu konieczne jest określenie zależności między wyżej wymienionymi czynnikami a tłumieniem wyrażonym w decybelach. Taką zależność można otrzymać empirycznie, przez wykonanie odpowiednich pomiarów. Konieczne jest również stworzenie statystyk opadowych dla danego obszaru. Statystyki opadowe określają prawdopodobieństwo występowania opadów deszczu o danej intensywności. Statystyki te silnie zależą od lokalnych warunków klimatycznych i ukształtowania terenu.

Powstało wiele modeli tłumienia fali radiowej w deszczu, m.in. model Crane'a [2] i model Stutzmana [32], [33]. Stworzenie reprezentatywnych dla danego obszaru statystyk opadowych wymaga kilkudziesięcioletnich pomiarów, dlatego w tym celu wykorzystano istniejące dane meteorologiczne. Na ich podstawie dokonano podziału świata na strefy opadowe, dla których statystyki opadu deszczu są w przybliżeniu takie same. W roku 1992 powstał model ITU-R [19], [22], [27], [28] tłumienia fali radiowej przez opad deszczu, który jest obecnie najszerszej stosowany. Model ten zostanie poniżej pokrótce omówiony.

Według ITU-R, tłumienie fali radiowej przez opad deszczu dane jest zależnością :

$$A_p = \gamma_R \cdot d \cdot r \quad (5.8)$$

gdzie:

A_p - tłumienie przekraczane przez p procent czasu w skali roku [dB],

γ_R - tłumienie jednostkowe [dB/km],

d - odcinek trasy radiowej, na którym może wystąpić opad deszczu [km],

r – współczynnik redukcji trasy.

Tłumienie jednostkowe γ_R obliczane jest według zależności :

$$\gamma_R = k \cdot R^\alpha \quad (5.9)$$

gdzie:

k, α - współczynniki zależne od częstotliwości i polaryzacji fali,

R - intensywność opadu deszczu w [mm/h] przekraczana przez p procent czasu w skali roku.

Dla naziemnych tras radiowych, odcinek d jest równy całej długości trasy radiowej. W przypadku systemu satelitarnego, d jest równe części trasy radiowej liczonej od powierzchni Ziemi do maksymalnej wysokości występowania opadu deszczu. Wysokość ta, w zależności od szerokości geograficznej, wynosi od 1 do 5 km [29]. Współczynnik redukcji trasy r ma różną postać dla naziemnych i satelitarnych systemów radiowych. Przykładowo, dla horyzontowych linii radiowych wynosi :

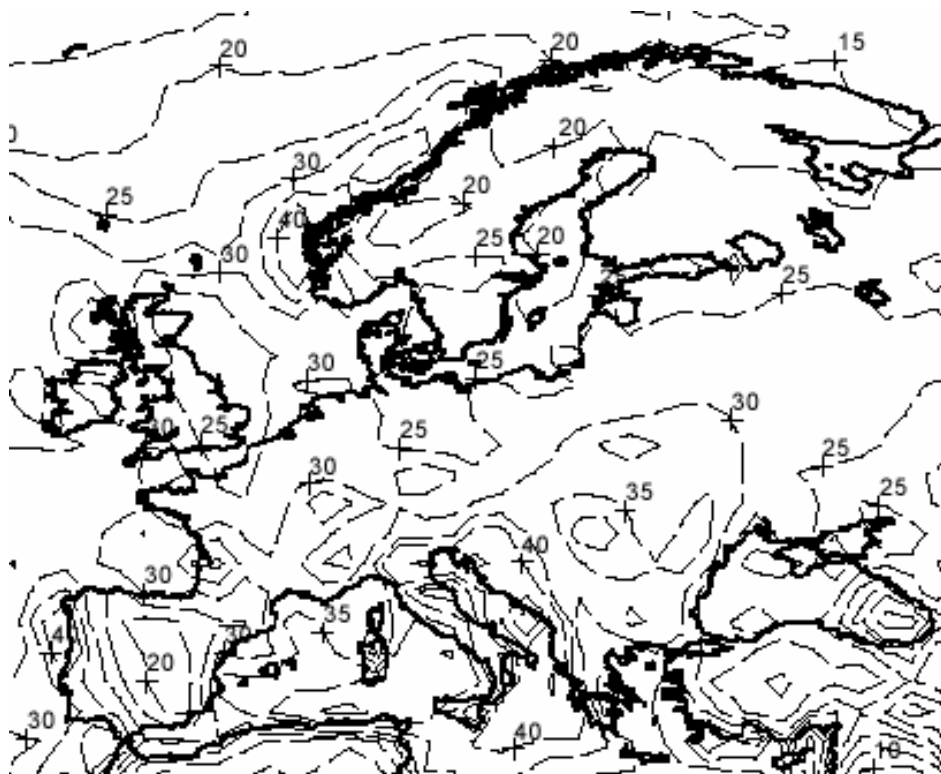
$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{35e^{-0.015R}}} \quad (5.10)$$

Współczynnik redukcji trasy zmniejsza wartość tłumienia dla długich tras radiowych i dużych intensywności opadu. Jego wprowadzenie wynika z faktu, że opad deszczu nie ma takiej samej intensywności wzdłuż całej trasy radiowej.

Statystyki opadu deszczu podawane są jako intensywności opadu przekraczanego przez p procent czasu w skali roku. Przykładowo, intensywność opadu 32 mm/h przekraczana przez

0,01 % czasu w skali roku oznacza, że przez 99,99 % czasu w skali roku opad deszczu jest słabszy i w konsekwencji tłumienie fali radiowej jest niższe od wartości wyliczonej według zależności (5.8). ITU-R udostępnia mapy $R_{0,01}$ – intensywności opadu deszczu przekraczanych przez 0,01 % czasu w skali roku [27]. Dokładniejsze dane tabelaryczne, dla punktów z całej kuli ziemskiej z rozdzielczością $1,5^\circ$ długości i szerokości geograficznej, są dostępne na stronie

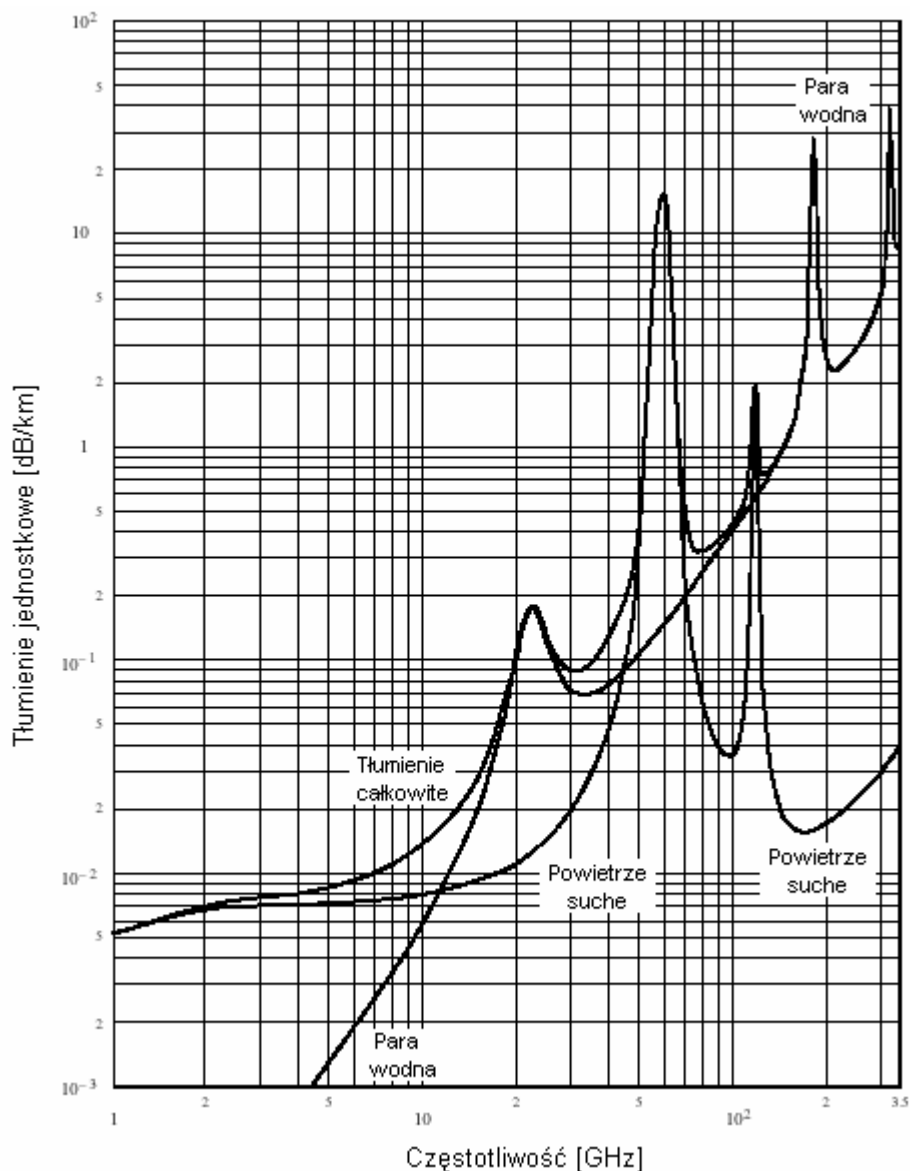
internetowej ITU-R. Na ich podstawie można obliczyć intensywność opadu deszczu przekraczaną przez dowolnie wybrany procent czasu w skali roku. Mapę wartości $R_{0,01}$ dla Europy zaprezentowano na rysunku 5.9. Należy mieć jednak świadomość, że w wyniku naturalnej zmienności warunków pogodowych mogą zdarzyć się lata, w których opad deszczu będzie bardziej intensywny niż jest to przewidziane w statystykach.



Rys. 5.9. Intensywności opadu deszczu w Europie przekraczane przez 0,01 % czasu w skali roku [27]

5.5. Gazy atmosferyczne

Tłumienie fali radiowej przez gazy atmosferyczne spowodowane jest w głównej mierze absorpcją fali przez tlen i parę wodną, a dla częstotliwości powyżej 100 GHz również w niewielkim stopniu przez azot. Tłumienie to dzielone jest na tłumienie powietrza suchego (działanie tlenu i azotu) i tłumienie pary wodnej. W zastosowaniach radiokomunikacyjnych dla częstotliwości poniżej 10 GHz, zarówno tłumienie powietrza suchego jak i pary wodnej uznaje się za pomijalnie małe. Na rysunku 5.10 zaprezentowano zależności tłumienia jednostkowego (dB/km) od częstotliwości dla powietrza suchego i pary wodnej.



