

S/4602



AKADEMIA OBRONY NARODOWEJ

AON 5275/2000

Mjr dr inż. Piotr DANILUK

WŁAŚCIWOŚCI ROZCHODZENIA SIĘ FAL RADIOWYCH WYKORZYSTYWANYCH W WOJSKOWYCH SYSTEMACH ŁĄCZNOŚCI

53210

WARSZAWA

2000

AKADEMIA OBRONY NARODOWEJ

WYDZIAŁ WOJSK LĄDOWYCH KATEDRA DOWODZENIA I ŁĄCZNOŚCI

AON 5275/2000



Mjr dr inż. Piotr Daniluk

WŁAŚCIWOŚCI ROZCHODZENIA SIĘ FAL RADIOWYCH WYKORZYSTYWANYCH W WOJSKOWYCH SYSTEMACH ŁĄCZNOŚCI

WARSZAWA

2000

Powielenie i oprawa:
Akademia Obrony Narodowej – Wydział Wydawniczy
Zam. nr 1295/2000

SPIS TREŚCI

WSTĘP	-5
1. OGÓLNE ZASADY PROPAGACJI	-7
1.1. Podział widma fal radiowych	-7
1.2. Rodzaje propagacji	-8
1.3. Warstwy jonosfery (troposfery, egzosfery)	-11
2. ROZCHODZENIE SIĘ FAL DŁUGICH	-12
2.1. Fale ekstremalnie długie	-12
2.2. Fale myriametrowe i kilometrowe	-14
2.3. Propagacja jonosferyczna fal długich	-15
3. ROZCHODZENIE SIĘ FAL ŚREDNICH	-17
4. ROZCHODZENIE SIĘ FAL KRÓTKICH	-19
4.1. Ogólna charakterystyka propagacji fal krótkich	-19
4.2. Fale krótkie 20 – 30 MHz	-21
4.3. Propagacja przyziemna fal krótkich	-22
4.4. Propagacja jonosferyczna fal krótkich	-24
4.5. Zasady propagacji jonosferycznej fal krótkich	-28
4.6. Maksymalna częstotliwość użytkowa – MUF	-29
4.7. Optymalna częstotliwość użytkowa - FOT	-31
4.8. Najniższa częstotliwość użytkowa - LUF	-32
4.9. Obliczenia MUF, LUF i FOT	-34
4.10. Zjawisko strefy martwej	-36
5. ROZCHODZENIE SIĘ FAL ULTRAKRÓTKICH	-38
5.1. Fala przestrzenna o zasięgu horyzontowym	-38
5.2. Fala duktu przyziemnego	-43
5.3. Propagacja od rozproszenia w troposferze (TS)	-46
5.4. Propagacja od śladów meteorów (MS)	-51
5.5. Propagacja za pomocą sztucznych satelitów (SAT)	-53

WSTĘP

Niniejsze opracowanie ma na celu przedstawienie szeroko pojętego obszaru rozchodzenia się fal radiowych w aspekcie wojskowych systemów łączności.

Znajomość zasad propagacji fal radiowych wykorzystywanych w wojskowych systemach łączności jest podstawą efektywnego kierowania systemami radiokomunikacyjnymi, a szczególnie planowania sieci łączności, w tym naboru częstotliwości, określaniu właściwego zasięgu, emisji i rodzaju pracy.

Prezentowane opracowanie posiada charakter mini-leksykonu tematycznego, w którym w sposób zwięzły i przystępny przedstawiono propagację fal radiowych w poszczególnych zakresach wykorzystywanych przez wojskowe systemy łączności. Ze zrozumiałych względów najmniej uwagi poświęcono propagacji fal radiowych w zakresie średniofalowym, najwięcej – krótkofalowym i ultrakrótkofalowym.

Autor żywi nadzieję, iż prezentowane opracowanie będzie pomocne nie tylko w przygotowaniu się studentów do zajęć z taktyki rodzajów wojsk oraz systemów łączności, ale zainteresuje wszystkich tych, którzy chcą zapoznać się z zasadniczymi problemami radiokomunikacji wojskowej.

1. OGÓLNE ZASADY PROPAGACJI

1.1 PODZIAŁ WIDMA FAL RADIOWYCH

Zakres fal radiowych zawiera się od $0,3 \cdot 10^x$ do $3 \cdot 10^x$ Hz, gdzie:

x - numer zakresu, k = kilo / $\cdot 10^3$ /, M = Mega / $\cdot 10^6$ /, G = Giga / $\cdot 10^9$ /, T = Tera / $\cdot 10^{12}$ /.

Zakresy fal radiowych

Poniżej przedstawiono podział fal radiowych na podstawowe zakresy w następującej kolejności poszczególnych określeń: numer zakresu, skrót nazwy zakresu w języku angielskim, zakres częstotliwości w Hz, kHz, MHz lub GHz.

1. ELF: 3 Hz - 30 Hz;
2. SLF: 30 Hz - 300 Hz;
3. ULF: 300 Hz - 3 kHz fale ekstremalnie długie;
4. VLF: 3 kHz - 30 kHz fale miriametrowe /bardzo długie/;
5. LF: 30 kHz - 300 kHz fale kilometrowe /długie/;
6. MF: 300 kHz - 3000 kHz fale hektametrowe /średnie/;
7. HF: 3 MHz - 30 MHz fale dekametrowe /krótkie/;
8. VHF: 30 MHz - 300 MHz fale metrowe /ultrakrótkie /;
9. UHF: 300 MHz - 3000 MHz fale decymetrowe;
10. SHF: 3 GHz - 30 GHz fale centymetrowe /mikrofale/;
11. EHF: 30 GHz - 300 GHz fale milimetrowe;
12. 300 GHz - 3000 GHz fale decymilimetrowe.

Obecnie, praktycznie wykorzystywany przez służby radiokomunikacyjne na świecie jest zakres fal radiowych od 7 Hz do 450 GHz.

W Polsce wykorzystywany jest zakres fal radiowych od 50 kHz (stacja nadająca wzorzec częstotliwości i czasu w Radomiu) do około 50 GHz (satelitarne systemy telekomunikacyjne).

1.2. RODZAJE PROPAGACJI

Mianem propagacji określa się rozchodzenie się fali radiowej.

Ze względu na sposób rozchodzenia się fali radiowej wyodrębnia się:

1. Fale w wolnej przestrzeni;

2. Fale przyziemne:

- o propagacji powierzchniowej,
- o propagacji przestrzennej.

3. Fale troposferyczne:

- o propagacji przez superrefrakcję,
- o propagacji przez rozproszenie.

4. Fale jonosferyczne:

- o propagacji sposobem falowodowym,
- o propagacji przez refrakcję,
- o propagacji przez rozproszenie,
- o propagacji przez odbicie od smug meteorów.

5. Fale kosmiczne:

- o propagacji świstowej,
- o propagacji satelitarnej.

1. Fala w wolnej przestrzeni

Takie fale rozchodzą się swobodnie w przestrzeni wolnej od przeszkód, np. w próżni doskonałej. Wtedy fala swobodna nie doznaje tłumienia, ale wartość jej maleje z rosnącą odległością.

2. Fala przyziemna

Takie fale rozchodzą się przy powierzchni ziemi. Pomijamy w tym przypadku korzystanie przez falę z propagacji z wykorzystaniem odbić od warstw atmosfery. Rozróżniamy dwa warianty fali przyziemnej - **powierzchniową i przestrzenną**:

a) **Fala powierzchniowa** - takie fale rozchodzą się tuż przy powierzchni ziemi. Dzięki dyfrakcji, fale tego typu mogą pokonywać nierówności terenu, a więc rozchodzić się wzdłuż kulistej powierzchni ziemi na znaczne i bardzo znaczne odległości. Zasięg fali powierzchniowej zależy od długości fali i rośnie wraz ze spadkiem częstotliwości. Typowym przykładem fali powierzchniowej jest fala promieniowana przez stacje radiofoniczne, radionawigacyjne w zakresie 3 kHz...350 kHz;

b) Fala przestrzenna - istnieje, gdy dwie lub przynajmniej jedna z anten radiostacji jest zainstalowana na pewnej wysokości nad ziemią. W takim przypadku do anteny radiostacji odbierającej docierają dwa rodzaje fal: **fala bezpośrednia i fala odbita od powierzchni ziemi**. Rozróżniamy wtedy dwie charakterystyczne sytuacje:

- **Wysokość anteny nad ziemią jest niewielka.**

Występują jednocześnie: fala powierzchniowa i przestrzenna (bliższy zasięg jest bardzo stabilny, dalszy - niestabilny);

- **Wysokość anteny nad ziemią jest większa.**

W takim przypadku fala przestrzenna dominuje nad falą powierzchniową.

3. Fala troposferyczna

Takie fale rozchodzą się za pomocą warstwy atmosfery zwanej troposferą. Rozróżniamy dwa rodzaje propagacji troposferycznej:

a) Propagacja przez superrefrakcję - polega na kilku lub kilkunastu refrakcjach w tunelach troposferycznych, zwanych również **duktami troposferycznymi**. Zasięgi takiej fali są znaczne, przekraczają często zasięgi fali przyziemnej;

b) Propagacja przez rozproszenie troposferyczne - polega na rozchodzeniu się fal radiowych poza horyzont i powrotem pewnej ich części na ziemię. Tylko pewna część wypromieniowanej energii trafia do stacji odbierającej co wymaga używania anten kierunkowych o dużym zysku i stosowania bardzo znacznych mocy. Propagacja tego typu jest wykorzystywana w zakresie KF i UKF.

4. Fala jonosferyczna

Takie fale rozchodzą się za pomocą warstwy atmosfery zwanej jonosferą. Rozróżniamy cztery rodzaje propagacji jonosferycznej:

a) Propagacja sposobem falowodowym - polega na przemieszczaniu fal bardzo długich i długich w przestrzeni między Ziemią a najniższą warstwą jonosfery. W tym przypadku najniższa warstwa jonosfery i powierzchnia Ziemi tworzą jakby falowód dla tych fal. Przy stosowanych bardzo dużych mocach, zasięgi propagacji są bardzo duże (10...15 tys. km przy 100 kW...1 MW mocy);

b) Propagacja dzięki refrakcji jonosferycznej - polega na załamaniu fali w jonosferze i powrotem jej na Ziemię (tak jakby ulegała ona odbiciu od jonosfery). Ze względu na ilość takich odbić od jonosfery, a dla niektórych sytuacji jeszcze od Ziemi i znów od jonosfery, rozróżniamy dwa rodzaje refrakcji jonosferycznej:

- **Refrakcja jonosferyczna jednoskokowa (jednokrotna).** Proces obicia się fali od jonosfery i powrotu na Ziemię odbywa się tylko jednokrotnie. Fala po powrocie na Ziemię nie odbija się od powierzchni Ziemi, a więc nie ma możliwości ponownego powędrowania do góry, do jonosfery;
- **Refrakcja jonosferyczna wieloskokowa (wielokrotna).** Proces odbicia się fali od jonosfery i następnie od Ziemi odbywa się wielokrotnie (najczęściej dwu lub trzykrotnie). Zapewnia ona największe zasięgi. Zdarza się, że fala radiowa tym sposobem okrąży kulę Ziemią jeden lub nawet dwa razy. Z ilością odbić pogarsza się jakość i siła sygnału;
- c) **Propagacja przez rozproszenie w jonosferze** - polega na rozchodzeniu się fal radiowych poza horyzont i powrotowi ich na Ziemię. Cechą charakterystyczną rozproszenia tego typu jest to, że tylko nieznaczna część powraca na Ziemię i to w ściśle określonym, wąskim zakresie częstotliwości;
- d) **Propagacja przez odbicie od smug meteorów** - polega na rozchodzeniu się fal radiowych dzięki odbiciu od zjonizowanych śladów powstających za spadającymi i spalającymi się meteorami. Ten rodzaj propagacji wymaga bardzo szybkiego, elektronicznego przetwarzania danych i przewidywania występowania serii meteorów (pozwala to zwiększyć prawdopodobieństwo i czas łączności);
- e) **Szczególne rodzaje łączności - satelitarna i świstowa.**

5. Fala kosmiczna

Fale takie, w pomijalnym stopniu tłumione przez warstwy atmosfery ziemskiej, rozchodzą się w przestrzeni kosmicznej. **Rozróżniamy dwa rodzaje tego typu fal:**

- a) **Propagacja świstowa** - polega na rozchodzeniu się fal radiowych wzdłuż linii pola geomagnetycznego. Nie jest to jednoznaczna klasyfikacja, ponieważ część tego zjawiska zachodzi w wyższych warstwach atmosfery. Jednak przeważająca część tych fal wędruje poza tę wysokość i, oczywiście, wraca na Ziemię. Propagacja taka występuje w zakresie fal bardzo długich i długich;
- c) **Propagacja kosmiczna - satelitarna** - polega na rozchodzeniu się nieskrępowanie fal radiowych z zakresu UKF oraz mikrofal bez znacznego tłumienia przez warstwy atmosfery. Fale radiowe tego typu rozchodzą się w przestrzeni kosmicznej swobodnie i prostoliniowo, czasami ulegając odchyleniom i ugięciom pod wpływem lokalnych pól wokół innych ciał niebieskich. Tego rodzaju fale są odbierane jako źródło informacji o kosmosie.