Rys. 5.10. Tłumienie jednostkowe powietrza suchego i pary wodnej o gęstości $7,5 \text{ g/m}^3$ [23]

Dla określonych wartości częstotliwości fali radiowej f [GHz], temperatury t [°C], ciśnienia powietrza p [hPa] i gęstości pary wodnej ρ [g/m^3] można obliczyć wartości tłumienia jednostkowego powietrza suchego γ_o i pary wodnej γ_w . Szczegółowy opis tej procedury dla częstotliwości do 1000 GHz można znaleźć w [23]. Dla naziemnych tras radiowych, w większości przypadków można założyć, że temperatura, ciśnienie i gęstość pary wodnej w atmosferze są takie same na całej trasie. Wtedy całkowite tłumienie fali radiowej w gazach atmosferycznych jest dane zależnością :

$$A = d\gamma_o + d\gamma_w \quad (5.11)$$

gdzie:

A - tłumienie w gazach atmosferycznych,

d - długość trasy radiowej.

Dla łączy satelitarnych, zamiast długości trasy radiowej stosuje się długości zastępcze, różne dla tłumienia powietrza suchego i pary wodnej. Długości te można wyliczyć znając częstotliwość fali radiowej, kąt elewacji anteny i wysokość nad poziom morza stacji naziemnej [23].

5.6. Chmury i mgły

Chmury i mgły są produktami kondensacji pary wodnej w atmosferze ziemskiej. Są to mikroskopijne kropelki wody, kryształki lodu lub ich mieszanina. Mgły powstają w warstwie przyziemnej atmosfery, zaś chmury mogą tworzyć się do wysokości kilkunastu kilometrów. Zawartość wody w mgłach i chmurach jest mała dla obiektów lodowych – zazwyczaj poniżej $0,01 \text{ g/m}^3$, natomiast chmury wodne mogą zawierać nawet 5 g wody w 1 m^3 [37].

Tłumienie jednostkowe fali radiowej w chmurach lub we mgle można obliczyć z zależności [30] :

$$\gamma_c = K_l \cdot M \quad (5.12)$$

gdzie:

γ_c - tłumienie jednostkowe [dB/km],

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

M - zawartość wody w chmurze lub mgle [g/m³].

Współczynnik K_l zależy od temperatury powietrza i częstotliwości fali radiowej. Jego wartości dla częstotliwości od 5 do 200 GHz przedstawiono na rysunku 5.11.

Zależność (5.12) trudno jednak wykorzystać w praktyce, z powodu braku pomiarów określających prawdopodobieństwo wystąpienia na danym obszarze mgieł lub chmur o określonej zawartości wody. Przy projektowaniu łączy satelitarnych, tłumienie fali radiowej w chmurach można natomiast obliczyć z zależności [30] :

$$A_c = \frac{L \cdot K_l}{\sin \theta} \quad (5.13)$$

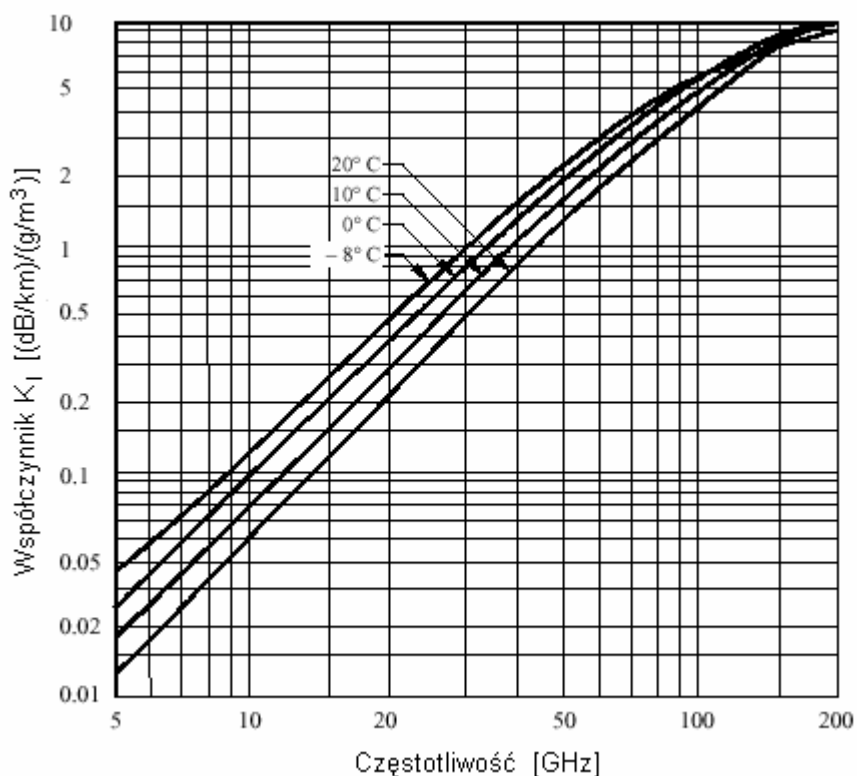
gdzie:

A - tłumienie fali radiowej w chmurach [dB],

L - całkowita zawartość wody w słupie powietrza od powierzchni Ziemi do górnej granicy atmosfery liczona na jednostkę powierzchni [kg/m^2],

θ - kąt elewacji anteny stacji naziemnej.

Mapy wartości L przekraczanych przez 1, 5, 10 i 20 % czasu w skali roku są dostępne w [30]. Niestety, mapy te zostały sporządzone w oparciu o zaledwie dwuletnie pomiary, co jest okresem zbyt krótkim dla sporządzania wiarygodnych statystyk parametrów klimatycznych.



Rys. 5.11. Zależność współczynnika K_l od częstotliwości dla temperatur -8, 0, 10 i 20°C [30]

5.7. Scyntyllacje

Scyntyllacje są to fluktuacje, o charakterze losowym, amplitudy, fazy, polaryzacji lub kierunku propagacji fali radiowej, spowodowane nieregularnością zmian wskaźnika refrakcji w atmosferze [17]. Fluktuacje te są tym silniejsze, im dłuższą drogę przebywa fala radiowa, im wyższa jest jej częstotliwość i im mniejszy jest rozmiar anteny odbiorczej. Okres scyntyllacji może być krótszy niż 0,1 sekundy, ale może również sięgać kilku minut.

Scyntyllacje osiągają znaczące wartości w łączach satelitarnych, szczególnie dla częstotliwości powyżej 10 GHz i dla kątów elewacji anten mniejszych niż 15°. W [7] podano przykład kanadyjskiego łącza satelitarnego o kącie elewacji anteny stacji naziemnej 1° i częstotliwości fali radiowej 30 GHz, dla którego zaniki sygnału spowodowane scyntyllacjami sięgały 30 dB.

Poniżej zaprezentowano procedurę obliczania zaników amplitudy fali radiowej w łączach satelitarnych spowodowanych scyntyllacjami [22]. Procedura ta daje prawidłowe wyniki dla kąta elewacji anteny stacji naziemnej większego od 4° i częstotliwości fali radiowej z zakresu od 4 do 20 GHz.

W pierwszej kolejności obliczany jest współczynnik $g(x)$ anteny stacji naziemnej :

$$g(x) = \sqrt{3,86 \cdot (x^2 + 1)^{\frac{11}{12}} \cdot \sin\left(\frac{11}{6} \arctg \frac{1}{x}\right) - 7,08 \cdot x^{\frac{5}{6}}} \quad (5.14)$$

gdzie:

$$x = 6,1 \cdot 10^{-4} \cdot \eta D^2 f (\sqrt{\sin^2 \theta + 2,35 \cdot 10^{-4}} + \sin \theta), \quad (5.15)$$

η - współczynnik wykorzystania apertury anteny stacji naziemnej,

D - średnica anteny stacji naziemnej [m],

f - częstotliwość fali radiowej [GHz],

θ - kąt elewacji anteny stacji naziemnej.

Następnie obliczane jest odchylenie standardowe sygnału radiowego σ :

$$\sigma = (0,0036 + 0,0001 N_{wet}) f^{\frac{7}{12}} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1,2}} \quad (5.16)$$

gdzie:

N_{wet} – składowa wskaźnika refrakcji zależna od temperatury i wilgotności powietrza :

$$N_{wet} = 373200 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (5.17)$$

e - ciśnienie pary wodnej w powietrzu [hPa],

T - temperatura powietrza [K].

Na koniec wyznaczana jest wartość zaniku A_p amplitudy fali radiowej, spowodowanego scyntylacjami i przekraczana przez p procent czasu :

$$A_p = [-0,061(\log p)^3 + 0,072(\log p)^2 - 1,71\log p + 3] \cdot \sigma \quad (5.18)$$

gdzie:

$$0,01 < p < 50.$$

Istnieją również procedury obliczania zaników spowodowanych scyntylacjami dla mniejszych niż 4° kątów elewacji anten stacji naziemnych [22]. Procedury te łącznie traktują zaniki spowodowane scyntylacjami z zanikami wynikającymi z rozproszenia i propagacji wielodrogowej fali radiowej w atmosferze.

5.8. Przeniki polaryzacyjne

W systemach radiokomunikacyjnych, w których anteny nadawcze i odbiorcze są nieruchome, transmisję często prowadzi się przy jednoczesnym wykorzystaniu dwóch polaryzacji ortogonalnych. Są to prostopadłe do siebie polaryzacje liniowe – horyzontalna (H) i wertykalna (V) lub polaryzacje kołowe – lewoskrętna i prawoskrętna. Dzięki temu można zwiększyć przepustowość systemu radiokomunikacyjnego. Jednak zawsze pewna część mocy sygnału radiowego transmitowanego na danej polaryzacji zostanie odebrana na polaryzacji do niej ortogonalnej. W celu oceny tego zjawiska definiuje się współczynnik dyskryminacji polaryzacyjnej XPD (*Cross-Polar Discrimination*) mówiący o stopniu separacji między sygnałami transmitowanymi na polaryzacjach ortogonalnych. Przykładowo, dla polaryzacji V, wartość współczynnika dyskryminacji polaryzacyjnej XPD wynosi [7] :

$$XPD_V = \frac{\text{moc sygnału transmitowanego na polaryzacji V i odebranego na polaryzacji V}}{\text{moc sygnału transmitowanego na polaryzacji V i odebranego na polaryzacji ortogonalnej H}}$$

Analogicznie definiowane są współczynniki XPD dla innych polaryzacji. Duża wartość XPD oznacza dobrą separację sygnałów transmitowanych na polaryzacjach ortogonalnych.