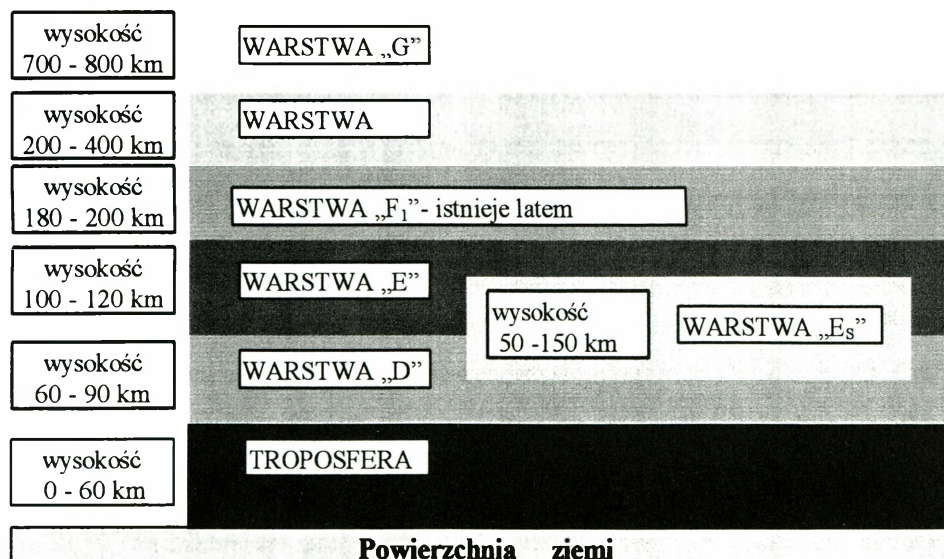
1.3. WARSTWY JONOSFERY (TROPOSFERY, EGZOSFERY)

W jonosferze występują:

- a) warstwa „G” - egzosfera, nie jest jeszcze dobrze zbadana;
- b) warstwa „F₂”- jest to najistotniejsza warstwa jonosfery w procesie propagacji KF pozwalająca dzięki wielokrotnym odbiciom na międzykontynentalne łączności. Jako warstwa trwała istnieje nawet po zachodzie słońca.
- c) warstwa „F₁”- jest ona mniej przydatna (aktywna) niż „F₂”, ale również uczestniczy w propagacji jonosferycznej. Występuje ona najczęściej latem i zanika po zachodzie słońca;
- d) warstwa „E”- jest to warstwa zasadniczo wpływająca na najniższe częstotliwości KF oraz na fale średnie i długie - odbijając je. Występuje ona całą dobę wraz z warstwą „F₂”;
- e) warstwa „E_s”- jest to warstwa będąca jakby częścią warstwy „E”. Istnieje ona stosunkowo sporadycznie, ale za to charakteryzuje się dużą intensywnością. Pozwala ona na odbicie fal KF i UKF. Jest to warstwa, która w trakcie swojego istnienia przemieszcza się ze znaczną prędkością. Zjawisko propagacji tego typu ma charakter przejściowy i jest związane z przesuwaniem się obszaru „otwartego” dla łączności dalekich (DX);
- f) warstwa „D”- jest to warstwa uczestnicząca w procesie propagacji fal radiowych. Wpływa ona tłumiąco na fale zakresu KF i SF. Aktywnie tłumii w dzień - a po zachodzie słońca zanika. Warstwa ta uczestniczy w propagacji fal długich i bardzo długich odbijając je.
- g) troposfera - rozchodzenie się fal radiowych w tej warstwie jest zależne od warunków meteorologicznych. Uczestniczy ona przede wszystkim w propagacji fal krótszych niż KF.

W nocy uczestniczą w propagacji dwie warstwy jonosfery - „E” i „F₂”.

W warunkach szczególnych występuje warstwa sporadyczna „E_s”.



Rys. 1.1. Schemat występowania warstw uczestniczących w propagacji fal radiowych

2. ROZCHODZENIE SIĘ FAL DŁUGICH

2.1. FALE EKSTREMALNIE DŁUGIE

1. Uwarunkowania propagacyjne

Zakres fal ekstremalnie długich jest poza zakresem fal przydzielonych i zawiera fale o częstotliwości poniżej 3 kHz (dłuższe niż 10 km). Praktyczne wykorzystanie tego podzakresu fal długich rozpoczęto w końcu lat pięćdziesiątych i na początku sześćdziesiątych, gdy poszukiwano zakresów fal do łączności z atomowymi łodziami podwodnymi w zanurzeniu. Fale krótkie i ultrakrótkie, ze względu na łatwość ugięć, nie nadawały się do tego celu. Stwierdzono, że w ziemię i w akwenty wodne najlepiej wnikają fale najdłuższe - jeszcze dłuższe od dotychczas stosowanych, np. do naziemnej łączności dalekosiężnej w zakresie 30 - 150 kHz. Ze względów ekonomicznych zaprzestano doświadczeń na kilkanaście lat. Do powyższych projektów powrócono dopiero w latach osiemdziesiątych. Oparto system łączności z łodziami podwodnymi w podzakresie od 7 Hz - 100 Hz. Oczywiście, rozmiary (powierzchnia) anten, stosowane potężne moce rzędu dziesiątek MW ograniczały system tylko do nielicznych, choć ogólnoswiatowych zastosowań.

2. Uwarunkowania techniczne

a) Anteny i moce

Największym problemem w omawianym projekcie były anteny, ponieważ teoretycznie powinny mieć długość $\lambda/2$. Dla rozpatrywanego podzakresu zajmowały powierzchnię kilkunastu lub kilku km^2 ! Taki zespół powinien posiadać kilkanaście do stu nadajników o łącznej mocy kilkudziesięciu MW. Ze względów technologicznych odstąpiono od tych zamierzeń i przeniesiono się z tym systemem łączności na zakres kilkunastu i dwudziestu kilku kHz, oczywiście z gorszym efektem.

W wypadku łodzi podwodnych występują anteny w dwóch wariantach:

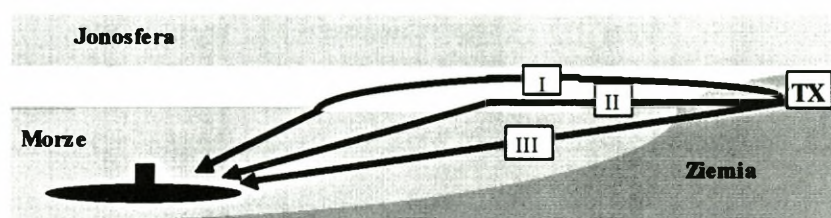
- linki długości kilkuset metrów (nawet do kilometra), przy czym część przy powierzchni wody musi mieć długość przynajmniej 200 - 300 m;
- boi przy powierzchni wody, do której doprowadzony jest przewód anteny.

b) Rodzaje pracy i emisje

Łączność z łodziami podwodnymi w tym wypadku jest jednostronna, tzn. radiostacje w łodziach tylko odbierają nadawane sygnały przez specjalne centra nadawcze. Sygnały radiowe docierają do głębokości stu i więcej metrów przy odległości stacji nadawczej nawet kilku tysięcy km.

Najistotniejszym ograniczeniem zasięgu w tym podzakresie nie jest odległość od stacji nadawczej, a głębokość zanurzenia stacji odbiorczej.

Praca tego typu odbywa się tylko emisjami telegraficznymi wąskopasmowymi. Czas przekazywania jednego znaku wynosi nawet kilka sekund. Dlatego istnieje potrzeba stosowania w tym zakresie i dla tego wykorzystania specjalnych rodzajów pracy. Jeśli praca odbywa się telegraficznie - to z bardzo małymi prędkościami, czy to w pracy automatycznej, czy pracy sygnałami Morse'a. Stosowane są tutaj specjalne zestawy skrótów radiowych o jeszcze prostszej strukturze, mniejszej ilości liter i większej jednoznaczności kodu informacji. Podobną „łatwość” wnikania fal ekstremalnie długich wykazuje również ziemia.



Rys. 2.1. Przykład rozchodzenia się fali ekstremalnie i bardzo długiej różnymi drogami:
I - przy udziale dolnej części jonosfery, II - przy powierzchni ziemi (wody - z częściowym wnikaniem w nią), III - wnikając w ziemię i wodę.

2.2. FALE MYRIAMETROWE I KILOMETROWE

1. Fale myriametrowe

Fale bardzo długie mają długość od 10 do 100 km (częstotliwość od 3 kHz do 30 kHz). Zasięg tych fal jest bardzo duży, rzędu nawet dziesiątek tys. kilometrów i stabilny.

Tłumienie fali powierzchniowej jest tym mniejsze, im mniejsza jest jej częstotliwość. Dlatego też, największe i najstabilniejsze zasięgi uzyskuje się w zakresie 3 kHz - 30 kHz. Dużą rolę w tym zakresie odgrywa jonosfera. W dużych odległościach od nadajnika nad falą powierzchniową góruje fala jonosferyczna, która zapewnia stabilną łączność (w tym zakresie występują bardzo małe straty dla fali jonosferycznej). Fala jonosferyczna tak jakby zwiększa i tak znaczny zasięg fali powierzchniowej. Nie występują tutaj żadne strefy martwe, ponieważ po zasięgu fali powierzchniowej od razu następuje zasięg fal jonosferycznych (w odróżnieniu do zakresu krótkofalowego).

Fale myriametrowe odznaczają się więc stosunkowo małym tłumieniem fali powierzchniowej i jonosferycznej, a co za tym idzie bardzo dużym zasięgiem o stałym poziomie sygnału. Małe tłumienie i bardzo wysoka stabilność warunków propagacji fal myriametrowych gwarantują wysoką niezawodność łączności w tym zakresie i to na dużych dystansach. Fale bardzo długie zapewniają łączność bez względu na porę doby, roku, okres aktywności słonecznej oraz wyznaczony zasięg. Dla tego ostatniego parametru istnieje tylko kwestia wartości stosowanej mocy nadajnika. – szczególnie istotna w łączności z atomowymi łodziami podwodnymi będącymi w zanurzeniu, pracującymi w sieci stworzonej z dwóch podsystemów: jednego na falach ekstremalnie długich, drugiego na bardzo długich.

1. Fale kilometrowe

Fale długie mają długość od 1 do 10 km - częstotliwość od 30 kHz do 300 kHz. Zasięg tych fal jest duży, ale mniej stabilny niż fal bardzo długich. Fale te dzieli się na:

- **Podzakres o właściwościach fal myriametrowych 30 kHz - 100 kHz,**

- **Podzakres przybliżony swym charakterem do fal średnich 100 kHz - 300 kHz.**

W omawianym zakresie fala powierzchniowa ulega silniejszemu tłumieniu niż fale bardzo długie. Wraz ze wzrostem częstotliwości rośnie tłumienie fali powierzchniowej, ograniczając już znacznie jej zasięg w okolicach 300 kHz. Poza tym, wraz ze wzrostem częstotliwości, rośnie wrażliwość fali na zmiany pory doby i roku. Fala jonosferyczna o długości kilku kilometrów bardziej poddaje się dobowym i rocznym zmianom atmosfery.

Z tego też powodu w zakresie tym występuje wyraźne rozgraniczenie na odbiór w dzień i w nocy oraz jakościowo - na odbiór fali powierzchniowej i fali jonosferycznej.

2.3. PROPAGACJA JONOSFERYCZNA FAL DŁUGICH

1. Ogólne zasady propagacji

W czasach początków radiokomunikacji, gdy fale długie były podstawowym zakresem łączności radiowej - sądzono, że tak duży zasięg tych fal wynika z bardzo małego tłumienia fal powierzchniowych. Dokładne obliczenia wykazały jednak, że tak znaczne natężenie sygnału odbieranego na dużych odległościach nie może być zasługą dyfrakcji (ugięcia) i małego tłumienia fali powierzchniowej. Wartości natężenia pola w dużych odległościach od nadajnika wielokrotnie przekraczały wartości obliczone teoretycznie. Okazało się, że tak duże wartości natężenia pola zawdzięcza się fali jonosferycznej. Wypromieniowana w tym zakresie, pod kątem elewacji równym zero, powraca na ziemię odbijając się od warstw jonosfery na wysokość do 100 km. Są to najniższe w jonosferze warstwy D i E (najpłytsze i najniższe operacje fali radiowej).

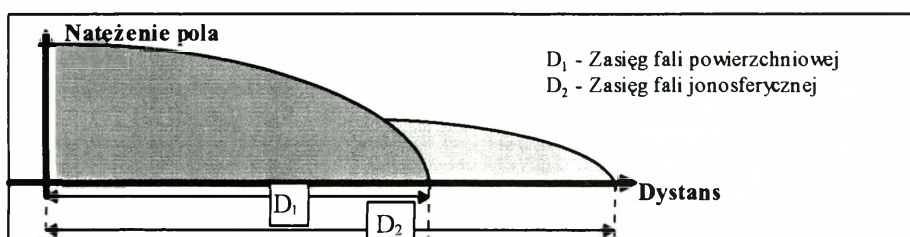
a) Propagacja jonosferyczna w dzień

W dzień fale długie odbijają się od warstwy D. Szybko rosnąca, wraz z wysokością, gęstość elektronowa tej warstwy powoduje to, że fale długie odbijają się od najradszych, a więc najniższych części warstwy D. Dlatego też, fale długie bardzo płytko wchodzi w jonosferę.

b) Propagacja jonosferyczna w nocy

W nocy dla fal długich warstwa D zanika. Odbijają się one wtedy od warstwy typu E - wnikać w nią jeszcze płycej niż w poprzednim przypadku.

W obu omawianych porach doby zachodzi, prawie całkowicie bez strat, odbicie fal długich, a szczególnie tych najdłuższych o częstotliwości rzędu Hz, kHz lub dziesiątek kHz. Wynika to z tego, że kiedy fale długie odbijają się od warstwy E, to warstwa D prawie zupełnie zanika nie wprowadzając istotnego tłumienia dla fal przechodzących przez nią.



Rys. 2.2. Zasięg fali powierzchniowej i jonosferycznej w omawianym zakresie

2. Zmiany natężenia sygnału na falach długich

a) Zmiany w ciągu roku

Wahania poziomu sygnału wynikają z tego, że odbijająca warstwa jonosfery w swej strukturze i gęstości elektronowej zmienia się.

Powodują one zmiany zdolności odbijania lub tłumienia określonych fal radiowych. Wahania poziomu sygnału fali odbijanej są tym wolniejsze, im częstotliwość pracy jest mniejsza. Zmiany maksymalne w natężeniu sygnału fal długich typu jonosferycznego w ciągu godzin lub minut nie są większe niż jedna trzecia ich wartości.

b) Zmiany w ciągu doby

Natężenie sygnału fali długiej typu jonosferycznego rośnie w nocy (ma ona większy zasięg). Im większa jest częstotliwość fali długiej, tym mniejszy jest zasięg jej fali jonosferycznej i jeszcze mniejszy powierzchniowej. Wraz z rosnącą częstotliwością tego zakresu coraz wyraźniej widać różnicę między zasięgiem w dzień i w nocy.

Specyficznymi zmianami są tutaj obniżenia poziomu natężenia pola w porze przejściowej, tzn. wtedy, gdy w jakimś fragmencie trasy jest świt lub zmierzch (trasa jest w „półmroku”). Warunki pośrednie powodują, że warstwa D jeszcze nie odbija fali, natomiast dokonuje tego warstwa wyższa E. Fala doznaje wtedy słabego odbicia od warstwy E i dodatkowo podwójnego tłumienia przez D.

c) Zmiany w ciągu pór roku.

Regułą jest to, że warunki łączności dalekosiężnej na falach długich jonosferycznych są lepsze zimą niż latem (zjawisko bardzo charakterystyczne dla tego typu fal). Natężenie pola odbieranego sygnału jest wtedy porównywalne w nocy zimą i latem, a natężenie pola odbieranego sygnału w ciągu dnia jest o połowę wyższe latem niż zimą.

3. Tłumienie fal długich

Istnieją różnice między tłumieniem w zakresie 10 - 100 kHz, a 100 - 300 kHz.

Wynika to z tego, że fala powierzchniowa wraz z rosnącą częstotliwością ulega coraz większemu tłumieniu.

Fala jonosferyczna ulega dużemu tłumieniu, ponieważ warstwa D przestaje odbijać coraz krótsze fale tego zakresu, powodując podwójne tłumienie wędrującej do warstwy E i powracającej, odbitej od niej, fali radiowej. Dla większych częstotliwości tego zakresu znaczne tłumienie wprowadza również sama warstwa E. Tak duże tłumienia fali jonosferycznej oraz fali powierzchniowej powoduje w zakresie 200...300 kHz znaczne ograniczenie zasięgu łączności. Sposób rozchodzenia się fal jonosferycznych w zakresie fal długich i bardzo długich jest inny od rozchodzenia się fal tego typu w innych zakresach częstotliwości. Fale długie jonosferyczne wnikają bardzo płytko do warstwy odbijającej D i najlepiej odbijają się one od dolnej części tej warstwy.

3. ROZCHODZENIE SIĘ FAL ŚREDNICH

Zakres częstotliwości fal średnich zawiera się w wartościach 300 - 3000 kHz (długość fali 1000 - 100 m), gdzie rozróżniamy:

- podstawowy podzakres fal średnich 300 - 1500 kHz,
- podzakres fal pośrednich 1500 - 3000 kHz.

Fale średnie posiadają odmienne warunki rozchodzenia się w dzień i w nocy:

- **w dzień** istnieje zasadniczo fala przyziemna, gdyż fala jonosferyczna podlega prawie pełnemu wytłumieniu;
- **w nocy** występuje jednocześnie fala przyziemna i jonosferyczna, co powoduje znaczne zaniki, zakłócenia i zniekształcenia.

Tłumienie fali przyziemnej w zakresie fal średnich rośnie wraz ze stosowaną częstotliwością pracy. Powoduje to, że zasięgi radiostacji średniofalowych rosną wraz z długością fali na której pracują.

Ze względu na wykorzystywanie w wojskowych systemach łączności tylko zakresu pośredniofalowego, dalsza uwaga będzie skupiona na tym podzakresie fal średnich.

Fale pośrednie obejmują zakres częstotliwości od 1500 do 3000 kHz (200 - 100 m).

Fale pośrednie odznaczają się jeszcze większym tłumieniem fali powierzchniowej niż fale średnie.

Fala jonosferyczna w tym podzakresie nie podlega tak silnemu tłumieniu jak w podzakresie fal średnich i łączność w dzień na znaczne odległości staje się możliwa. Warunki jonosferyczne łączności radiowej są więc korzystniejsze w podzakresie fal pośrednich niż fal średnich.

Fale pośrednie są podzakresem przejściowym od zakresu fal średnich, gdzie większość łączności odbywa się na fali powierzchniowej, do zakresu fal krótkich, gdzie w trafikach radiowych dominuje fala jonosferyczna.

W tym podzakresie właściwości rozchodzenia się fal średnich, wraz ze wzrostem stosowanej częstotliwości pracy, ustępują miejsca właściwościom propagacji fal KF.

Czynnikami decydującymi o tym, że fale pośrednie posiadają właściwości fal średnich lub krótkich są:

- częstotliwość pracy (bliskość zakresu fal średnich lub krótkich),
- stan jonosfery (możliwość odbijania fal dla łączności dalekich),
- rodzaj terenu (akweny morskie zwiększają zasięg fali powierzchniowej).

W omawianym podzakresie wykorzystuje się **łączność na fali powierzchniowej** (radiotelefonii morska, lądowa i radiofonia tropikalna) jak i **na fali jonosferycznej** (łączność dalekosiężna).

Fala powierzchniowa w tym podzakresie ulega silnemu tłumieniu (bardziej niż w zakresie fal średnich) szczególnie nad terenem o złej i dostatecznej przewodności, ograniczając zasięg od kilkudziesięciu do stu kilometrów (służba lądowa bliskiego zasięgu wykorzystująca taką propagację). Ten rodzaj fali przyziemnej zapewnia natomiast znaczny zasięg dla stacji morskich i nadbrzeżnych, gdyż woda pełni rolę pewnego rodzaju przewodnika dla fali przyziemnej. Zasięg przy mocach rzędu dziesiątek watów wynosi w tym przypadku nawet sto kilkadziesiąt kilometrów. Anteny do pracy na falach pośrednich mają niezbyt duże wymiary przy osiągniętej zadawalającej sprawności. Z tych powodów podzakres ten wykorzystywany jest w morskiej łączności ruchomej, jako uzupełnienie (do niedawna jako zasadniczy) środków UKF na pasmo 166 MHz.

Fala jonosferyczna wraz z rosnącą częstotliwością pracy staje się coraz bardziej przydatna do dalekich łączności, gdyż po przekroczeniu, tzw. częstotliwości rezonansu żyromagnetycznego (1000...1400 kHz) tłumienie tego typu fali zaczyna maleć. Umożliwia to dalekie łączności już na częstotliwościach rzędu 1,5 - 3 MHz, a więc na falach pośrednich. Fale jonosferyczne rzędu 2...4 MHz znajdują zastosowanie w radiokomunikacji wewnątrz krajowej, zapasowej łączności lotniczej, służbie ruchomej o zasięgu krajowym i radiofonii tropikalnej do łączności na odległość kilkuset kilometrów.

Absorpcja w warstwie E maleje nie tylko z częstotliwością, ale też z szerokością geograficzną. Dla szerokości umiarkowanych (Polska) przewaga fali jonosferycznej nad powierzchniową na lądzie występuje już na odległościach kilkudziesięciu kilometrów. Nad morzem fala powierzchniowa dominuje nawet na odległościach kilkuset km (stąd tak duży zasięg stacji radiotelefonicznych na statkach i kutrach). W nocy fala jonosferyczna o długości 100 - 200 metrów zaczyna wpływać na zasięg na znacznie mniejszych odległościach.

Fale pośrednie posiadają w nocy możliwość przechodzenia jako jonosferyczne przez warstwę E i odbijania się nawet od warstwy F2. Zapewnia to tej fali znacznie większy zasięg niż, gdyby odbijała się tylko od warstwy E. Zjawisko tego typu zachodzi tylko na najwyższych częstotliwościach tego podzakresu i nie jest to sytuacja charakterystyczna.

4. ROZCHODZENIE SIĘ FAL KRÓTKICH

4.1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PROPAGACJI FAL KRÓTKICH

Fale krótkie zawierają częstotliwości 3 – 30 MHz, co oznacza długość fal od 100 do 10 metrów.

1. Uwarunkowania propagacyjne

Według teorii istniejących w latach dwudziestych obecnego wieku uważano, że podstawą łączności radiowej jest łączność na fali powierzchniowej, która rozchodzi się przy powierzchni Ziemi. Zasięg jej miał rosnąć wraz ze wzrostem długości stosowanej fali oraz mocy nadajników. Uważano również, że jeśli fala ulegnie jakimkolwiek odbiciu, to tak się rozprasza, że jest niezdalna do dalszej propagacji.

Reasumując: o zasięgu łączności radiowej miała decydować tylko moc nadajników oraz długość stosowanej fali.

Dlatego też, zakres fal krótkich uważano za bezużyteczny. Sądzono, że fala powierzchniowa jest tutaj tak silnie tłumiona, iż nawet bardzo duże moce nadajnika zapewniają zasięg tylko do około stu kilkudziesięciu kilometrów. Nie sądzono, że fala może być tak skutecznie odbijana od jonosfery, iż zapewni łączność na wielkie odległości - większe niż na najdłuższych zakresach fal długich. Krótkofalowcy używając mocy rzędu dziesiątek watów, osiągnęli zasięgi takie, jak profesjonalne stacje o mocy kilkuset, a nawet tysiąc razy większej na falach dłuższych! Niedługo jednak radioamatorzy cieszyli się taką swobodą pracy na falach krótkich. Zakres fal krótkich szybko podzielono na bardzo wiele pasm dla różnych służb łączności. Na falach tych zrobiło się gwarno i tłoczno, chociaż był to najszerszy z wykorzystywanych wtedy zakresów.

Zaletą, jaką są małe moce potrzebne do łączności na falach KF, okupiona jest wielką kapryśnością propagacji czyli niestabilnością łączności. Mówimy tu często o prawdopodobieństwie łączności w danych warunkach propagacyjnych.

Warstwy jonosfery, które dzięki odbijaniu fal radiowych zapewniają duże zasięgi, podlegają częstym przemieszczeniom i zmianom swojej gęstości. Z tego też powodu posiadają one różną zdolność odbijania fal. Ta zdolność odbijania lub pochłaniania fal zmienia się w zależności **od pory dnia, doby, roku i okresu słonecznego**. Najczęściej, o istnieniu warstw odbijających decyduje obecność promieni słonecznych (oświetlenie danej półkuli), które powodują zwiększanie lub zmniejszanie gęstości elektronowej tych warstw.

2. Uwarunkowania techniczne:

a) Zmiana warunków rozchodzenia się fal w ciągu doby wymaga śledzenia informacji z sond jonosfery odnośnie aktualnie istniejących warunków łączności na danej trasie.

b) Aktywność różnych częstotliwości w różnych porach doby do zapewnienia ciągłości łączności, wymaga stosowania różnych pasm z zakresu KF.

c) Wielopasmowość radiostacji po stronie nadawczej wymaga stosowania sporych rozmiarów urządzeń dopasowujących anteny do częstotliwości pracy, często w zakresie 2 MHz - 22 MHz lub nawet 1,6 MHz - 27,5 MHz.

d) Trudny kompromis dobrania długości anteny mającej, wg. obliczeń zmieniać swoją długość od 200, 100 metrów do 10, a nawet 5 metrów (dla częstotliwości 3 - 30 MHz długość fali wynosi od 100 do 10 metrów).

e) Tak duży zasięg stacji nawet o małej mocy powoduje znaczne zagęszczenie słyszanych stacji na jednej częstotliwości, co wymaga stosowania anten kierunkowych w celu eliminacji sygnałów stacji niepożądanych, a pracujących w tym samym kanale częstotliwości.

f) Stosowanie specyficznych emisji umożliwiających skuteczną pracę w tak zagęszczonym eterze (szczególnie telefonia jednowstęgowa i telegrafia wąskopasmowa).

g) Rząd stosowanych mocy:

- w radiotelefonii i radiotelegrafii morskiej -	100 W - 2 kW,
- w łączności lotniczej dalekiego zasięgu -	200 W - 2 kW,
- w służbie stałej państwowej -	1 kW - 10 kW,
- w służbie ruchomej lądowej i morskiej -	100 W - 1kW,
- w radiofonii tropikalnej -	1 kW - 20 kW,
- w radiofonii krótkofalowej-	50 kW - 1 MW,
- w służbie amatorskiej -	10 W - 1 kW,
- radiolatarnie - wzorce częstotliwości	100 W - 10 kW.

4.2. FALE KRÓTKIE ZAKRESU 20 MHz - 30 MHz

Zakres częstotliwości 3 MHz - 20 MHz jest pierwotnym zakresem fal krótkich wykazującym najbardziej charakterystyczne cechy tej długości fal. Początkowo stosowano jako fale krótkie zakres do 16 - 20 MHz. Najbardziej rozbudowane radiostacje krótkofalowe od lat dwudziestych do pięćdziesiątych miały zakres do 18,5 MHz lub wyjątkowo do 20 MHz. Radiofonia, lotnictwo i służba morska pracowały zasadniczo na pasmach krótkofalowych do 18 MHz. Wszystkie częstotliwości powyżej tej wartości uważano za fale o właściwościach fal UKF. Z tego też powodu stacje radiotelefoniczne UKF pracowały już od 20 MHz (np. radiostacja A7B, R-108). Dopiero przełom lat czterdziestych i pięćdziesiątych wpłynął na rzeczywisty rozwój i określenie fal powyżej 15 metrów. Stwierdzono, że **fale o długości 15 m - 10 m posiadają rzeczywiście specyficzne cechy. Są nimi:**

a) rzadsza aktywność podzakresu do łączności dalekosiężnej.

Bywają całe tygodnie, a nawet miesiące niczym niezmaconej ciszy w eterze. Dlatego też, tak długo nie zauważano w tym podzakresie cech propagacji jonosferycznej i przypisywano jego do pasm UKF, a szczególnie w okresach małej aktywności słonecznej;

b) przy „otwarcu” pasm tego podzakresu do łączności dalekosiężnej moce potrzebne dla łączności jonosferycznych są bardzo małe, rzędu nawet pojedynczych watów;

c) „wyścig mocy” nadajników nie ma tutaj sensu, gdyż zwiększenie i tak dużego zasięgu następuje widocznie dopiero przy niemal stukrotnym zwiększeniu mocy. Jest to więc „bardzo demokratyczny” podzakres, gdzie z tak samo silnym sygnałem pracują stacje o mocy kilku, jak i kilkudziesięciu, a nawet stu watów;

d) bardzo dobre właściwości dla łączności na fali przestrzennej

Występuje tutaj mniejszy niż w podzakresie do 20 MHz poziom zakłóceń od sygnałów jonosferycznych, ponieważ propagacja przez odbicie od warstw jonosfery nie występuje tak często - szczególnie w okresach małej aktywności słonecznej, a szeroki podzakres mieści prawie tyle samo stacji, co zasadniczy zakres fal krótkich;

d) stosunkowo duży zasięg na fali przyziemnej - większy niż na UKF, gdyż fale rzędu 15 - 10 metrów są mniej podatne na oddziaływanie przeszkód terenowych.