Podczas przejścia fali radiowej przez atmosferę, dochodzi do skręcenia płaszczyzny jej polaryzacji zarówno w jonosferze jak i w troposferze. Na skutek tego powstają przeniki sygnału o jednej polaryzacji do sygnału o polaryzacji ortogonalnej – spada wartość współczynnika XPD . W jonosferze zachodzi zjawisko Faradaya – skręcenie płaszczyzny

polaryzacji fali radiowej na skutek obecności swobodnych elektronów i pola magnetycznego Ziemi [20]. Z kolei w troposferze, zmiana polaryzacji fali radiowej spowodowana jest nieregularnymi zmianami wskaźnika refrakcji, propagacją wielodrogową oraz opadami deszczu i śniegu. W zaleceniach ITU-R, dotyczących projektowania systemów satelitarnych i horyzontowych linii radiowych, zdefiniowano procedury pozwalające ocenić wartości zaników sygnału radiowego lub spadek współczynnika XPD spowodowane skręceniem płaszczyzny polaryzacji fali radiowej w atmosferze [19], [22]. Przeprowadzono również doświadczenia, które dowodzą, że możliwa jest kompensacja skręcenia płaszczyzny polaryzacji fali radiowej w nadajniku, jeżeli jednocześnie wykonywane są pomiary tego skręcenia w drugim, równoległym kanale radiowym [22].

6. Przykłady obliczeń

W tym rozdziale zaprezentowano przykładowe obliczenia dotyczące oceny wpływu klimatu i ukształtowania terenu na działanie systemów radiokomunikacyjnych. Dla każdego przykładu pokrótce opisano rozpatrywane łącze radiowe i przedstawiono proces obliczeń.

6.1. Strefy odbicia

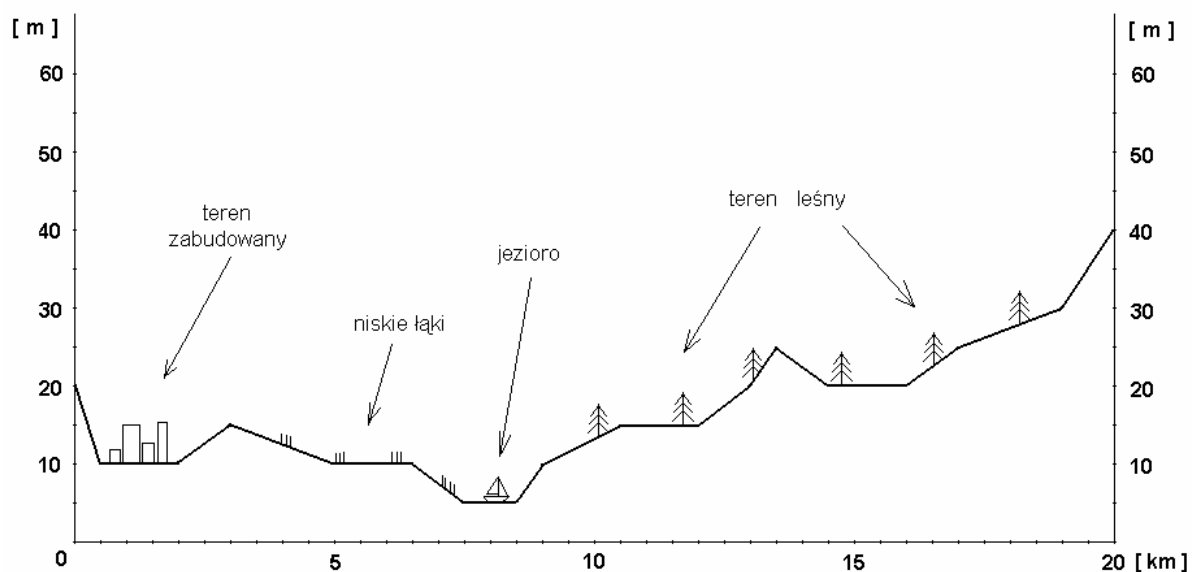
Opis problemu

Projektowane jest przęsło horyzontowej linii radiowej o długości 20 km i profilu hipsometrycznym przedstawionym na rysunku 6.1. Należy tak dobrać wysokości zawieszenia anten obu stacji przekaźnikowych, aby strefy odbicia znajdowały się w terenie silnie tłumiącym odbijające się fale radiowe. Dla potrzeb tego przykładu, inne czynniki wynikające z przebiegu projektowania horyzontowej linii radiowej i wpływające na wysokość zawieszenia anten należy zaniedbać.

Rozwiązanie

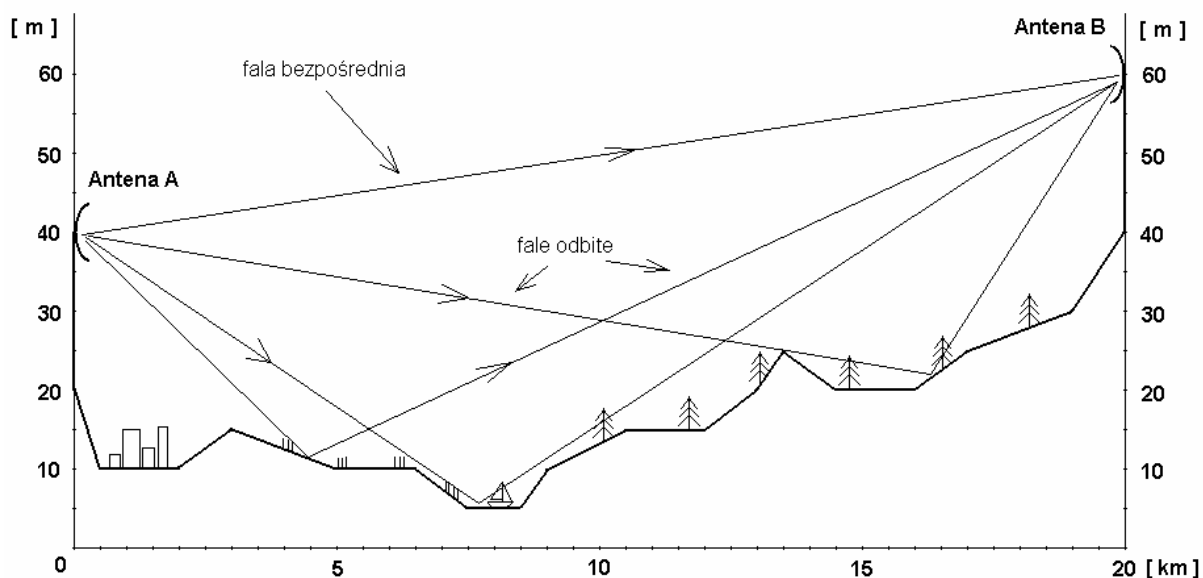
W pierwszej kolejności zaproponowano, aby obie anteny były zawieszane na wysokościach 20 metrów nad powierzchnią ziemi. Dla takich wysokości obliczono strefy odbicia wykorzystując program *odbicia*, zamieszczony w załączniku A niniejszej pracy. Otrzymano strefy odbicia znajdujące się w następujących przedziałach odległości :

- 3,33 ÷ 5 km,
- 7,78 ÷ 7,9 km,
- 16,36 ÷ 16,66 km.



Rys. 6.1. Profil hipsometryczny trasy

Położenie stref odbicia przedstawiono na rysunku 6.2.

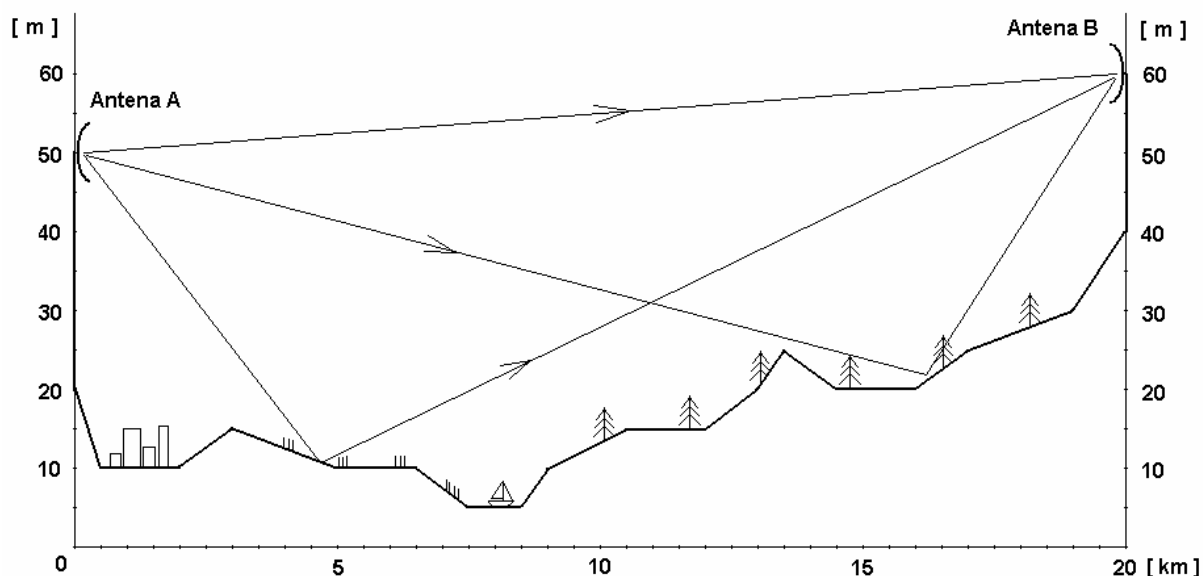


Rys. 6.2. Linia radiowa i anteny zawieszony 20 metrów nad powierzchnią ziemi

Druga strefa odbicia leży na powierzchni jeziora. Fale radiowe odbijające się od powierzchni wodnych powodują bardzo głębokie zaniki sygnału radiowego w odbiorniku systemu radiowego (tab. 4.2). W celu zmiany położenia stref odbicia podniesiono antenę A na