4.3. PROPAGACJA PRZYZIEMNA FAL KRÓTKICH

Zasadniczą cechą radiokomunikacji na falach krótkich jest łączność dalekosiężna na fali jonosferycznej. Z tego powodu łączność na fali przyziemnej jest w tym zakresie drugorzędna i należy się liczyć z dużymi zakłóceniami od stacji dalekosiężnych. Innym istotnym czynnikiem negatywnym dla łączności na fali przyziemnej jest duże tłumienie (większe niż na falach dłuższych) i znaczne szumy atmosferyczne.

Fala przyziemna jest stosowana na obu przeciwnych krańcach zakresu KF, które różnią się od siebie wieloma właściwościami.

1. Podzakres 3 - 5 MHz charakteryzuje się:

- a) **dużym, a z rosnącą częstotliwością coraz większym, tłumieniem fali przyziemnej** ograniczającym zasięg na tego typu fali nad lądem do 100 km na częstotliwości około 3 MHz i 45 - 75 km na 5 MHz bez większego wpływu użytej tutaj mocy nadajnika;
- b) **dużym poziomem szumów i zakłóceń atmosferycznych** spadający wraz z rosnącą częstotliwością;
- c) **dużym poziomem zakłóceń od stacji dalekosiężnych**, szczególnie w okresie od 2 - 3 godzin przed zachodem do 2 - 3 godzin po wschodzie słońca (zimą możliwość stałych, tego typu, zakłóceń w porze dziennej). Zjawisko zachodzi najczęściej w pasmach radiofonicznych, morskich i amatorskich, np. 3,2 - 3,25 MHz / 3,6 - 3,8 MHz / 3,95- 4,0 MHz / 4,25 - 4,5 MHz / 4,75 - 5,1 MHz itp.;
- d) **największym zasięgiem fali przyziemnej osiąganym nad morzem**, gdzie w łączności radiotelefonicznej ze statkami są to odległości rzędu setek kilometrów. Oczywiście, zasięg fali przyziemnej nad morzem maleje wraz ze wzrostem częstotliwości pracy w tym podzakresie.

Przy większych częstotliwościach zasięg fali przyziemnej dalej się zmniejsza i wynosi około 35 - 50 km dla pasma 7 - 8,5 MHz i do około 10 - 25 km dla pasma 11,5 - 14,5 MHz.

2. Podzakres 20 - 30 MHz charakteryzuje się:

- a) **mniejszym tłumieniem fali przyziemnej przez ziemię niż w najniższym zakresie KF;**
- b) **możliwością zwiększenia zasięgu przez podniesienie wysokości zainstalowania anteny**, tzw. zasięg horyzontowy (optyczny) z wykorzystaniem fali przyziemnej - przestrzennej;
- c) **małą ilością zakłóceń od stacji jonosferycznych, dalekosiężnych**, gdyż rzadziej występują tutaj warunki propagacji jonosferycznej i jeżeli ona jest, to można łatwo określić pasma zakłócone przez nie, tzn. pasma radiofoniczne, morskie, meteorologiczne i amatorskie: 21,0 - 22,5 MHz / 25,8 - 26,15 MHz / 26,9 - 27,5 MHz / 28,2 - 28,6 MHz;

d) występowaniem zakłóceń typu przemysłowego (tak charakterystyczne już dla UKF), np. iskrzenia na najwyższych częstotliwościach zakresu KF;

e) występowaniem problematycznych zakłóceń, nie tych w postaci szumów atmosferycznych, ale w postaci szumów kosmicznych, półprzewodników oraz lamp na wejściu odbiorników, które znacznie ograniczają zasięg po stronie odbiorczej - szczególnie w urządzeniach starszego typu;

f) intensywnym wykorzystywaniem jego w latach czterdziestych i pięćdziesiątych do łączności radiotelefonicznej, jako części zakresu do łączności na fali przyziemnej (20 MHz - 40 MHz, następnie przeniesionej na zakres 30 MHz - 47 MHz, choć nie całkowicie);

g) zasięgiem na fali przyziemnej spadającym wraz z rosnącą częstotliwością, chociaż nie tak znacznie. Dla mocy rzędu:

- 1,5 kW zasięg na tych falach i w tym podzakresie jest rzędu 100 - 150 km, oczywiście przy założeniu, że nie pracuje na tej częstotliwości stacja jonosferyczna.
- 50 - 75 W zasięg wynosi do 50 - 70 km;
- 20 W około 20 km.

4.4. PROPAGACJA JONOSFERYCZNA FAL KRÓTKICH

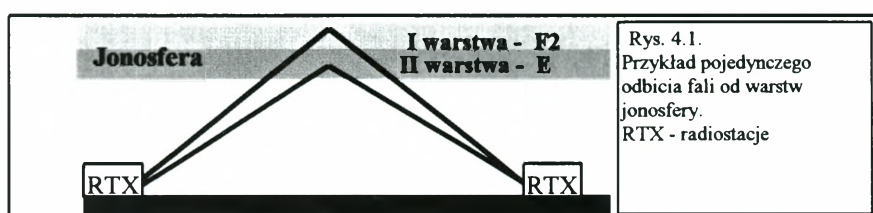
Podstawowym sposobem rozchodzenia się fal krótkich jest propagacja jonosferyczna dzięki refrakcji (uginaniu) fali radiowej w tej warstwie atmosfery.

Rozróżniamy następujące sposoby propagacji jonosferycznej na falach krótkich:

1. Rozchodzenie się poprzez pojedyncze odbicie od ionosfery

Odbicie zachodzi od jednej z warstw jonosfery: E, F1, F2 lub E_s (warstwy występującej wyjątkowo sporadycznie).

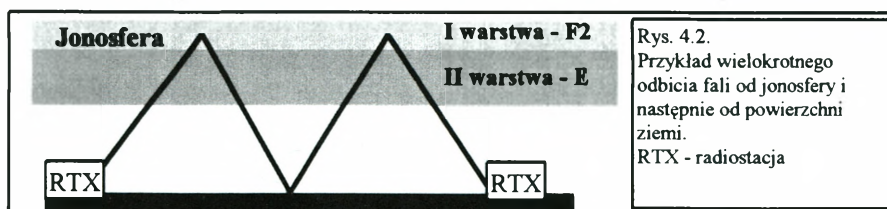
Przy odbiciu fal od warstwy F1 lub F2 podlegają one, wraz z rosnącą częstotliwością, znacznemu i rosnącemu tłumieniu w warstwie E.



Warstwa zjonizowana, oprócz odbijania fal, pochłania również w różnym stopniu część ich energii. Z tego też względu fala jonosferyczna ulega zawsze osłabieniu, nawet przy jej odbijaniu.

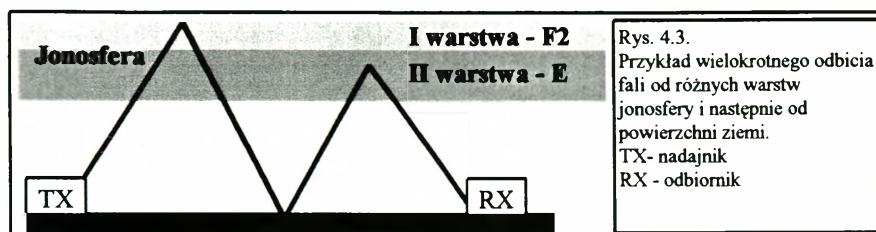
2. Rozchodzenie się poprzez wielokrotne odbicie od ionosfery i następnie od ziemi (propagacja wieloskokowa)

Odbicie odbywa się najpierw od warstwy jonosfery F1, F2 lub E i następnie, dzięki znacznej jeszcze energii, od powierzchni Ziemi. Cykl ten powtarza się nawet wielokrotnie. Dzięki takiemu zjawisku fala może pokonywać odległości większe od pojedynczego skoku, osiągając często dystans wielu tysięcy, a nawet dziesiątek tysięcy kilometrów okrążając Ziemię wielokrotnie! Zasięg takiej fali zależy od tłumienia przez warstwę E i powierzchnię Ziemi. Odbicia wielokrotne mogą odbywać się za każdym razem od tej samej lub od różnych warstw jonosfery.



Propagacja wieloskokowa związana jest ze znacznymi stratami energii przy odbiciach od powierzchni ziemi i podczas wielokrotnych przejść przez niższe warstwy jonosfery (szczególnie E).

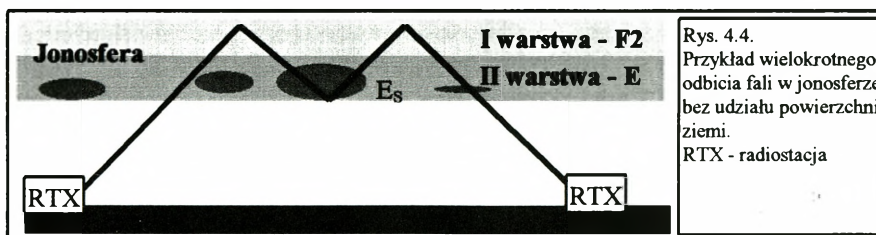
3. Propagacja poprzez wielokrotne odbicie od różnych warstw jonosfery i od ziemi



Rozchodzenie fali w tym przypadku odbywa się poprzez odbicie od jednej warstwy jonosfery, potem od powierzchni Ziemi, a następnie od innej warstwy jonosfery niż poprzednio. Takie zjawisko może odbywać się wielokrotnie, zapewniając znacznie większe zasięgi niż przy propagacji poprzez pojedynczy skok fali. Propagacja ta różni się od zjawiska poprzedniego - gdy fala podlegała odbiciom wielokrotnie od tej samej warstwy jonosfery - tym, iż zapewnia mniej stabilny sygnał i stosunkowo mniejszy zasięg. Znaczna niestałość sygnału wynika z bardzo różnej właściwości odbijania fali przez różne warstwy jonosfery.

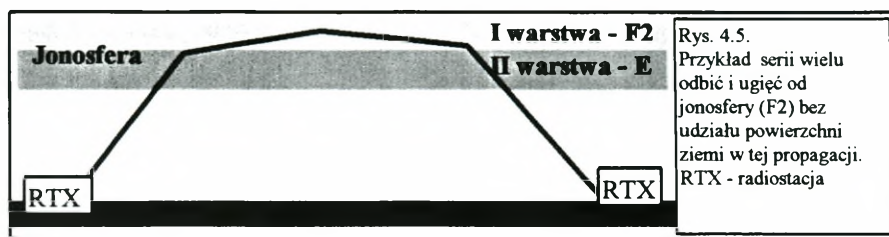
4. Propagacja wieloskokowa - wielokrotna bez pośrednictwa ziemi

Fala po wypromieniowaniu odbija się od warstwy wyższej jonosfery, np. F2 i wędruje do E, gdzie ulega ponownemu odbiciu w stronę warstwy wyższej F2. Po ponownym odbiciu wraca ona na Ziemię (może dalej wędrować, jeśli starczy jej energii do dalszych odbić).



5. Propagacja bez odbić od powierzchni ziemi

Tego rodzaju propagacja polega na odbijaniu się fali od dolnej części warstwy F2 pod takim kątem, że staje się możliwe dalsze odbijanie jej od dolnej części tej samej warstwy, aż do takiego zniekształcenia kąta odbicia, że fala ostatecznie powraca na Ziemię. Warunkiem zaistnienia tego typu zjawiska jest kąt padania na warstwę F2 mniejszy od kąta odbicia od jej dolnej części i następnie, powtarzający się już cały czas, ten sam kąt odbicia i padania od warstwy F2. Taka refrakcja (załamanie) może odbyć się kilka lub kilkanaście razy zapewniając daleki zasięg, ze znacznie mniejszymi stratami niż odbicie wielokrotne między jonosferą a Ziemią. Opisywane zjawisko zachodzi między innymi dzięki krzywiznie Ziemi.

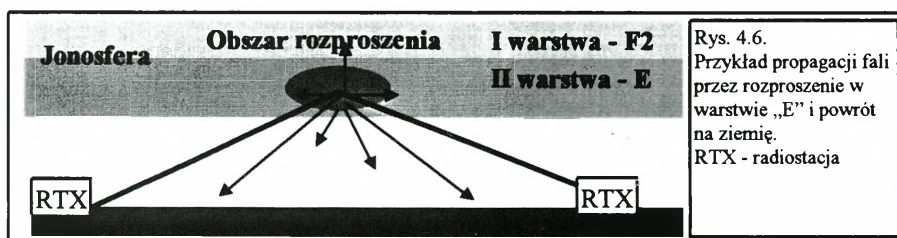


Propagacja dalekosiężna, bez pośrednictwa powierzchni ziemi, możliwa jest na większych częstotliwościach KF.

Ze względu na zachodzenie tego typu propagacji dla większych częstotliwości, fala taka jest mniej tłumiona.

Siła sygnału fali w propagacji bez udziału powierzchni ziemi jest większa od siły sygnału fali w propagacji wieloskokowej za pośrednictwem ziemi. Wynika to z silnego tłumienia przez ziemię, nawet jeśli odbija ona fale radiowe.

6. Propagacja za pośrednictwem rozprożeń fali w warstwie „E”

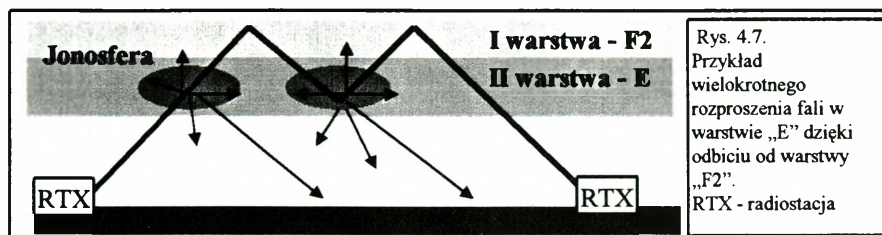


Jest to zjawisko polegające nie na odbiciu fali, a na jej rozproszeniu od niższej warstwy E. Skutkiem rozproszenia występuje powrót znacznie rozproszonej fali na ziemię, a więc znacznie słabszej i nie ulegającej już ponownemu odbiciu od powierzchni ziemi. Zasięg, przy tym rodzaju propagacji, jest równy jednemu skokowi fali do wysokości warstwy E (a więc mniejszy niż dla warstwy F, ponieważ mniejsza jest wysokość zalegania warstwy E). Sygnał powracający na ziemię jest o stosunkowo małej sile, gdyż z powodu rozproszenia jest to tylko nieznaczna część wypromieniowanej wartości energii. Zasięgi rzędu 2000 - 3500 km wymagają stosowania bardzo dużych mocy.