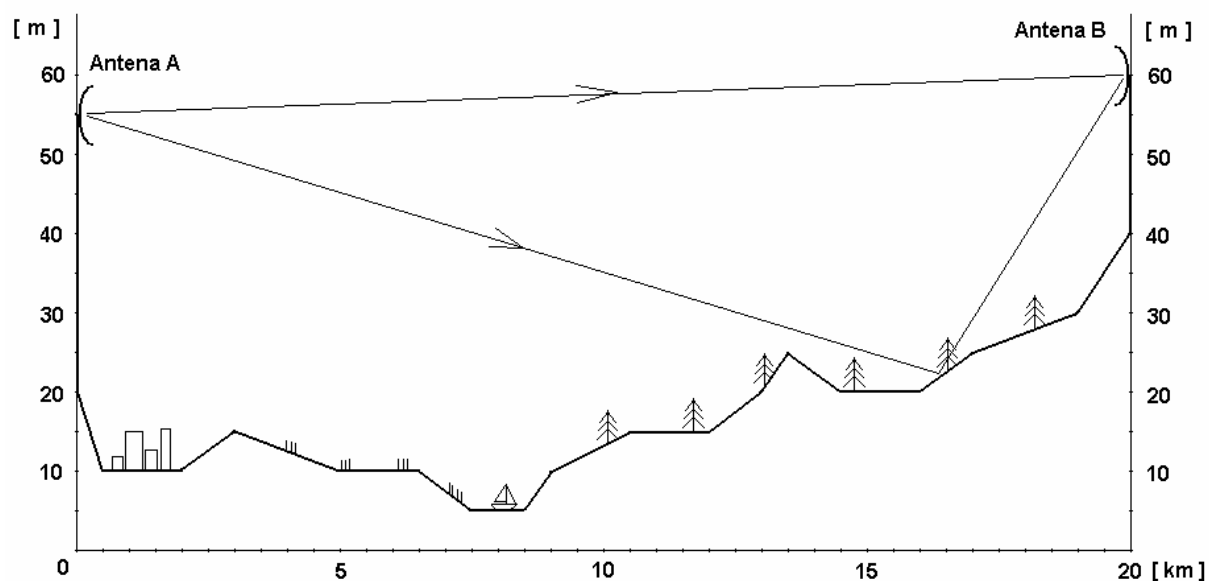
wysokość 30 metrów nad powierzchnią ziemi. Ponownie obliczono strefy odbicia i otrzymano odległości (rys. 6.3) :

- 4,78 ÷ 5 km,
- 16,05 ÷ 16,92 km.



Rys. 6.3. Linia radiowa po pierwszej korekcji wysokości zawieszenia anten

W ten sposób zlikwidowano strefę odbicia znajdującą się na jeziorze. Źródłem głębokich zaników sygnału może być jeszcze pierwsza strefa odbicia leżąca na terenie porośniętym niską trawą. Dlatego zdecydowano się na dalsze zmiany wysokości zawieszenia anten. Po kilku próbach postanowiono podnieść antenę A o dodatkowe 5 metrów. W rezultacie otrzymano już tylko jedną strefę odbicia – 16 ÷ 17 km (rys. 6.4). Jest to teren leśny, silnie tłumiący fale radiowe, co oznacza, że zaniki sygnału będą bardzo słabe.



Rys. 6.4. Ostateczne wysokości zawieszenia anten

6.2. Zaniki wielodrogowe

Opis problemu

Projektowane jest przeszło horyzontowej linii radiowej w trzech różnych regionach świata :

- w okolicach miasta Luimneach (zachodnie wybrzeża Irlandii)
 - $\lambda = 9^{\circ}\text{W}$, $\varphi = 52,5^{\circ}\text{N}$,
- w pobliżu miasta Gudivada (wschodnie Indie) – $\lambda = 81^{\circ}\text{E}$, $\varphi = 16,5^{\circ}\text{N}$,
- w Ad-Dawhah nad zatoką Perską (stolica Kataru) – $\lambda = 51,53^{\circ}\text{E}$, $\varphi = 25,28^{\circ}\text{N}$.

Przeszło ma długość 30 km, a jego anteny zawieszono na wysokości 100 metrów n.p.m. Częstotliwość sygnału radiowego to 6 GHz. Dla każdej lokalizacji przesła należy obliczyć sumaryczny wpływ zaników wielodrogowych powstałych na skutek :

- odbicia fali radiowej od powierzchni Ziemi,
- propagacji wielodrogowej fali radiowej w atmosferze,
- rozproszenia fali radiowej w atmosferze,
- nietypowego kierunku propagacji fali w atmosferze i spowodowanego tym spadku zysków energetycznych anten nadawczej i odbiorczej.

W tym celu należy podać procent czasu w skali najgorszego miesiąca w roku, przez który poziom zaników przekracza wartość marginesu mocy 30 dB.

Rozwiązanie

Określanie procentu czasu w skali najgorszego miesiąca w roku, przez który zaniki przekraczają daną wartość jest możliwe na podstawie zależności (4.6). Konieczna jest znajomość gradientu współczynnika refrakcji w najniższych 65 metrach atmosfery nie przekraczanego przez 1% czasu w skali roku (dN_I) i współczynnika zróżnicowania wysokościowego terenu (s_a).

Mapy dN_I dla całego świata znajdują się w [18]. Dokładniejsze dane tabelaryczne są udostępniane przez ITU-R jako dodatek do [18], pod adresem internetowym <http://www.itu.int/ITU-R/software/study-groups/rsg3/databanks/troposph/index.html>. Dane te podawane są dla punktów z całego świata, z rozdzielczością $1,5^\circ$ długości i szerokości geograficznej. Wartości dla punktów nie podanych przez ITU-R można uzyskać poprzez dwuwymiarową liniową interpolację, bazującą na czterech wartościach sąsiednich.

Na podstawie danych tabelarycznych ITU-R uzyskano wartości dN_I dla miejsc, w których znajdować się będą projektowane przęsła linii radiowych :

- Irlandia : $dN_I = -170,70$
- Indie : $dN_I = -438,40$
- Katar : $dN_I = -1405,85$

Z powodu braku danych dotyczących współczynnika zróżnicowania wysokościowego terenu s_a , do obliczeń zastosowano wzór przybliżony [18] :

$$p_w = r^{3,0} \left(1 + \frac{|h_1 - h_2|}{r}\right)^{-1,2} \cdot 10^{-4,2 - 0,0029dN_1 + 0,033f - 0,001h_L - A/10} \quad (6.1)$$

gdzie :

p_w - procent najgorszego miesiąca w roku, przez który zaniki sygnału przekraczają A [dB],

r - długość trasy linii radiowej [km],

h_1, h_2 – wysokości zawieszenia anten [m],

h_L – wysokość zawieszenia anteny niższej względem poziomu morza [m],

dN_I - zmiana współczynnika refrakcji atmosfery w najniższych 65 metrach nie przekraczana przez 1% czasu roku,

f - częstotliwość fali radiowej [GHz].

Na tej podstawie wykonano obliczenia dla wszystkich trzech przęseł linii radiowych. Zaniki o wartości 30 dB są przekraczane:

– dla Irlandii przez 0,0067 % czasu najgorszego miesiąca w skali roku – są to około 3 minuty w ciągu tego miesiąca,

– dla Indii przez 0,040 % czasu najgorszego miesiąca w skali roku – około 17 minut,

– dla Kataru przez 25,49 % czasu najgorszego miesiąca w skali roku – około 7,5 doby.

Procent p_w najgorszego miesiąca w roku, przez który zaniki sygnału przekraczają 30 dB, rośnie wykładniczo wraz ze spadkiem współczynnika dN_I .

6.3. Tłumienie przeszkody terenowej

Opis problemu

Przęsło horyzontowej linii radiowej i łącznie abonenckie systemu LMDS mają długość 4 km. Linia radiowa wykorzystuje częstotliwość 7 GHz, system LMDS - 28 GHz. W obu sytuacjach należy obliczyć tłumienie przeszkody terenowej sięgającej 2 m powyżej linii trajektorii fali radiowej. Należy rozważyć dwa przypadki. W pierwszym przypadku przeszkoda znajduje się w połowie trasy. W drugim – w odległości 500 m od jednej z anten.

Rozwiązanie

W obliczeniach posłużono się zależnością (5.6), określającą tłumienie przeszkody terenowej:

$$A_d = -20 \frac{h}{F_1} + 10 \quad (6.2)$$

gdzie :

A_d - wielkość tłumienia wnoszonego przez przeszkodę [dB],

h - różnica wysokości między przeszkodą a linią trajektorii fali radiowej [m],

F_1 - promień pierwszej strefy Fresnela w miejscu lokalizacji przeszkody [m].

Należy zwrócić uwagę na fakt, że gdy przeszkoda terenowa znajduje się powyżej linii trajektorii fali radiowej, to h przyjmuje wartości ujemne – w tym przypadku : -2 m.

Promień pierwszej strefy Fresnela można obliczyć na podstawie zależności (5.5) :

$$R_1 \approx 17,3 \sqrt{\frac{1}{F_{GHz}} \left(\frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right)} \quad (6.3)$$

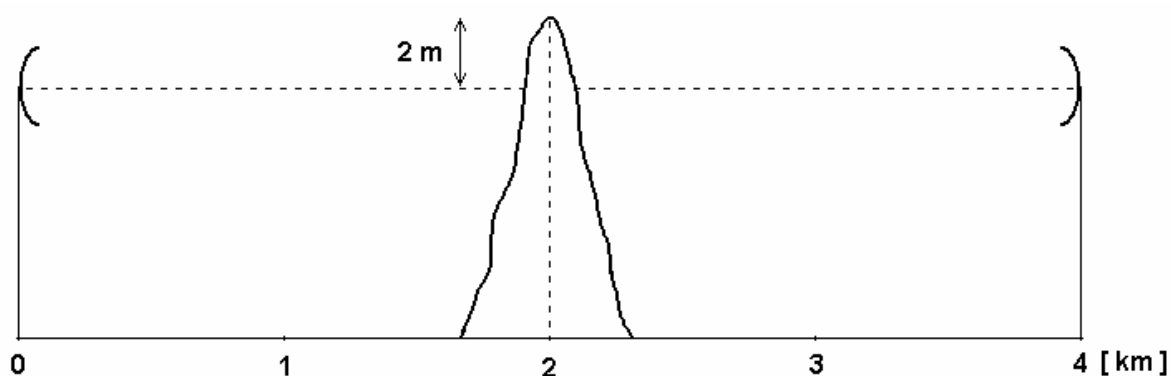
gdzie :

R_1 - promień pierwszej strefy Fresnela [m],

F_{GHz} - częstotliwość fali radiowej [GHz],

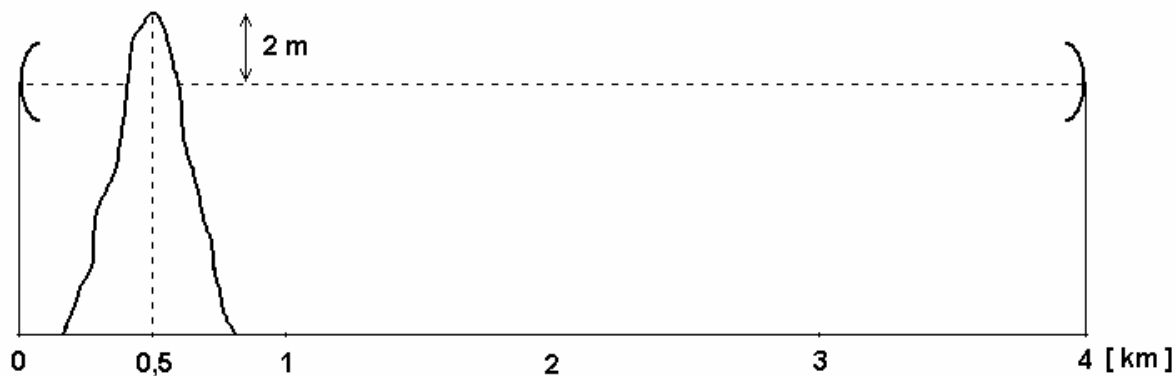
d_1, d_2 – odległości przeszkody, liczone od anten nadawczej i odbiorczej [km].

W pierwszym przypadku, przeszkoda znajduje się w połowie trasy (rys. 6.5). Wtedy wielkość strefy Fresnela dla przęsła horyzontalnej linii radiowej wynosi 6,5 m. W takiej sytuacji tłumienie przeszkody terenowej jest równe 16,2 dB. W systemie LMDS częstotliwość fali radiowej jest 4 razy większa, co oznacza, że pierwsza strefa Fresnela jest 2 razy mniejsza i wynosi 3,3 m. Tłumienie przeszkody terenowej jest równe 22,1 dB.



Rys. 6.5. Przeszkoda terenowa w połowie trasy radiowej

W drugiej sytuacji przeszkoda jest usytuowana w odległości 0,5 km od jednej z anten (rys. 6.6). W tym miejscu strefy Fresnela są mniejsze w porównaniu ze środkiem trasy radiowej. Dla przęsła linii radiowej strefa Fresnela będzie miała rozmiar 4,3 m, co oznacza 19,3 dB tłumienia przeszkody. W przypadku łącza LMDS strefa Fresnela wynosi 2,2 m, a tłumienie przeszkody – 28,2 dB.



Rys. 6.6. Przeszkoda terenowa w odległości 0,5 km od jednej z anten

Wartości tłumienia przeszkody terenowej dla wszystkich przypadków z tego przykładu zostały zestawione w tabeli 6.1.

Tab. 6.1

Tłumienie przeszkody terenowej - zestawienie wyników obliczeń z rozdziału 6.3

	przeszkoda w połowie trasy	przeszkoda 500 m od jednej z anten
linia radiowa ($f = 7$ GHz)	16,2 dB	19,3 dB
łącze LMDS ($f = 28$ GHz)	22,1 dB	28,2 dB

6.4. Tłumienie w deszczu

Opis problemu

Obliczyć tłumienie w deszczu przekraczane przez 0,01 % czasu w skali roku dla łącza radiowego telefonii komórkowej UMTS ($f = 2$ GHz, polaryzacja wertykalna) i systemu LMDS ($f = 28$ GHz, polaryzacja wertykalna). Oba łącza mają długość 5 km. Rozważyć trzy lokalizacje systemów :

1. Libreville nad zatoką Gwinejską (Gabon) – $\lambda = 9,5^\circ\text{E}$, $\varphi = 0,5^\circ\text{N}$,
2. La Coruna na wybrzeżu Oceanu Atlantyckiego (Hiszpania) – $\lambda = 8,4^\circ\text{W}$, $\varphi = 43,4^\circ\text{N}$,
3. okolice Wielkiego Jeziora Niedźwiedziego (Kanada) – $\lambda = 117^\circ\text{W}$, $\varphi = 69^\circ\text{N}$.

Rozwiązanie

Zgodnie z zależnościami (5.8) i (5.9), tłumienie fali radiowej przez opad deszczu przekraczane przez 0.01 % czasu w skali roku jest równe :

$$A_{0,01} = k \cdot R_{0,01}^{\alpha} \cdot d \cdot r \quad [\text{dB}] \quad (6.4)$$

gdzie :

k , α - współczynniki zależne od częstotliwości i polaryzacji fali,

$R_{0,01}$ - intensywność opadu deszczu przekraczana przez 0,01 % czasu w skali roku [mm/h],

d - długość trasy radiowej [km],

r - współczynnik redukcji trasy.

Wartości k i α , dla polaryzacji horyzontalnej i wertykalnej fali radiowej i wybranych częstotliwości, są udostępniane przez ITU-R w [28]. Aby otrzymać wartości k i α dla dowolnie wybranej częstotliwości f_x należy dokonać interpolacji tych współczynników opierając się na wartościach podanych przez ITU-R. Podczas interpolacji należy zastosować skalę logarymiczną dla częstotliwości i współczynnika k , a dla α – skalę liniową. Zależności, którymi można się posłużyć, to :

$$\log k_x = \frac{\log \frac{k_2}{k_1}}{\log \frac{f_2}{f_1}} \cdot \log \frac{f_x}{f_1} + \log k_1 \quad (6.5)$$

$$\alpha_x = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\log \frac{f_2}{f_1}} \cdot \log \frac{f_x}{f_1} + \alpha_1 \quad (6.6)$$

gdzie :

k_x , α_x - szukane wartości współczynników dla częstotliwości f_x ,

f_1 , f_2 - częstotliwości najbliższe względem f_x , $f_1 < f_x < f_2$, dla których ITU-R udostępnia wartości współczynników k i α ,

k_1 , k_2 - wartości k dla częstotliwości f_1 i f_2 ,

α_1 , α_2 - wartości α dla częstotliwości f_1 i f_2 .

Na podstawie danych ITU-R oraz wzorów (6.5) i (6.6) otrzymano następujące wartości k i α dla polaryzacji wertykalnej :

– $k = 0,000138$; $\alpha = 0,923$ dla częstotliwości 2 GHz;

– $k = 0,144$; $\alpha = 1,011$ dla częstotliwości 28 GHz;

Dane dotyczące intensywności opadów deszczu, w postaci map dla całej kuli ziemskiej znajdują się w [27]. Podobnie jak w przypadku współczynnika dN_I , dokładniejsze dane tabelaryczne zamieszczone są pod adresem internetowym <http://www.itu.int/ITU-R/software/study-groups/rsg3/databanks/troposph/index.html>. Tabele te zawierają wartości współczynników P_{r6} , M_C i M_S dla punktów z całej powierzchni Ziemi, z rozdzielczością $1,5^\circ$ długości i szerokości geograficznej. Wartości tych współczynników dla każdego innego punktu można obliczyć stosując dwuwymiarową interpolację liniową przy użyciu wartości z czterech punktów sąsiednich. Na podstawie współczynników P_{r6} , M_C i M_S , można obliczyć intensywność opadu deszczu przekraczaną przez dowolny procent czasu w skali roku [27].

W ten sposób otrzymano następujące intensywności opadu deszczu przekraczane przez 0,01 % czasu w skali roku dla Libreville, La Coruna i Wielkiego Jeziora Niedźwiedziego :

- $R_{0,01} = 8$ mm/h dla Wlk. Jez. Niedźwiedziego,
- $R_{0,01} = 32$ mm/h dla La Coruna,
- $R_{0,01} = 109$ mm/h dla Libreville.

Długość trasy radiowej, zarówno dla systemu UMTS jak i dla LMDS, we wszystkich trzech przypadkach wynosi 5 km.

Założono, że współczynnik redukcji trasy r ma taką samą wartość jak w przypadku horyzontowych linii radiowych i wynosi:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{35e^{-0.015R_{0.01}}}} \quad (6.7)$$

Po podstawieniu wartości liczbowych do wzoru (6.7) otrzymano :

- $r = 0,86$ dla Wlk. Jez. Niedźwiedziego,
- $r = 0,81$ dla La Coruna,
- $r = 0,58$ dla Libreville.

Znając wartości k , α , $R_{0,01}$, d i r , można dokonać ostatecznego obliczenia tłumienia $A_{0,01}$ przekraczanego przez 0,01 % czasu w skali roku. Wartości tego tłumienia dla wszystkich rozważanych przypadków przedstawiono w tabeli 6.2.

Tab. 6.2

Wartości tłumienia $A_{0,01}$ dla przypadków rozważanych w rozdziale 6.4

	system UMTS (f = 2 GHz)	system LMDS (f = 28 GHz)
Wlk. Jez. Niedźwiedzie	0,004 dB	5,1 dB
La Coruna	0,014 dB	19,4 dB
Libreville	0,03 dB	47,9 dB

Największe wartości tłumienia sygnału radiowego występują w Libreville, gdzie opad deszczu zdarza się częściej i jest bardziej intensywny w porównaniu z La Coruna i Wlk. Jez. Niedźwiedzim. Tłumienie spowodowane opadem deszczu szybko rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości, dlatego wartości $A_{0,01}$ dla systemu LMDS są zdecydowanie większe od odpowiadających im wartości dla systemu UMTS.