7. Propagacja za pośrednictwem rozprożeń w warstwie „E” i odbicia w „F2”

Ten rodzaj propagacji występuje, gdy wypromieniowana fala odbije się do warstwy F2 i powracając ulegnie rozproszeniu w warstwie E tak, że ponownie (oczywiście, niewielka część - choć wystarczająca) odbije się znów od F2 i powróci na ziemię. W tego typu propagacji, przy zasięgu rzędu dwóch do trzech skoków fali jonosferycznej, sygnał jest stosunkowo słaby, gdyż jest już po dwóch odbiciach i, co najistotniejsze, po jednym

rozproszeniu. Łączność na odległość 2500 - 4000 km możliwa jest przy stosowaniu dużych mocy i bardzo czułych odbiorników (anteny wieloelementowe, kierunkowe).

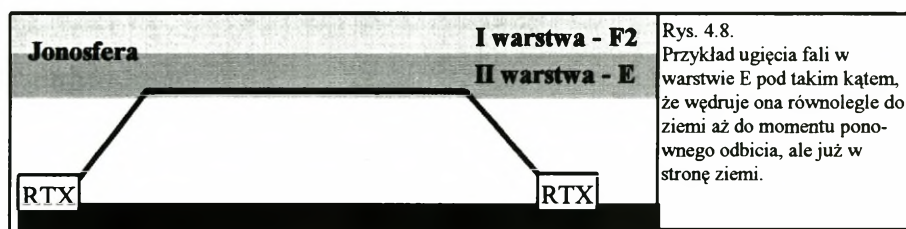


Rys. 4.7.
Przykład wielokrotnego rozproszenia fali w warstwie „E” dzięki odbiciu od warstwy „F2”.
RTX - radiostacja

Fale ulegają, prawie zawsze, częściowemu rozproszeniu w warstwie E, zarówno podczas przechodzenia do wyższych warstw jak i powrotu w kierunku ziemi.

8. Propagacja za pośrednictwem szczególnego ugięcia w warstwie „E”

Propagacja tego typu polega na specyficznym ugięciu fali w warstwie E i powrotowi jej na ziemię na odległość większą od pojedynczego skoku fali do tej warstwy. Zasięg jest wtedy rzędu 2000 - 3000 km, przy średnich mocach i stosunkowo silnym sygnale. W propagacji tej mogą wystąpić częściowe zniekształcenia odbieranego sygnału.



Rys. 4.8.
Przykład ugięcia fali w warstwie E pod takim kątem, że wędruje ona równoległe do ziemi aż do momentu ponownego odbicia, ale już w stronę ziemi.

Im częstotliwość pracy jest wyższa, tym tłumienie fali jest mniejsze. Pracując w paśmie 28 MHz sygnał będzie czterokrotnie mniej tłumiony niż w paśmie 14 MHz. Inaczej mówiąc: siła sygnału będzie czterokrotnie większa (lub potrzebna moc cztery razy mniejsza) w paśmie 10 m niż w paśmie 20 m!

4.5. ZASADY PROPAGACJI JONOSFERYCZNEJ FAL KRÓTKICH

Głównymi zasadami rządzącymi propagacją jonosferyczną KF są:

- a) Możliwość propagacji jonosferycznej zależy od stanu jonosfery. Warunki dla niej mogą istnieć w całym zakresie 3 - 30 MHz, a nawet do 50-60 MHz.
- b) Absorpcja decyduje o poziomie natężenia pola (sile sygnału) fali odbitej. Nie jest ona tak silna w zakresie KF, jak w zakresie fal średnich i pośrednich (chyba, że wypromieniujemy falę o częstotliwości krytycznej pionowo w górę). Absorpcja KF w nocy jest bardzo mała i w niewielkim stopniu zależy od częstotliwości, gdyż warstwa D w nocy zanika, zaś gęstość elektronowa w E maleje. Największa absorpcja występuje w warstwie D, a następnie w E.
- c) Od warstwy E w dzień odbijają się fale o mniejszych częstotliwościach zakresu KF (3 - 8 MHz) na wszystkich trasach oraz o średnich częstotliwościach (6 -13 MHz) na trasach dłuższych.**
- d) Od warstwy F2 w dzień odbijają się fale o średnich częstotliwościach KF (6 -13 MHz) na trasach o długościach krotnych i fale o większych częstotliwościach (13 - 23 MHz) na wszystkich trasach.**
- e) Od warstwy F2 w porze nocnej odbijają się najdłuższe fale na dalekich trasach oraz fale o małych i średnich częstotliwościach zakresu KF (3 - 13 MHz), jeśli tylko w ogóle odbicie może nastąpić.**
- f) Fale o większych częstotliwościach zakresu KF (16 - 25 MHz) nie mogą w porze nocnej w ogóle rozchodzić się poprzez jonosferę, zaś fale o średnich częstotliwościach (8 - 15 MHz) korzystają z tej propagacji tylko na długich trasach.
- g) W okresach małej aktywności słonecznej, gdy gęstość elektronowa warstwy F obniża się, możliwości propagacji większych i średnich częstotliwości KF (15 - 30 MHz) ulegają ograniczeniu. Zmniejsza się wtedy możliwość wyboru częstotliwości. W okresie tym większość nadawań skupia się na mniejszych częstotliwościach, zwłaszcza w nocy, na skutek czego wzrasta prawdopodobieństwo wzajemnych zakłóceń interferencyjnych.
- h) Dobór częstotliwości roboczej do pracy w nocy nie jest tak krytyczny jak do pracy w dzień. W dzień należy częstotliwość tak dobrać, aby były zapewnione warunki odbioru od jonosfery i żeby fale doznawały jak najmniejszej absorpcji. Obniżenie częstotliwości, w pewnym granicach, nie wpływa zasadniczo na pogorszenie jakości łączności.
- i) Na trasach dalekosiężnych niepołudnikowych występują zazwyczaj w części trasy warunki nocne, a w części warunki dzienne. Zjawisko to zależy od tzw. SID -ów.

4.6. MAKSYMALNA CZĘSTOTLIWOŚĆ UŻYTKOWA - MUF

MUF - maksymalna częstotliwość użytkowa (ang. - Maximum Usable Frequency)

1. Właściwości MUF

Jest to częstotliwość maksymalna, przy której, przy określonym kącie wypromieniowania nastąpi jeszcze odbicie fali od danej warstwy jonosfery, np. F2 - MUF lub E - MUF.

MUF jest to taka maksymalna częstotliwość, przy której nastąpi jeszcze łączność na danej trasie bez względu na inne warstwy i sposób propagacji.

Dla propagacji jednoskokowej, MUF jest częstotliwością graniczną warstwy.

Dla zabezpieczenia pewnej łączności KF, dobieramy częstotliwość pracy bliską MUF, lecz nie przekraczającą jej. Wraz ze wzrostem częstotliwości, aż do przekroczenia wartości MUF, łączność nie ulegnie zerwaniu, ale tylko pogorszeniu (osłabieniu) do wartości przewyższającej znacznie częstotliwość MUF. Dzieje się to dzięki **rozproszeniu**, które pozwala na łączność na częstotliwościach większych o **20 - 40 % od MUF**. Z tego względu rozróżniamy dwa rodzaje wartości MUF:

- **MUF klasyczna** wynikająca z obliczeń (największe prawdopodobieństwo łączności),
- **MUF robocza** (optymalna) przekraczająca klasyczną o 20 - 40 %, istniejąca dzięki rozproszeniu w jonosferze.

Natężenie pola MUF roboczej jest zazwyczaj mniejsze od natężenia pola MUF klasycznej, gdyż tylko część energii trafia na ziemię po rozproszeniu w jonosferze. Natężenie pola MUF roboczej nie spada tak bardzo wraz z rosnącą różnicą częstotliwości, jakby to wynikało z obliczeń i przypuszczeń. Należy pamiętać o tym, że wraz z rosnącą częstotliwością spada tłumienie fali jonosferycznej KF. Rekompensuje to, choć w części, spadek natężenia sygnału MUF roboczej spowodowany rozproszeniem.

W sytuacjach, gdy jest to propagacja bez odbić pośredniczących od ziemi, bywa tak, że częstotliwości na których odbywa się łączność, mają dwukrotną wartość MUF klasycznej.

Dla częstotliwości większych o połowę od MUF klasycznej, prawdopodobieństwo uzyskania łączności jest rzędu 60 - 70 % dzięki znacznemu zmniejszeniu absorpcji i założeniu, że są to przypadki bez odbić pośrednich od ziemi.

Wyróżniamy trzy zasadnicze rodzaje MUF:

- **znormalizowane - klasyczne**, obliczona w oparciu o odpowiednie krzywe;
- **doświadczalne**,
- **teoretyczne, oparte o analizę teoretyczną.**

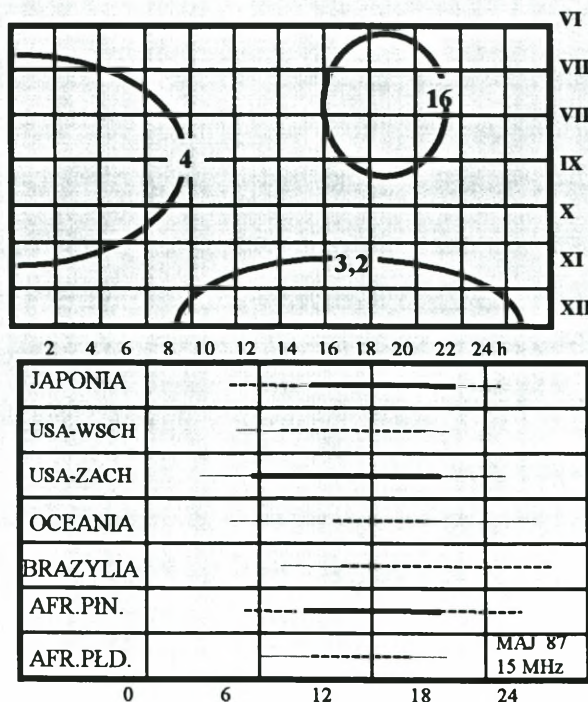
2. Mapy dotyczące MUF

Dla określenia warunków propagacji jonosferycznej, publikuje się mapy przewidywanych częstotliwości krytycznych i MUF obliczonych dla znormalizowanych odległości $D = 4000$ km oraz wykresy dla określenia MUF dla dowolnej odległości.

Wyróżniamy dwa podstawowe rodzaje map prognostycznych:

a) - "Instytutu Magnetyzmu Ziemi, Jonosfery i Rozchodzenia się Fal" (IZMIRAN), które opracowywane są nawet na cały rok (większy okres przewidywania, ale przez to większa dopuszczalna niedokładność obliczonych częstotliwości). Składają się z kart rozkładu czasowego MUF dla F2, dla kilku długości tras i pasów równoleżnikowych, co 10 stopni z podziałem na części (wschód - zachód). Oblicza się je na podstawie kart odpowiednio dobranych dla danej strefy i określonej MUF, dla danego czasu (miesiąca i godziny). Ostateczne wartości MUF uzyskuje się przez interpolację wartości określonych z dwóch kart dla najbliższych potrzebnych długości tras.

b) - "Institute for Telecommunications Sciences and Astronomy (ESSA), które opracowywane są na jeden oraz trzy miesiące wcześniej (mniejszy okres przewidywania - przez to większa dokładność) i składają się z mapy rozkładu F2 - 0 - MUF, rozkładu F2 - 4000 - MUF, rozkładu E - 2000 MUF, mapy rozkładu średniej wartości najwyższej częstotliwości fal odbijanych przez Es oraz mapy rozkładu prawdopodobieństwa odbić sporadycznych.



VI Rys.4.9.
VII Przykład zastosowania prognozy
VIII wielomiesięcznej dla
IX wielu pasm krótkofalowych dla
X przebiegu całodobowego.
XI Przedstawia ona pasma KF
XII najbardziej odpowiednie do pracy
w ciągu określonego miesiąca.
X Wykonuje się je dla jednej
konkretnej trasy (odległości i
XI kierunku). Stosowana są w
profesjonalnych analizach.

Rys.4.10
Przykład zastosowania prognozy
jednomiesięcznej i
jednopasmowej. Służy ona do
określenia pory doby do pracy w
konkretnym kierunku na
wybranym paśmie. Wykonywana
jest dla jednego określonego
pasma i miesiąca.
Wykorzystywana przez amatorów
krótkofalowców, np. publikowana
była w „Radio” i
„Radioamatorze”.

4.7. OPTYMALNA CZĘSTOTLIWOŚĆ UŻYTKOWA - FOT

FOT - optymalna częstotliwość łączności (ang. - Frequency Optimum de Traffic)

1. Właściwości FOT

Jest to optymalna częstotliwość pracy, przy której prawdopodobieństwo przeprowadzenia łączności będzie jak największe, większe niż przy pracy na MUF.

Gęstość elektronowa warstw jonosfery podlega ciągłym zmianom oraz fluktuacjom (przemieszczeniom) i z tego powodu warunki propagacji dla MUF, z założenia bliskiego wartościom krytycznym, mogą ulegać pogorszeniom uniemożliwiającym łączność (np. z powodu charakterystycznych dla MUF zaników granicznych). Dlatego przezornie powinno pracować się na częstotliwościach trochę mniejszych od MUF w celu uniknięcia zaników granicznych. Ten bezpieczny zapas częstotliwości daje właśnie FOT.

2. Relacja między MUF a FOT

Jeżeli prawdopodobieństwo łączności na MUF wynosi 50 % to praca na FOT daje 90% czasu, w którym jest łączność. Innymi słowy: częstotliwość, przy której przez 90% czasu pracy mamy łączność na KF nazywamy częstotliwością optymalną, tzn. FOT.