6.5. Zaniki spowodowane scyntylacjami

Opis problemu

W naziemnej stacji satelitarnej, wyposażonej w antenę o średnicy czaszy 1,2 m i współczynniku wykorzystania apertury 60 %, odbierany jest sygnał radiowy pochodzący z satelity geostacjonarnego, o częstotliwości 18 GHz. Kąt elewacji anteny wynosi 5°. Należy obliczyć zaniki sygnału spowodowane scyntylacjami przekraczane przez 0,01 % czasu, dla dwóch lokalizacji stacji :

- w Erewaniu (stolica Armenii) - $\lambda = 44,50^\circ\text{E}$, $\varphi = 40,18^\circ\text{N}$,
- w Manili (stolica Filipin) - $\lambda = 120,98^\circ\text{E}$, $\varphi = 14,60^\circ\text{N}$.

Rozwiązanie

Do rozwiązania powyżej opisanego problemu można posłużyć się zależnościami (5.14 ÷ 5.18) z rozdziału 5.7.

Dane :

1. Współczynnik wykorzystania apertury anteny stacji naziemnej $\eta = 0,6$.
2. Średnica czaszy anteny stacji naziemnej $D = 1,2$ m.
3. Częstotliwość fali radiowej $f = 18$ GHz.
4. Kąt elewacji anteny stacji naziemnej $\theta = 5^\circ$.
5. Procent czasu $p = 0,01$ %.
6. Wartości współczynnika N_{wet} dla punktów z całej kuli ziemskiej z rozdzielczością $1,5^\circ$ szerokości i długości geograficznej, są udostępniane przez ITU-R pod adresem internetowym <http://www.itu.int/ITU-R/software/study-groups/rsg3/databanks/troposph/index.html>.

Na podstawie tych danych można obliczyć wartość N_{wet} dla dowolnego punktu, wykonując dwuwymiarową interpolację liniową bazującą na czterech wartościach sąsiednich. W ten sposób otrzymano wartości :

$$- N_{wet} = 24,88 \text{ dla Erewania,}$$

$$- N_{wet} = 122,00 \text{ dla Manili.}$$

Wartość współczynnika $g(x)$ anteny równa jest :

$$g(x) = \sqrt{3,86 \cdot (x^2 + 1)^{\frac{11}{12}} \cdot \sin\left(\frac{11}{6} \arctg \frac{1}{x}\right) - 7,08 \cdot x^{\frac{5}{6}}} \quad (6.8)$$

$$\text{gdzie } x = 6,1 \cdot 10^{-4} \cdot \eta D^2 f (\sqrt{\sin^2 \theta + 2,35 \cdot 10^{-4}} + \sin \theta) \quad (6.9)$$

Zarówno dla Erewania jak i dla Manili, wartości x i $g(x)$ wynoszą odpowiednio :

$$- x = 0,00167$$

$$- g(x) = 0,988$$

Z kolei wartość dewiacji standardowej sygnału radiowego σ można wyznaczyć ze wzoru :

$$\sigma = (0,0036 + 0,0001 \cdot N_{wet}) f^{\frac{7}{12}} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1,2}} \quad (6.10)$$

i dla powyższych danych wynosi ona :

$$- \sigma = 0,607 \text{ dla Erewania,}$$

$$- \sigma = 1,575 \text{ dla Manili.}$$

Wartości zaników A_p przekraczanych przez p procent czasu spowodowane przez scyntylacje, obliczone według wzoru [22] :

$$A_p = [-0,061(\log p)^3 + 0,072(\log p)^2 - 1,711\log p + 3] \cdot \sigma \quad (6.11)$$

wynoszą ostatecznie :

$$- A_p = 4,4 \text{ dB dla Erewania,}$$

$$- A_p = 11,3 \text{ dB dla Manili.}$$

Wyższy poziom zaników w Manili jest skutkiem odpowiednio większej wartości współczynnika N_{wet} .

6.6. Tłumienie w gazach atmosferycznych

Opis problemu

Projektowane są dwa przęsła horyzontowej linii radiowej, każde o długości 30 km i zlokalizowane odpowiednio w okolicach:

$$- \text{Norylska (Rosja) - } \lambda = 88,10^\circ\text{E, } \varphi = 69,33^\circ\text{N,}$$

$$- \text{Mbandaki (Kongo) - } \lambda = 18,27^\circ\text{E, } \varphi = 0,07^\circ\text{N.}$$

Anteny stacji przekaźnikowych w Norylsku umieszczone są na wysokości 170 m n.p.m., zaś w wyżej położonej Mbandace – na wysokości 340 m n.p.m. Należy obliczyć wartość tłumienia fali radiowej w gazach atmosferycznych dla obu przęsł, dla częstotliwości 6, 22 i 58 GHz.

Rozwiązanie

Całkowite tłumienie fali radiowej w gazach atmosferycznych można obliczyć posługując się zależnością (5.11):

$$A = d\gamma_o + d\gamma_w \quad (6.12)$$

gdzie :

A - tłumienie w gazach atmosferycznych [dB],

d - długość trasy radiowej [km],

γ_o - tłumienie jednostkowe wnoszone przez powietrze suche [dB/km],

γ_w - tłumienie jednostkowe wnoszone przez parę wodną [dB/km].

Do obliczenia tłumień jednostkowych γ_o i γ_w można wykorzystać procedurę przybliżoną ITU-R szacowania tłumienia fali radiowej w gazach atmosferycznych [23]. Konieczna jest znajomość średnich wartości temperatury, ciśnienia i wilgotności w miejscu lokalizacji przęseł linii radiowych. Średnie wartości temperatury T i wilgotności ρ w Norylsku i Mbandace uzyskano na podstawie danych udostępnianych przez ITU-R, pod adresem internetowym <http://www.itu.int/ITU-R/software/study-groups/rsg3/databanks/troposph/index.html>.

Wynoszą one odpowiednio:

- Norylsk : $T = 263,5$ K, $\rho = 1,7$ g/m³,
- Mbandaka : $T = 299,6$ K, $\rho = 18,2$ g/m³.

Natomiast średnie wartości ciśnienia wyliczono na podstawie modelu atmosfery standardowej [25] :

- Norylsk : $p = 989,6$ hPa,
- Mbandaka : $p = 975,4$ hPa.

Na podstawie powyższych danych, obliczono tłumienia jednostkowe γ_o i γ_w , dla obu przęseł dla częstotliwości 6, 22 i 58 GHz. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tabeli 6.3.

Tab. 6.3

Wartości współczynników γ_o i γ_w dla Norylska i Mbandaki, dla częstotliwości 6, 22 i 58 GHz

	Norylsk		Mbandaka	
	γ_o [dB/km]	γ_w [dB/km]	γ_o [dB/km]	γ_w [dB/km]
6 GHz	0,00923	0,000434	0,00620	0,00497
22 GHz	0,0135	0,0381	0,0105	0,402
58 GHz	14,95	0,0322	11,21	0,378

Na koniec obliczono całkowite tłumienie w gazach atmosferycznych dla obu przęseł i dla wszystkich trzech częstotliwości fali radiowej. Wyniki zaprezentowano w tabeli 6.4.

Tab. 6.4

Całkowite tłumienie w gazach atmosferycznych dla Norylska i Mbandaki,
dla częstotliwości 6, 22 i 58 GHz

	A [dB]	
	Norylsk	Mbandaka
6 GHz	0,290	0,335
22 GHz	1,548	12,38
58 GHz	449,5	347,6

Tłumienie jednostkowe powietrza suchego γ_0 zależy od średnich wartości temperatury i ciśnienia powietrza. Niższe temperatury i wyższe ciśnienia w Norylsku sprawiają, że γ_0 osiąga tam wyższe wartości w porównaniu z Mbandaką. Różnice względne nie przekraczają 50 %. Natomiast tłumienie jednostkowe pary wodnej γ_w , które jest proporcjonalne do wilgotności powietrza, wykazuje większe różnicowanie w zależności od warunków klimatycznych. W Mbandace wartości γ_w są ponad 10-krotnie większe od odpowiadających im wartości w Norylsku.

Tłumienie fali radiowej w gazach atmosferycznych silnie rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości. Szczególnie wysokie wartości przyjmuje dla częstotliwości z zakresu od 54 do 66 GHz (rys. 5.10), głównie z powodu tłumienia fali radiowej w powietrzu suchym.

Wnioski i uwagi końcowe

W pracy dokonano analizy warunków terenowych i zjawisk zachodzących w troposferze, mających istotny wpływ na funkcjonowanie systemów radiokomunikacyjnych. W trzech pierwszych rozdziałach przedstawiono budowę i skład atmosfery, zaprezentowano dekadowy podział widma fal radiowych i scharakteryzowano wybrane systemy radiokomunikacyjne. Następnie omówiono kolejno zjawiska zachodzące w troposferze i mające wpływ na rozchodzenie się fal radiowych. Opisano również propagację wielodrogową fal radiowych i jej konsekwencje. W ostatnim rozdziale przedstawiono przykłady obliczeń uwzględniających wpływ ukształtowania terenu i zjawisk atmosferycznych na projektowane systemy radiokomunikacyjne. Zarówno opisane zjawiska jak i przykłady obliczeń pozwalają na wyciągnięcie określonych wniosków dotyczących poszczególnych systemów radiokomunikacyjnych.

Systemy telefonii komórkowej wykorzystują zakres częstotliwości od 450 MHz do 2,2 GHz. Oznacza to, że tłumienie sygnału radiowego spowodowane obecnością gazów atmosferycznych i opadami deszczu jest w tym przypadku znikomo małe (rozdział 6.4). Zjawisko scyntylacji jest również zaniedbywalne, jako że odległości między stacjami bazowymi a terminalami ruchomymi nie przekraczają kilkudziesięciu kilometrów. Zakrzywienie trajektorii fal radiowych, spowodowane zmianami wskaźnika refrakcji atmosferycznej, także nie jest istotne, ponieważ stosowane anteny mają duże, kilkudziesięciostopniowe kąty połowy mocy lub są dookólne. Zakłócenia w transmisji może natomiast powodować propagacja wielodrogowa (rozdział 4.2). Z kolei zjawisko dyfrakcji ma wpływ zarówno pozytywny – umożliwia łączność z terminalami zasłoniętymi przez przeszkody terenowe, jak i negatywny – wprowadza dodatkowe tłumienie sygnału radiowego (rozdział 6.3).