Dla pracy za pomocą warstwy E praktycznie wystarczy zmniejszyć o 3 % MUF, aby uzyskać 90 % pewności pracy. Dla pracy na F2, która zmienia się częściej (jest wyżej i podlega większym wpływom słońca), wobec jej kapryśności, przyjęto nawet 15 % marginesu bezpieczeństwa, tzn. FOT jest mniejsza o tyle od MUF.

Reasumując:

a) dla warstwy E : $FOT = 0,97 MUF$,

b) dla warstwy F2 : $FOT = 0,85 MUF$,

Zdarzają się często takie warunki, że występuje propagacja na częstotliwościach większych od MUF i okazuje się korzystniejszą praca na częstotliwościach większych od FOT i w pobliżu MUF.

Obniżanie częstotliwości poniżej FOT jest niekorzystne, gdyż tłumienie fali rośnie wraz z jej długością.

Operując wartościami FOT i MUF należy mieć na względzie wymagany poziom sygnału dla określonej emisji i rodzaju pracy.

4.8. NAJNIŻSZA CZĘSTOTLIWOŚĆ UŻYTKOWA - LUF

LUF- najniższa częstotliwość użytkowa (ang. - Lowest Usable Frequency)

1. Właściwości LUF

Wartość LUF powinna zapewnić wymagany poziom odbieranego sygnału. Jest więc ona kompromisem między najniższą możliwą do pracy częstotliwością, a poziomem mocy nadajnika wystarczającej do zapewnienia dostatecznego odbioru dla korespondenta.

Z coraz mniejszą częstotliwością pracy rośnie tłumienie promieniowanej fali, które możemy rekompensować, do pewnych granic, stosowaną coraz większą mocą nadajnika.

Im moc jest większa, tym LUF może być niższa. Wynika z tego to, że LUF zależy, przede wszystkim, od stosowanej mocy nadajnika.

2. Relacja między MUF, LUF i FOT

Zaletą LUF jest to, że zapewnia stabilniejsze warunki pracy od MUF i FOT. Wynika to z tego, że zależy ona od stanu warstwy E, która posiada mniej kapryśne warunki propagacji niż wyższe, bardziej zależne od operacji słonecznych - F1 i F2. Dlatego:

- **czym częstotliwość pracy jest bliższa LUF, tym bardziej praca odbywa się stabilnie i wymaga mniejszej ilości dysponowanych częstotliwości nadawania,**
- **czym częstotliwość pracy jest bliższa LUF, tym mniej w ciągu doby zmienia się jej wartość (występuje mniejsza ilość przestrojeń radiostacji).**

Z zasady powinno wybierać się częstotliwości pracy między FOT a LUF, gdyż:

- **FOT zapewnia stosowanie mniejszej mocy przy większym zasięgu, ale i przy większych wahaniach poziomu sygnału;**
- **LUF zapewnia stałość warunków pracy przy stosowaniu dużych mocy i mniejszych zasięgach.**

LUF jest częstotliwością, na której natężenie pola sygnału niezbędnego dla zadowalającego odbioru zależy od poziomu szumów w miejscu odbioru i rodzaju nadawanego sygnału, np. stosunek sygnał / szum winien wynosić dla CW - 3/1, SSB - 7/1 i AM -15/1.

Poniżej wartości LUF odbiór sygnałów jest niemożliwy, gdyż giną one w szumach. Wraz ze wzrostem częstotliwości pracy jakość odbioru polepsza się osiągając optimum przy wartości MUF.

Między MUF a LUF znajduje się zakres częstotliwości, na których możliwa jest łączność. Górna granica tego podzakresu - MUF, jest określona przez gęstość elektronów w punkcie odbioru, dolna natomiast - LUF, określona jest przez absorpcję jonosfery na drodze fali oraz poziomem szumów w punkcie odbioru.

3. Praktyczne wykorzystanie LUF

a) W radiokomunikacji stosuje się 2, 3, lub 4 częstotliwości pracy w ciągu doby. Są to najczęściej częstotliwości: **dzienna, nocna oraz przejściowa**:

- dla tras krótkich wystarczy 1 dzienna + 1 nocna,
- dla tras średnich potrzebne są po dwie nocne i dzienne,
- dla tras dalekich, przechodzących przez strefę dnia i nocy wymagane są trzy dzienne, dwie nocne i 1 lub 2 przejściowe;

b) W planowaniu całorocznym wymagane są trzy zestawy częstotliwości:

- do pracy w zimie,
- do pracy latem,
- do pracy w okresie bliskim równonocy - wiosną i jesienią.

Można rozróżnić również cztery zestawy, gdzie każdy odpowiada jednej porze roku.

c) Wykorzystanie w systemach radiodifuzyjnych - średnio i krótkofalowych

W zakresie KF w radiodifuzji występują częste przestrajania, choć w odstępach czasu będących wielokrotnością godziny (o ile przewiduje się na to przerwy).

Każdorazowo dobiera się częstotliwości robocze bliskie FOT.

Stosowana jest wielopasmowość, tzn. nadawanie równocześnie przez kilka nadajników naraz, w różnych podzakresach KF, dobranych według możliwości w takiej kolejności, aby istniał:

- podzakres, gdzie częstotliwość jest najbliższa FOT;
- jeden podzakres w dół i w górę,
- podzakres, gdzie częstotliwość jest najbliższa MUF;
- podzakres, gdzie częstotliwość jest większa od MUF (jest między MUF klasyczną i

MUF roboczą);

- podzakres, gdzie fala rozchodzi się wieloskokowo.

Oczywiście, ilość kanałów równoczesnego nadawania determinowana jest możliwościami:

- technicznymi (ilość nadajników),
- administracyjnymi (ilość przydzielonych częstotliwości na podstawie międzynarodowych umów i krajowych ustaleń)
- ekonomicznymi (przede wszystkim koszty energii elektrycznej spożytkowanej na emisję radiową).

4.9. OBLICZENIA MUF, LUF i FOT

1. Omówienie ogólne prognoz pogody

Podstawą do obliczenia MUF, LUF, FOT są prognozy jonosferyczne.

Najczęściej prognozy wykonuje się na okres trzech miesięcy dla regionów lub nawet pojedynczych krajów. Różnice w obliczonych MUF w wielu prognozach wynikają z założenia niejednakowych wartości liczby Wolfa dla danych obliczeń.

Przez niektóre kraje opracowywane są prognozy całoroczne, ale są one dla poszczególnych miesięcy mniej dokładne niż trzymiesięczne (czym dłuższy czas przewidywania warunków propagacyjnych, tym mniejsza dokładność analizy).

Dla zwiększenia dokładności prognoz rocznych, dla danego miesiąca przyjmuje się, np. trzy wartości MUF wynikające z założenia trzech różnych, najbardziej prawdopodobnych dla obliczeń, wartości liczby Wolfa.

Rozróżniamy dwa podstawowe rodzaje prognoz propagacji.

2. Prognoza rosyjska - IZMIRAN

Są to prognozy roczne, ogłaszane przez "Instytut Magnetyzmu Ziemi, Jonosfery i Rozchodzenia się fal" zwany w skrócie IZMIRAN.

a) Prognozy rosyjskie są podawane:

- jako roczne dla F2 (wartości MUF - F2 bardzo przybliżone),
- jako miesięczne,
- jako uniwersalne krzywe MUF dla pełnego cyklu aktywności słońca,
- jako uniwersalne krzywe uskoku.

b) Prognozy takie składają się z szeregu kart rozkładu wartości MUF, które opracowywane są:

- w zależności od czasu (co godzinę przez dobę),
- dla kilku charakterystycznych tras (najczęstszego użytkowania),
- dla pasów równoleżnikowych - co 10 stopni,
- dla dwóch oddzielnie rozpatrywanych obszarów: wschód i zachód.

c) Sposób wykorzystania

Dla obliczenia MUF wybiera się odpowiednio najbliższe, wymaganym danym, dwie karty (w zależności od miesiąca, godziny, położenia stacji w odpowiednim pasie i obszarze), jak również dokonujemy ich nałożenia, wybierając wartości średnie z tych dwóch kart.

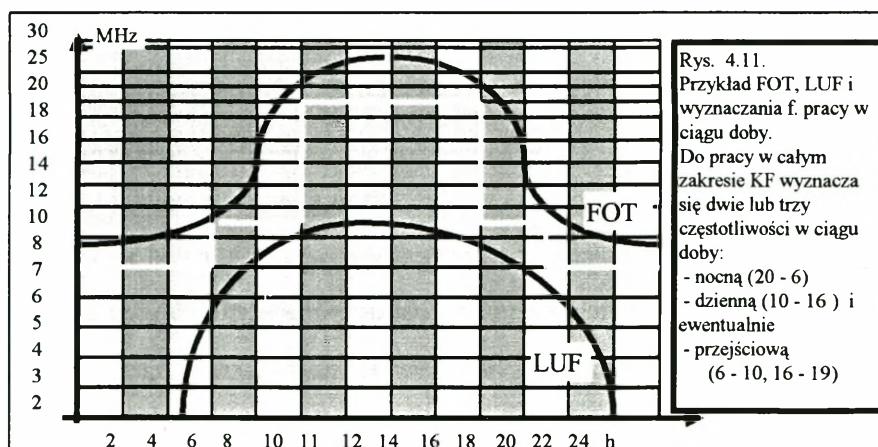
3. Prognoza amerykańska

Jest to prognoza podawana:

- jako dokładna każdego miesiąca,
- przybliżona, co trzy miesiące.

Prognoza tego typu składa się z:

- ogólnego omówienia,
- mapy rozkładu F2 - 0 - MUF - rozkład MUF przy odbiciu od warstwy F2 i dla odległości 0 km (zwana częstotliwością krytyczną),
- mapy rozkładu F2 - 4000 - MUF - rozkład wartości MUF przy odbiciu od warstwy F2 dla odległości 4000 km (jako maksymalna odległość jednego skoku fali jonosferycznej),
- mapy rozkładu E - 2000 - MUF - rozkład wartości MUF przy odbiciu od warstwy E dla odległości 2000 km w zależności od lokalnego czasu i położenia (szerokości),
- mapy rozkładu średniej wartości częstotliwości warstwy E sporadycznej,
- mapy rozkładu częstotliwości dla odbić sporadycznych warstwy E dla trzech obszarów (W - zachód, I - pośredni, E - wschód);
- mapy rozkładu prawdopodobieństwa odbić sporadycznych, które określają prawdopodobieństwo odbicia od warstwy E dla $f > 15$ MHz,
- siatki ortodromowej - do wykreślenia ortodromy dla określonej trasy i jej długości,
- mapy przynależności krajów i obszarów do jednej ze stref: W, E i I;
- karty do obliczeń dla tras mniejszych od 4000 km (trasa jednoskokowa) dla FOT i MUF,
- karty do obliczeń tras większych od 4000 km (propagacja wieloskokowa) dla FOT i MUF,
- nomogramów pomocniczych w przechodzeniu od odnalezionych wartości F2 - 0 MUF, F2 - 4000 - MUF, E - 2000 MUF i częstotliwości dla Es na ostateczne wartości E, F2, Es odpowiadające długości trasy.



4.10. ZJAWISKO STREFY MARTWEJ

Strefa martwa jest jedną z najkłopotliwszych cech propagacji jonosferycznej krótkofalowej.

Polega ona na powstawaniu obszaru, do którego:

- nie dociera już sygnał od stacji nadawczej na fali przyziemnej,
- nie dociera jeszcze sygnał na fali jonosferycznej.

1. Cechy charakterystyczne

Wykazano wcześniej, że wraz ze wzrostem częstotliwości pracy KF:

- fala jonosferyczna odbija się od wyższych warstw jonosfery i tym samym skok jej zwiększa się;
- zasięg fali przyziemnej zmniejsza się.

Oba powyższe czynniki powodują to, że wraz ze wzrostem częstotliwości rośnie obszar strefy martwej.

Wraz ze wzrostem częstotliwości pracy KF również zwiększa się czas trwania tego zjawiska. **Strefa martwa częściej występuje :**

- **w dzień** - na wyższych częstotliwościach i na większym obszarze,
- **w nocy** - na niższych częstotliwościach i na mniejszym obszarze.

2. Uwarunkowania techniczne i propagacyjne

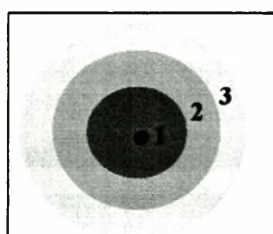
Omawiane zjawisko pozwala na:

- a) pracę stacji z korespondentem dalekosiężnym bez zakłóceń od stacji bliskich - lokalnych (komfort pracy DX w zakresie 18 - 30 MHz),
- b) możliwość pracy dalekosiężnej bez rozpoznania i celowego zakłócania przez stacje znajdujące się pomiędzy stacją nadającą a odbierającą.

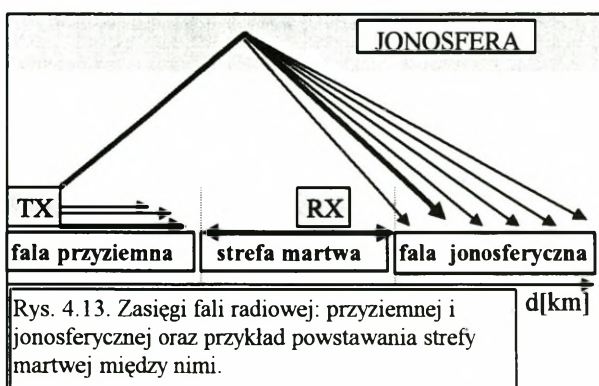
Przykładem takiego zjawiska było nadawanie przez stacje VOA, RWE czy BBC audycji zakłócanych „zagłuszarkami” z byłego ZSRR. Takie zagłuszanie było skuteczne lub prawie skuteczne w wypadku pasm KF do 12 MHz. Powyżej tych częstotliwości istniały zbyt duże obszary stref martwych (zgodnie z wcześniejszymi założeniami przedstawionymi w rozdziale). Powodowały one to, że aby skutecznie zakłócić sygnał nadawany z USA powyżej 12 MHz należało zakłócać już u „źródeł”, czyli specjalnie wybudowanymi stacjami zakłócającymi np. na Kubie. Często w zakresie powyżej 12 - 15 MHz sygnał fali przyziemnej, np. ze stacji zakłócającej z terenu byłego ZSRR, rozchodził się na odległości ponad stu km i pojawiał się, już jako jonosferyczny, zamiast w Polsce to dopiero poza Europą! Nie bez powodów zakresy odbiorników radiowych w byłym ZSRR jeśli już posiadały zakres KF to tylko do 12,5 MHz, ale najczęściej był to zakres 3,95 - 9,5 MHz. W

tych zakresach znacznie góruje fala przyziemna oraz występuje mały obszar strefy martwej. Istnieje wtedy możliwość najskuteczniejszego zakłócania „niepożądanych stacji” na fali jonosferycznej.