Horyzontowe linie radiowe są łączami typu punkt-punkt. Ich anteny są na stałe zamocowane na stacjach przekaźnikowych. Ważnym problemem projektowania linii radiowych jest występowanie stref odbicia fal radiowych. Gdy strefa odbicia znajduje się na terenie słabo tłumiącym fale radiowe, to może dojść do głębokich zaników sygnału radiowego w odbiorniku. Wykonane obliczenia (rozdziały 4.3 i 6.1) wskazują, że położenie stref odbicia można zmieniać regulując wysokości zawieszenia anten. Istotne jest również uwzględnienie przeszkód terenowych na trasie radiowej i zmian wskaźnika refrakcji atmosferycznej. Dla linii radiowych przeznaczono wiele zakresów częstotliwości – od 2 do 60 GHz. Przy wysokich częstotliwościach – np. 58 GHz, dodatkowym problemem staje się tłumienie sygnału radiowego przez gazy atmosferyczne, co powoduje, że takie przesyła linii radiowych praktycznie nie mogą być dłuższe niż kilka kilometrów (rozdział 6.6). Wraz ze wzrostem częstotliwości rosną również wartości tłumienia sygnału radiowego przez opad deszczu.

Szczególnie podatne na zjawisko tłumienia sygnału radiowego przez opad deszczu są systemy LMDS (rozdział 6.4), wykorzystujące częstotliwości powyżej 25 GHz. Architektura sieci LMDS typu punkt-wielopunkt sprawia, że stacje bazowe nie mogą zwiększać mocy transmitowanego sygnału podczas opadu deszczu z obawy przed przesterowaniem niektórych odbiorników abonenckich. Podczas projektowania systemu LMDS ważne jest również zadbanie o czystość pierwszej strefy Fresnela na trasach radiowych między stacjami bazowymi a antenami abonentów (rozdział 6.3).

W systemach satelitarnych transmisja sygnału radiowego jest prowadzona między sztucznym satelitą Ziemi – najczęściej geostacjonarnym, a stacją naziemną. Istotnymi problemami są tłumienie sygnału radiowego przez opad deszczu i gazy atmosferyczne, scyntyllacje (rozdział 6.5) i przeniki polaryzacyjne. Na podstawie wykonanych obliczeń (rozdziały 6.4 i 6.6) można stwierdzić, że ich znaczenie wzrasta przy dużych częstotliwościach – zwłaszcza w pasmach Ka i V.

Ukształtowanie terenu i zjawiska zachodzące w atmosferze mają często decydujący wpływ na poprawne działanie określonego systemu i zapewnienie odpowiedniej jakości transmisji. Różnorodność warunków terenowych i klimatycznych na kuli ziemskiej powoduje, że projektowanie każdego systemu komunikacji radiowej wymaga indywidualnego podejścia i osobnych obliczeń. W prezentowanej pracy zawarto przegląd niektórych związanych z tym zagadnień.

Literatura

- [1] Bieńkowski Z., *Poradnik UltraKrótkoFalowca*, Warszawa WKŁ 1988.
- [2] Crane R. K., *Prediction of Attenuation by Rain*, IEEE Transactions On Communicatons, vol. com-28, nr. 9, Wrzesień 1980.
- [3] Dołuchanow M. P., *Rozchodzenie się fal radiowych*, Warszawa PWN 1965.
- [4] *Encyklopedia fizyki*, Warszawa PWN 1972.
- [5] Encyklopedia multimedialna PWN – Cyklony tropikalne
<http://em.pwn.pl/geografia/artykuly/>
- [6] Foschini G., Gans M., *On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas*, Wireless Personal Communications, vol. 6, str. 311-335, Marzec 1998.
- [7] Freeman R. L., *Radio System Design for Telecommunications*, New York 1997.
- [8] Gawlik W., Kłyś T., *Koncepcja oprogramowania wspomagającego projektowanie łączny mikrofalowych o małych i średnich przepływnościach*, pr. dypl., Katedra Telekomunikacji AGH 1997.
- [9] Halliday D., Resnick R., *Fizyka II*, Warszawa PWN 1996.
- [10] Kaczorowska Z., *Pogoda i klimat*, Warszawa WSiP 1977.
- [11] Knopp R., Humblet P., *Information capacity and power control in single cell multiuser communications*, in Proc. IEEE Int. Computer Conf. (ICC '95), Seattle, WA, Czerwiec 1995.
- [12] Komsta Ł., *Krótkofalarstwo i radiokomunikacja*, Warszawa WKŁ 2001.
- [13] *Local Multipoint Distribution Service (LMDS)*, Web ProForum Tutorials, The International Engineering Consortium, www.iec.org
- [14] Morgan W. L., Rouffet D., *Business Earth Stations for Telecommunications*, New York 1988.

- [15] Neuman Ł., *Satelitarne systemy komunikacyjne*, republika.pl/neuman/kierunki/ssk.htm
- [16] Prawo Telekomunikacyjne, Art. 2 Ust. 17, Dz. U. z 2000 r. Nr 73.
- [17] Zalecenie ITU-R P.310-9, *Definitions of terms relating to propagation in non-ionized media*, ITU, Genewa, 1994.
- [18] Zalecenie ITU-R P.453-8, *The radio refractive index: its formula and refractivity data*, ITU, Genewa, 2001.
- [19] Zalecenie ITU-R P.530-9, *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*, ITU, Genewa, 2001.
- [20] Zalecenie ITU-R P.531-6, *Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems*, ITU, Genewa, 2001.
- [21] Zalecenie ITU-R P.617-1, *Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems*, ITU, Genewa, 1992.
- [22] Zalecenie ITU-R P.618-7, *Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems*, ITU, Genewa, 2001.
- [23] Zalecenie ITU-R P.676-5, *Attenuation by atmospheric gases*, ITU, Genewa, 2001.
- [24] Zalecenie ITU-R P.834-3, *Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation*, ITU, Genewa, 1999.
- [25] Zalecenie ITU-R P.835-1, *Reference standard atmospheres*, ITU, Genewa, 1994.
- [26] Zalecenie ITU-R P.836-1, *Water vapour: surface density and total columnar content*, ITU, Genewa, 1997.
- [27] Zalecenie ITU-R P.837-3, *Characteristics of precipitation for propagation modelling*, ITU, Genewa, 2001.
- [28] Zalecenie ITU-R P.838-1, *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*, ITU, Genewa, 1999.
- [29] Zalecenie ITU-R P.839-3, *Rain height model for prediction methods*, ITU, Genewa, 2001.
- [30] Zalecenie ITU-R P.840-3, *Attenuation due to clouds and fog*, ITU, Genewa, 1999.
- [31] Zalecenie ITU-R V.431-7, *Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications*, ITU, Genewa, 2000.
- [32] Stutzman W. L., Dishman W. K., *A simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths*, Radio Science, vol. 17, nr. 6, str. 1465-1476, Listopad-Grudzień 1982.
- [33] Stutzman W. L., Yon K. M., *A simple rain attenuation model for earth-space radio links operating at 10-35 GHz*, Radio Science, vol. 21, nr. 1, str. 65-72, Styczeń-Luty 1986.

-
- [34] Wesołowski K., *Systemy radiokomunikacji ruchomej*, Warszawa WKŁ 1998.
- [35] Woch R., *Dostępność częstotliwości dla cyfrowych linii radiowych*, *Materiały Konferencyjne CLR'01*, Kraków FPT 2001.
- [36] Wojnar A., *Systemy radiokomunikacji ruchomej lądowej*, Warszawa WKŁ 1989.
- [37] Woś A., *Meteorologia dla geografów*, Warszawa PWN 2000.
- [38] www.radio.org.pl/poradnik/bandplan/

Załącznik A

Poniżej przedstawiono kod programu *odbicia* napisanego w języku C i przeznaczonego do środowiska systemu operacyjnego Windows. Program ten służy do obliczania lokalizacji stref odbicia fali radiowej w systemie radiokomunikacyjnym, co zostało opisane w rozdziale 4.3. Do obliczeń konieczne jest podanie 3 parametrów :

- wysokości zawieszenia obu anten względem powierzchni Ziemi,
- nazwy pliku z danymi dotyczącymi profilu hipsometrycznego trasy między antenami.

Plik z danymi powinien zawierać dwie kolumny liczb. W pierwszej z nich powinny znajdować się odległości kolejnych punktów na trasie między antenami podane w kilometrach. Druga kolumna to wysokości nad poziom morza tych punktów.

Przykładowy wygląd pliku z danymi :

0	80
2.5	30
3	25
4.2	60
5	30
8	35
10	75

Tak zapisany profil hipsometryczny oznacza, że trasa ma długość 10 km, a anteny znajdują się na wzniesieniach o wysokościach 80 i 75 m n.p.m. Trasa ta prowadzi przez dwie doliny (2,5 ÷ 3 km i 5 ÷ 8 km) rozdzielone pagórkami o wysokości 60 m n.p.m.

Wysokości zawieszenia anten, podawane jako parametry przy uruchomieniu programu, to wysokości względne, liczone od powierzchni Ziemi.

Ostatecznie, po kompilacji, program należy uruchamiać jako :

```
odbicia.exe <wysokość anteny na początku trasy> <wysokość anteny na końcu trasy> <nazwa pliku z profilem hipsometrycznym>
```

Przykładowo, uruchomienie programu komendą :

```
odbicia.exe 30 30 profil.txt
```

będzie oznaczało, że dane o profilu trasy znajdują się w pliku *profil.txt*, a obie anteny zawieszono na wysokościach 30 metrów nad poziomem gruntu.