Nie bez powodu główne stacje światowe KF, takie jak BBC, VOA itp., posiadają wiele nadajników w różnych odległych rejonach świata (Seszele, Liberia, Komory, Antyle). Jest to cały czas walka ze strefą martwą i o to, aby sygnał prawie zawsze docierał do pożądaných odbiorców.



Rys. 4.12. Schemat rzutu poziomego zasięgów:
1 - fali przyziemnej
2 - strefy martwej
3 - fali jonosferycznej



Rys. 4.13. Zasięgi fali radiowej: przyziemnej i jonosferycznej oraz przykład powstawania strefy martwej między nimi.

5. ROZCHODZENIE SIĘ FAL ULTRAKRÓTKICH

5.1. FALA PRZESTRZENNA O ZASIĘGU HORYZONTOWYM

1. Uwarunkowania propagacyjne

Falą przestrzenną o zasięgu horyzontowym nazywamy fale rozchodzące się po liniach prostych wzdłuż powierzchni ziemi. Zasięg takiej fali jest więc na taką odległość, na jaką „widzą się anteny”. Jest on ograniczony ukształtowaniem powierzchni ziemi i jej kulistością. Na zasięg tej fali duży wpływ mają również inne przeszkody terenowe.



Istnieje ścisła zależność między wysokością zainstalowania anteny a długością stosowanej fali, na której pracujemy chcąc osiągnąć największy zasięg. Antena, dla zapewnienia najlepszego zasięgu, powinna być zainstalowana na krotnościach $1/4$ długości stosowanej fali, posiadając wtedy najbardziej korzystną charakterystykę promieniowania dla tego typu łączności.

a) Fala rzeczywista nad powierzchnią ziemi

W rzeczywistości, zasięg fali przestrzennej jest trochę większy od tego wynikającego z prostoliniowego rozchodzenia się fal radiowych. Fala nie rozchodzi się dokładnie prostoliniowo przy ziemi, lecz ulega pewnym nieznacznym ugięciom w kierunku powierzchni ziemi, traktując ją jako powierzchnię płaską. Z tego powodu zasięg fali powierzchniowej jest trochę większy od tego, który wynika z zasięgu optycznego.



b) Fala przestrzenna nad morzem

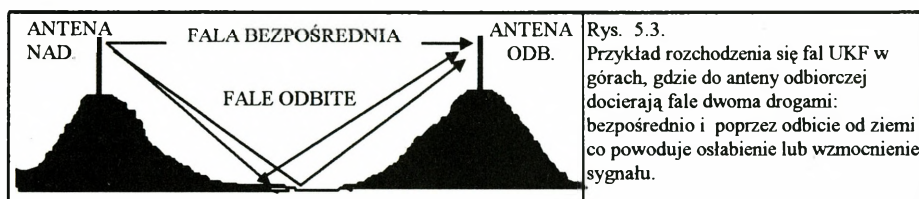
Zasięg tego typu fali nad akwenami wodnymi jest większy o około 50% niż nad lądem. Wynika to z tego, że powierzchnia wody pozwala na lepszą „widoczność anten” oraz mniejsze tłumienie tego rodzaju fali. Występują tutaj również częste odbicia tego typu fali od powierzchni wody.

c) Fala przestrzenna w terenie nierównym (pagórkowatym)

W środowisku górzystym zachodzi częste odbicie fali radiowej od powierzchni ziemi, w wyniku którego docierają do anteny odbiorczej dwa rodzaje fal. Są to fale bezpośrednie i odbite od powierzchni ziemi. Mogą się one wzajemnie odejmować (zachodzi wtedy osłabienie sygnału) lub sumować (występuje zjawisko wzmocnienia).

Im wyższe jest położenie anteny i krótsza fala radiowa, tym częściej występują fale odbite od powierzchni ziemi.

Zachodzą wtedy zjawiska: „cienia” oraz „półcienia radiowego”, które powstają za przeszkodą terenową (górami, budynkiem).



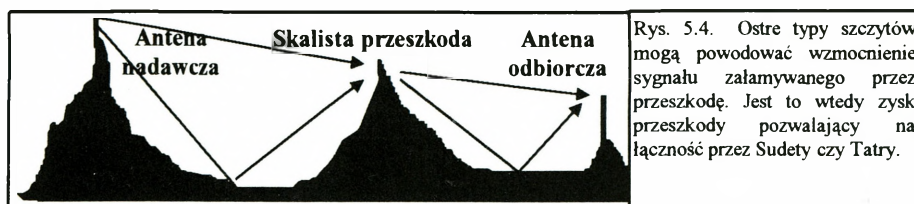
d) Fala przestrzenna w terenie górskim

W zależności od rodzaju grzbietu górskiego (grani, pasma) rozróżniamy dwa rodzaje wierzchołków:

Ostre, skaliste

Występują w Tatrach Wysokich, w części Tatr Zachodnich i w okolicach wysoko położonych kotłów Karkonoszy. Tego typu szczyty tworzą przeszkody często dające tzw. **zysk przeszkody**.

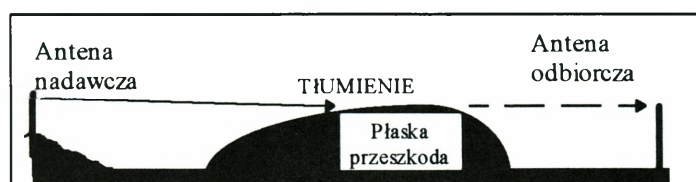
Zysk przeszkody występuje w zakresie UKF i polega na ugięciu fali radiowej przez szczyt, pasmo górskie w taki sposób, że następuje wzmocnienie (zysk) sygnału fali radiowej. Upraszczając, formacja skalna pełni tutaj pewien rodzaj wzmacniacza, przekaźnika fali radiowej.



Kłopot jest z tzw. trafieniem w odpowiednią część pasma górskiego reagującego właściwie na daną częstotliwość, np. zmiana częstotliwości pracy, nawet rzędu setek kHz na UKF, może spowodować zmiany siły sygnału kilka lub nawet kilkanaście dB po przejściu przeszkody.

Płaskie, zalesione

Występuje w terenach podgórskich oraz w Beskidach czy Sudetach.



Rys. 5.5. Płaskie, zalesione szczyty powodują znaczne tłumienie fali typu przestrzennego, utrudniając łączność UKF w Beskidach.

Znaczne tłumienie fal radiowych przez ten rodzaj przeszkód wynika z tego, że do tłumienia przez obszar płaski, wysoko położony, dodatkowe i to znaczne tłumienie wprowadza teren zalesiony.

Zjawisko załamania fali (dyfrakcji) jest często jedynym sposobem łączności w górach w zakresie powyżej 30 MHz, gdzie istnieje wiele przeszkód terenowych.

Dla fal przestrzennych w terenie zabudowanym i zalesionym zasięg jest średnio o 30%-50% mniejszy niż w terenie płaskim.

W terenie zalesionym tłumienie fali przestrzennej wynosi:

- dla lasów liściastych: 5 - 10 dB/ 100 metrów toru propagacyjnego;
- dla lasów iglastych: rzędu 2 - 6 dB/ 100 metrów metrów toru propagacyjnego.

Jednolity masyw leśny powoduje zmniejszenie zasięgu radiostacji:

- dla zakresu pracy 20 MHz...50 MHz dwu i trzykrotnie (średnio 2,45),
- dla zakresu pracy 50 MHz...87,5 MHz trzy i czterokrotnie (średnio 3,46),
- dla zakresu pracy 87,5 MHz...150 MHz czterokrotnie (średnio 3,9),
- dla zakresu pracy 150 MHz...222 MHz pięciokrotnie (średnio 4,5).

Jest to analiza sytuacji, gdy obie stacje znajdują się w lesie (założenie jednolitości środowiska rozchodzenia się fali radiowej).

Największy ujemny wpływ na zasięg łączności ma położenie stacji na skraju lasu lub na polanie.

Rozmieszczenie radiostacji w tych obszarach powoduje rozproszenie fali, dodatkowe tłumienie oraz bardzo złożoną strukturę pola elektromagnetycznego - natężenie pola ulega nagłym i znacznym zmianom w obrębie nawet kilku metrów.

Dla fal przestrzennych o częstotliwości 30 - 87,5 MHz takie negatywne zjawisko zachodzi nawet w odległości kilkudziesięciu do stu metrów od skraju lasu, a dla zakresu 118 - 470 MHz jest to dystans kilkuset metrów do kilometra.

f) Teren zurbanizowany (przemysłowy)

Występuje w tym przypadku znaczne tłumienie fali radiowej, a zasięgi są bardzo trudne do obliczenia, gdyż zachodzą odbicia trudne do określenia z powodu dużej niejednorodności i mnogości przeszkód (nie mówiąc o ilości zakłóceń!).

Obniżenie siły sygnału fali w terenie zabudowanym wynosi średnio kilka dB.

2. Uwarunkowania techniczne

Łączność na tej fali realizowana jest za pomocą anten promieniowania pionowego: prętowych (teleskopowych), typu GP, kolinearnych, pionowych wibratorów objętościowych (odwrócone i klasyczne).

Łączność z wykorzystaniem pasm górskich w propagacji może być realizowana za pomocą anten o polaryzacji poziomej (dipole, Yagi, krzyżowe, logarytmiczne).

Za pomocą fal przestrzennych łączność realizowana jest jako:

- mobilna (samochody, przemieszczający się użytkownicy - dla stacji przenośnych moc nadawcza rzędu 0,5 - 8 W);
- półmobilna lub półstacjonarna (łączność z pojazdów do stacji bazowych - dla stacji przewoźnych-pokładowych moc nadawcza rzędu 25 - 30 W),
- stacjonarna (radiofonia, telewizja, służby państwowe - wszelkie trakty radioliniowe horyzontowe- dla stacji bazowych moc nadawcza rzędu 50 W.).

Zasięgi standardowe dla tego typu łączności wynoszą:

- dla relacji stacja przenośna - stacja przenośna = 1- 8 km
- dla relacji stacja przenośna - stacja przewoźna = 5 -12 km
- dla relacji stacja przenośna - stacja bazowa = 7 -15 km
- dla relacji stacja przewoźna - stacja bazowa = 10 - 25 km
- dla relacji stacja przewoźna - stacja przewoźna = 10 - 20 km
- dla relacji stacja bazowa - stacja bazowa = 25 - 50 (75) km

Oczywiście ważną rolę odgrywa tutaj antena, rodzaj emisji, rodzaj terenu, czułość odbiornika radiostacji itp.

Stacje radiodifuzyjne funkcjonują w dwóch zasadniczych kategoriach:

- **stacje lokalne UKF** - moc od setek watów do kilku, kilkunastu kW - zasięg odpowiednio od kilku, kilkunastu do kilkudziesięciu km,
- **stacje regionalne UKF** - moc kilkadziesiąt, a nawet ponad sto kW - zasięg do 75 - 120 km.

Stacje radioliniowe posiadają moce rzędu kilku watów (na bardzo wysokich częstotliwościach rzędu GHz) do kilku kW (na najniższych częstotliwościach) - zasięg od kilkunastu km na mikrofalach i do 50 - 70 km na falach metrowych.

5. Specyfika rozchodzenia się fali przestrzennej w zakresie mikrofalowym

W zakresie mikrofalowym dodatkowo zaczynają tłumić falę przestrzenną różne uwarunkowania atmosferyczne. Dla fali o długości około 1 cm (10,5 GHz) nawet takie zjawiska jak deszcz, śnieg i mgła (wilgotność) wpływają tłumiąco. **Podczas opadów tłumienie tych fal wynosi:**

- dla śniegu i gradu: 5 - 8 dB na 1000 m toru propagacyjnego,
- dla deszczu i mżawki: 3 - 6 dB na 1000 m toru propagacyjnego,
- dla gęstej mgły i chmur: kilka dB.

Użytkownicy telewizji satelitarnej zauważyli zapewne wpływ tych właśnie zjawisk, np. na odbiór programów podczas występowania takich zjawisk (pogorszenie odbioru - „śnieżenie”, a nawet zanik obrazu).

Ciekawy wpływ na fale przestrzenne w zakresie mikrofalowym zauważono nad dużymi akwenami wodnymi i w strefie tropikalnej, gdzie występuje duża wilgotność powietrza, co wprowadza pewne tłumienia dodatkowe na trasie radiowej.

Akweny wodne zwiększają zasięg najdłuższych fal zakresu UKF (rzędu 30 - 174 MHz). Dla fal najkrótszych zakresu mikrofalowego (rzędu 10 - 200 GHz) nie zawsze wpływają pozytywnie na zasięg łączności. Dla częstotliwości większych od 10 GHz nawet gęstość powietrza, zawartość tlenu w powietrzu decyduje o zasięgu fali przestrzennej.

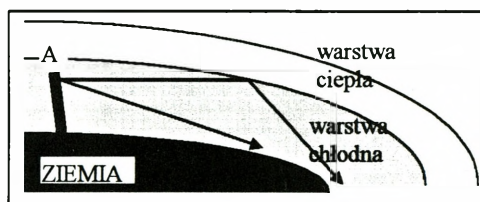
5.2. FALA DUKTU PRZYZIEMNEGO

Przy omawianiu zjawiska mikrofal wspomniano o wpływie najbliższych ziemi warstw powietrza na rozchodzenie fal przestrzennych o zasięgu horyzontowym. Zjawisko to ma również i inny, ale korzystny wpływ na te fale. Jest nim dukt powietrzny.