Kod programu *odbicia.c*

```

/***** POCZATEK *****/
#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<math.h>

/* FUNKCJA SPRAWDZAJACA ZASLANIANIE STREF ODBICIA PRZEZ WIERZCHOLKI
WZNIESIEN */

int zaslanianie (int liniaf, int nr, float odlendbisyf, float xbisf, float
ybisf, float odl1bisyf, float odl2bisyf, float wynik1f, float wynik2f, float
tabodlf[1000], float tabwysf[1000])
{
int j ;
float wyspunkt , odlpunkt , odleglosc ;

for ( j = 2 ; j < (nr - 1) ; j++ )
{
wyspunkt = (tabwysf[j] - tabwysf[nr] - ((tabwysf[nr-1]-
tabwysf[nr])*(tabodlf[nr]-tabodlf[j])/(tabodlf[nr]-tabodlf[nr-
1])))*(tabodlf[nr]-tabodlf[nr-1])/(odl2bisyf-odl1bisyf) ;
odlpunkt = odl2bisyf - ((tabodlf[nr]-tabodlf[j])*(odl2bisyf-
odl1bisyf)/(tabodlf[nr]-tabodlf[nr-1])) - (wyspunkt*(tabwysf[nr-1]-
tabwysf[nr])/(tabodlf[nr]-tabodlf[nr-1])) ;
if (wyspunkt < 0) continue ;
if (wyspunkt >= xbisf) return 0 ;
else
{

```



```

odleglosc = xbisf*odlpunkt/(xbisf-wyspunkt) ;
if (odleglosc > wynik2f) return 0 ;
if ((odleglosc <= wynik2f) && (odleglosc > wynik1f)) wynik1f = odleglosc ;
}
}

for ( j = nr + 1 ; j < liniaf ; j++ )
{
wyspunkt = ((tabwysf[j] - tabwysf[nr]) + ((tabwysf[nr-1]-
tabwysf[nr])*(tabodlf[j]-tabodlf[nr])/(tabodlf[nr]-tabodlf[nr-
1])))*(tabodlf[nr]-tabodlf[nr-1])/(odl2bisf-odl1bisf) ;
odlpunkt = odl2bisf + ((tabodlf[j]-tabodlf[nr])*(odl2bisf-
odl1bisf)/(tabodlf[nr]-tabodlf[nr-1])) - (wyspunkt*(tabwysf[nr-1]-
tabwysf[nr])/(tabodlf[nr]-tabodlf[nr-1])) ;
if (wyspunkt < 0) continue ;
if (wyspunkt >= ybisf) return 0 ;
else
{
odleglosc = odlendbisf - (ybisf*(odlendbisf-odlpunkt)/(ybisf-wyspunkt)) ;
if (odleglosc < wynik1f) return 0 ;
if ((odleglosc >= wynik1f) && (odleglosc < wynik2f)) wynik2f = odleglosc ;
}
}

printf ("Strefa odbicia: od %f m do %f m\n", wynik1f, wynik2f) ;
return 1 ;
}

/***** FUNKCJE ZERUJACE TABLICE *****/

void zerowanie20 (char tab[20])
{
int cleaner ;
cleaner = 0 ;
while (cleaner!=20)
{
tab[cleaner] = NULL ;
cleaner++ ;
}
}

void zerowanie1000 (float tab[1000])
{
int cleaner ;
cleaner = 0 ;
while (cleaner!=1000)
{
tab[cleaner] = NULL ;
cleaner++ ;
}
}

main (int argc, char *argv[])
{
/***** DEKLARACJE I CZYSZCZENIE ZMIENNYCH *****/

FILE *ind ;
char z , odl[20] , wys[20] ;
int linia , n , odlczywys , counter , i ;
float x , y , xbis , ybis , odlendbis , odl1bis , odl2bis ;
float d1 , d2 , wynik1 , wynik2 , tabodl[1000], tabwys[1000] ;

```

```
if ((argc != 3) && (argc != 4))
{
printf ("Program należy uruchomic : \n") ;
printf ("\t- z dwoma parametrami - wysokosciami zawieszenia anten\n") ;
printf ("\tprofil hipsometryczny pobierany jest wtedy z pliku `dane`\n") ;
printf ("\t- lub z trzema parametrami - ostatnim jest wtedy nazwa pliku\n")
;
printf ("\tz profilem linii radiowej.\n\n") ;
printf ("Uwaga : Do pliku z profilem trasy należy wpisac wysokosci
punktow\n" ) ;
printf ("\tw metrach i odleglosci od poczatku trasy w kilometrach.\n" ) ;
printf ("Wyniki - granice stref odbic - podawane sa w metrach.\n\n" ) ;
}
else
{
if (argc == 3) ind = fopen ( "dane" , "r" ) ;
if (argc == 4) ind = fopen ( argv[3] , "r" ) ;

if (ind == NULL)
{
printf ("Problem z otwarciem pliku z profilem trasy\n\n") ;
exit(0) ;
}

x = atof (argv[1]) ;
y = atof (argv[2]) ;

n = 0 ;
odlczywys = 0 ;
linia = 0 ;
counter = 0 ;
zerowanie20 (odl) ;
zerowanie20 (wys) ;
zerowanie1000 (tabodl) ;
zerowanie1000 (tabwys) ;

/***** ZCZYTANIE DANYCH Z PLIKU Z PROFILEM TRASY *****/

while (1)
{
z = getc (ind) ;

if ((z == '\n') || (z == EOF))
{

if ((n != 0) && (odlczywys > 0))
{
linia++ ;
tabodl[linia] = ( atof (odl) ) * 1000 ;
tabwys[linia] = atof (wys) ;
}

n = 0 ;
odlczywys = 0 ;
zerowanie20 (odl) ;
zerowanie20 (wys) ;

if (z == EOF) break ;
}
}
```

```

else
{

if ((z == ' ') || (z == '\t') )
{
if (n != 0) odlczywys++;
if ((n != 0) && (odlczywys == 1)) n = 0 ;
}

else
{
if (odlczywys == 0) odl[n] = z ;
if (odlczywys == 1) wys[n] = z ;
n++ ;
}
}
}
fclose (ind) ;

/***** OBLICZENIA *****/

for ( i=2 ; i<=linia ; i++ )
{

xbis = (x+tabwys[1]-tabwys[i]-((tabwys[i-1]-tabwys[i])*(tabodl[i]-
tabodl[1])/(tabodl[i]-tabodl[i-1])))*(tabodl[i]-tabodl[i-
1])/sqrt(((tabodl[i]-tabodl[i-1])*(tabodl[i]-tabodl[i-1]))+((tabwys[i-1]-
tabwys[i])*(tabwys[i-1]-tabwys[i])))) ;
ybis = (y + tabwys[linia]-tabwys[i]+((tabwys[i-1]-
tabwys[i])*(tabodl[linia]-tabodl[i])/(tabodl[i]-tabodl[i-1])))*(tabodl[i]-
tabodl[i-1])/sqrt(((tabodl[i]-tabodl[i-1])*(tabodl[i]-tabodl[i-
1]))+((tabwys[i-1]-tabwys[i])*(tabwys[i-1]-tabwys[i])))) ;

if ((xbis > 0) && (ybis > 0))
{
odlendbis = ((tabodl[linia]-tabodl[1])*(sqrt(((tabodl[i]-tabodl[i-
1])*(tabodl[i]-tabodl[i-1]))+((tabwys[i-1]-tabwys[i])*(tabwys[i-1]-
tabwys[i])))))+(xbis-ybis)*(tabwys[i-1]-tabwys[i]))/(tabodl[i]-tabodl[i-
1]) ;
odl1bis = ((tabodl[i-1]-tabodl[1])*(sqrt(((tabodl[i]-tabodl[i-
1])*(tabodl[i]-tabodl[i-1]))+((tabwys[i-1]-tabwys[i])*(tabwys[i-1]-
tabwys[i])))))+(xbis*(tabwys[i-1]-tabwys[i]))/(tabodl[i]-tabodl[i-1]) ;
odl2bis = odl1bis + (sqrt(((tabodl[i]-tabodl[i-1])*(tabodl[i]-tabodl[i-
1]))+((tabwys[i-1]-tabwys[i])*(tabwys[i-1]-tabwys[i])))) ;

if (xbis < ybis)
{
d1 = odlendbis*xbis/(xbis+ybis) ;
d2 = odlendbis*(sqrt(xbis))/(sqrt(xbis)+sqrt(ybis)) ;
}
else
{
d1 = odlendbis*(sqrt(xbis))/(sqrt(xbis)+sqrt(ybis)) ;
d2 = odlendbis*xbis/(xbis+ybis) ;
}

if ((d2 < odl1bis) || (d1 > odl2bis)) { /* NIC */ }
if ((d1 < odl1bis) && (d2 >= odl1bis) && (d2 <= odl2bis))
{

```

```
wynik1 = tabodl[i-1] ;
wynik2 = tabodl[i-1]+((d2-odl1bis)*(tabodl[i]-tabodl[i-1]))/(odl2bis-
odl1bis) ;
counter = counter + zaslanianie ( linia, i, odlendbis, xbis, ybis, odl1bis,
odl2bis, wynik1, wynik2, tabodl, tabwys) ;
}
if ((d1 >= odl1bis) && (d1 <= odl2bis) && (d2 > odl2bis))
{
wynik1 = tabodl[i-1]+((d1-odl1bis)*(tabodl[i]-tabodl[i-1]))/(odl2bis-
odl1bis) ;
wynik2 = tabodl[i] ;
counter = counter + zaslanianie ( linia, i, odlendbis, xbis, ybis, odl1bis,
odl2bis, wynik1, wynik2, tabodl, tabwys) ;
}
if ((d1 < odl1bis) && (d2 > odl2bis))
{
wynik1 = tabodl[i-1] ;
wynik2 = tabodl[i] ;
counter = counter + zaslanianie ( linia, i, odlendbis, xbis, ybis, odl1bis,
odl2bis, wynik1, wynik2, tabodl, tabwys) ;
}
if ((d1 >= odl1bis) && (d2 <= odl2bis))
{
wynik1 = tabodl[i-1]+((d1-odl1bis)*(tabodl[i]-tabodl[i-1]))/(odl2bis-
odl1bis) ;
wynik2 = tabodl[i-1]+((d2-odl1bis)*(tabodl[i]-tabodl[i-1]))/(odl2bis-
odl1bis) ;
counter = counter + zaslanianie ( linia, i, odlendbis, xbis, ybis, odl1bis,
odl2bis, wynik1, wynik2, tabodl, tabwys) ;
}
}
}

/***** ZAKONCZENIE *****/

if (counter == 0) printf ("Brak stref odbicia\n\n") ;
}
}

/***** KONIEC PROGRAMU *****/
```