1. Dukty przyziemne

Powstają one na skutek ciągłych ruchów powietrza przy powierzchni ziemi spowodowanych różnicą temperatur. Wynika to z przekazywania ciepła między warstwami powietrza nad lądem i morzem. Tego typu przemieszczenia powodują zmiany właściwości atmosfery, tworząc do pewnej wysokości korzystne warunki do przemieszczania się fali radiowej UKF na zasadzie swobodnego odbijania się od powierzchni ziemi i tej górnej części powietrza, tworzących jak gdyby korytarz - dukt do wędrowania fali czyli falowód. Z tym sposobem propagacji nierozzerwalnie związane jest zjawisko inwersji.

INWERSJA - ruch mas powietrza spowodowany różnicą temperatur w różnych miejscach (rejonach).



Rys. 5.6. Przykład powstawania duktu (falowodu) powietrznego dla fali radiowej UKF, gdy istnieją dwie warstwy powietrza o różnych temperaturach.

2. Parametry duktu przyziemnego

Dukt powstaje na wysokości od kilku metrów (szczególnie nad morzem) do około 300 metrów (np. nad lądem), choć stwierdzono wypadki występowania nawet do ponad 2000 metrów.

Tłumienie fal w dukcie tego typu jest bardzo małe. Dlatego też, występują tutaj duże zasięgi, które wynoszą nawet kilka tysięcy kilometrów przy umiarkowanych mocach nadajników.

Grubość warstwy falowodu powietrznego decyduje o zdolności przewodzenia fal i wynosi:

- dla podzakresu 50 - 100 MHz około 300 - 150 metrów,
- dla podzakresu 100 - 174 MHz około 150 - 120 metrów,
- dla podzakresu 174 - 335 MHz około 120 - 80 metrów,
- dla podzakresu 410 - 470 MHz około 60 - 40 metrów.

Z powyższego zestawienia wynika, że częstotliwości najwyższe mogą podlegać temu zjawisku najczęściej, gdyż prawdopodobieństwo wystąpienia cieńszych warstw jest większe. Okresem najdłuższego i najczęstszego występowania tego zjawiska jest jesień, gdy takie dukty mogą zalegać na znacznych obszarach.

Często większe niż normalnie zasięgi stacji UKF na fali przyziemnej przypisujemy właśnie tym duktom. Jest to w sytuacjach, gdy następuje odbiór stacji:

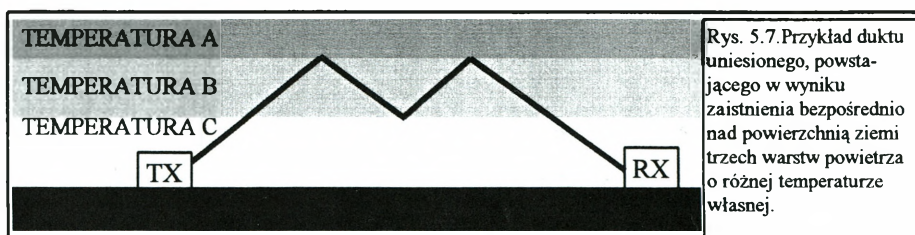
- radiodifuzyjnych i lotniczych naziemnych o zasięgu Europy (1500-2500 km),
- radiotelefonicznych o zasięgu regionalnym (500 - 1500 km),
- mikrofalowych o zasięgu regionalnym i z obszaru całego kraju (500 - 1000 km).

Innym, dosyć kontrowersyjnym i interesującym zjawiskiem jest odbiór, za pomocą duktów przyziemnych, sygnałów nadawanych przez naziemne stacje satelitarne do satelitów przy użyciu znacznych mocy. Odbiór taki jest możliwy przy nadawaniu, przez naziemną stację satelitarną, pod kątem elewacji mniejszym niż 60 stopni.

Zjawiskiem charakterystycznym duktu przyziemnego jest to, że fala dociera do bardzo odległego korespondenta omijając często po drodze tych, którzy są między granicą zasięgu horyzontowego, a zasięgiem skoków fali w dukcie.

3. Dukt uniesiony

Rządzą nim takie same zasady co duktem przyziemnym. Różni się on tylko od poprzednio omówionego tym, że powstaje na pewnej wysokości nad ziemią tak, jakby dukt przyziemny został podniesiony na pewną wysokość. Wynika to z tego, że wspomniana warstwa „aktywnego” powietrza zajmuje obszar otoczony jeszcze innymi różnymi warstwami powietrza o innej temperaturze.



Dukty uniesione zapewniają większe zasięgi od duktu przyziemnego, gdyż w rozchodzeniu fali nie uczestniczy powierzchnia ziemi, która wprowadza największe tłumienie.

Parametry duktu uniesionego

Powstaje on od kilkunastu metrów nad morzem, zapewniając dalekie łączności nawet przy niespokojnym morzu. Tworzy się on od kilkuset metrów nad lądem. Część powodzeń w

łącności UKF w górach przypisujemy duktom uniesionym tym bardziej, że występują tu specyficzne ruchy warstw powietrza tak niezbędnych dla powstawania tego zjawiska.

Zasięg łączności w duktach uniesionym jest ograniczony miejscem, w którym z powodu już nieodpowiedniej temperatury powietrza, fala „umyka” z korytarza propagacyjnego i powraca na ziemię.

Możliwe jest uczestniczenie fali w dwóch różnych, powstających zaraz po sobie, duktach różnego typu. Jest to wypadek rzadki, choć prawdopodobny. Fala kończąca trasę w duktach uniesionym i wypadająca z niego, wędrując na ziemię trafia do następnego duktu - przyziemnego, który przejmuje dalsze prowadzenie fali radiowej. Jest to o tyle możliwa sytuacja, że w związku z przemieszczaniem mas powietrza warunki w dwóch różnych rejonach są odmienne, a więc i niejednakowa jest wysokość zalegania duktów.

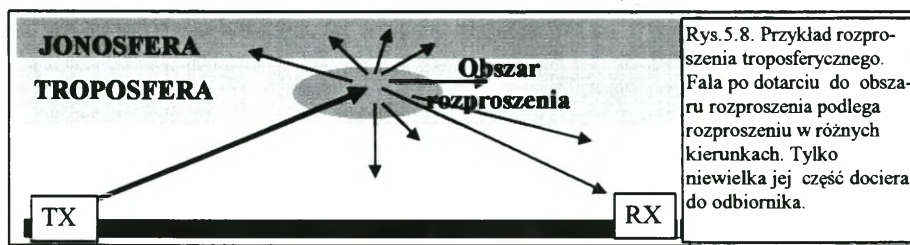
5.3. PROPAGACJA OD ROZPROSZENIA W TROPOSFERZE -ang. troposcatterTS

W związku z nagrzewaniem się ziemi występują, wspomniane już poprzednio, ruchy warstw powietrza. Przemieszczenia te oprócz dolnych warstw powietrza, obejmują również warstwy jonosfery i troposfery. Dzięki takim przemieszczaniom w troposferze (około 15 km nad ziemią) powstają obszary niejednorodne, które posiadają właściwość rozpraszania fal radiowych zakresu UKF.

1. Istota rozproszenia troposferycznego.

Propagacja fali radiowej za pomocą rozproszenia troposferycznego polega na tym, że w pewnym obszarze troposfery są one rozpraszane. Z jednolitej wiązki fal padających na ten obszar powstają liczne, wypromieniowane w różne strony. Istotne jest także wypromieniowanie fal, aby do ziemi powróciła wystarczająca ich część na przeprowadzenie łączności. Niezwykle ważną rolę w tego typu propagacji fal radiowych spełnia więc obszar rozproszenia troposferycznego.

Obszar rozproszenia definiuje się jako wspólnie objęty obszar przez wiązki obu anten korespondujących radiostacji.



Rys.5.8. Przykład rozproszenia troposferycznego. Fala po dotarciu do obszaru rozproszenia podlega rozproszeniu w różnych kierunkach. Tylko niewielka jej część dociera do odbiornika.

2. Cechy charakterystyczne zjawiska

Obszary rozproszenia mają kształt płatów, pęcherzy i oczek. Stopień odchylenia wiązki fali jest większy w dolnych częściach troposfery, gdyż są tam silniejsze ruchy powietrza. Z reguły natężenie fali rośnie, gdy maleje kąt jej nadejścia do troposfery. Stwierdzono niewielką zależność zjawiska od częstotliwości pracy na rozproszeniu troposferycznym.

Warunkiem występowania rozproszenia troposferycznego jest występowanie rozpraszających obszarów o wymiarach większych od długości rozpraszanej fali. Z tego też powodu zauważamy większe rozproszenie w podzakresie mikrofalowym niż na falach dłuższych UKF.

3. Zjawisko zaników w propagacji typu TS

a) Zaniki powolne

W tego typu propagacji występują wahania natężenia pola odbieranego sygnału, tzw. **zaniki powolne**. Dokuczliwość ich rośnie wraz z częstotliwością, gdyż są one zależne od

długości fali. Czym jest ona krótsza, tym mniejsze występują wahania wysokości położenia obszarów wpływających na jakość łączności troposferycznej. Dla fal bardzo krótkich, o częstotliwości rzędu 10 - 100 GHz, powoduje to nawet stały „brum”, tzn. zniekształcenia sygnału i następnie zaniki sygnału nawet na kilkadziesiąt sekund lub kilka minut.

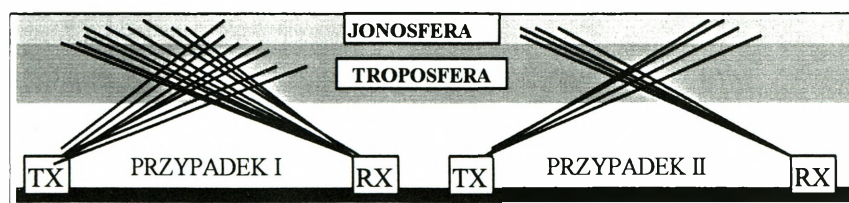
b) Zaniki szybkie

Również zjawiskiem charakterystycznym dla tego typu propagacji są zaniki szybkie. Spowodowane są one szybko przemieszczającymi się warstwami powietrza, których rezultatem ubocznym jest modulacja skrośna typu amplitudowego i częstotliwościowego sygnału fali troposferycznej. Modulacja skrośna typu częstotliwościowego powoduje zmianę (przesunięcie) częstotliwości. W omawianym zjawisku występuje również wahanie poziomu odbieranego sygnału, gdy na trasie łącza troposferycznego pojawi się burza lub grupa statków powietrznych. **Niejednolitość występowania rozproszenia troposferycznego** związana jest z większą aktywnością zjawiska w strefie zwrotnikowej niż podbiegunowej oraz intensywniejszym przebiegiem latem niż zimą (różnica w poziomie tłumienia sygnału jest nawet rzędu kilkunastu dB).

4. Problem synchronizacji antenowej

W tego typu łączności anteny ustawione są w kierunku na siebie wzdłuż łuku wielkiego koła. Przy szerokich wiązkach promieniowania anten optymalnym ustawieniem ich jest takie, przy którym występuje najmniejszy kąt. **Wynika to z dwóch uwarunkowań:**

- **technicznego** - wraz ze wzrostem częstotliwości maleją szerokości wiązki promieniowania anten, a więc wzrasta ich kierunkowość;
- **propagacyjnego** - wraz ze wzrostem częstotliwości pracy zmniejsza się obszar rozproszenia troposferycznego,



Rys. 5.9. Wiązki rozproszenia troposferycznego dla zakresu: I :30 -100 MHz i II :100 -335 MHz



Rys.5.10. Przykład duktu uniesionego powstającego w wyniku zaistnienia bezpośrednio nad powierzchnią ziemi trzech warstw powietrza o różnej temperaturze własnej.

Bardzo wąskie wiązki promieniowania w tym rodzaju propagacji powodują to, że na tak "płaskim" obszarze (trasie) występują bardziej stabilne warunki łączności. Należy pamiętać, że zawężenie wiązki promieniowania jest technicznie bardzo trudne do zrealizowania.

Zawężanie wiązki promieniowania poniżej wartości zwanej krytyczną powoduje to, że zmniejsza się powierzchnia skuteczna anteny, przy jednoczesnym wzroście jej zysku kierunkowego. Tak więc, wzrost oczekiwanych efektów staje się coraz mniej oczywisty wraz z rosnącą kierunkowością anteny. Krytyczna wartość wiązki troposferycznej wynosi 1,7 stopnia.

Z matematycznego punktu widzenia, problem ustawienia i koordynacji antenowej można opisać funkcjami korelacji.

Propagacja troposferyczna nazywana jest również **pozahoryzontową**, gdyż w sposób stały i ciągle zwiększa zasięg fali przyziemnej (fali o zasięgu horyzontowym). Tego typu propagacja jest wykorzystana w łączności za pomocą radiolinii pozahoryzontowych (czyli troposferycznych).

5. Uwarunkowania techniczne

a) Moce nadajników i czułość odbiorników

Przy tego typu pracy stosuje się duże i bardzo duże moce nadajników w myśl upraszczającej zasady, że **czym większa moc wypromieniowana przez nadajnik i docierająca do obszaru rozproszenia, tym więcej wróci jej po rozproszeniu na ziemię.**

Są to moce rzędu najmniej setek watów do kilku lub kilkunastu kW, dla najczęściej wykorzystujących ten rodzaj propagacji radiolinii troposferycznych.

Przy dużych mocach nadajników (2 - 3 kW) wymagane są czułe odbiorniki (standardowo rzędu 2 kTo).

b) Zasięgi tras troposferycznych

Są one rzędu 200 - 500 km w zależności od wymaganego prawdopodobieństwa łączności:

- dla dystansu 75 - 120 km - pewna łączność,
- dla dystansu 120 - 200 km - bardzo duże prawdopodobieństwo przeprowadzenia łączności,
- dla dystansu 200 - 400 km - duże prawdopodobieństwo przeprowadzenia łączności,
- dla dystansu 400 - 600 km - znaczne prawdopodobieństwo przeprowadzenia łączności,
- dla odległości większych niż 600 km szybki spadek prawdopodobieństwa przeprowadzenia łączności, choć amatorzy uzyskują sporadycznie dystanse rzędu 800 - 1000 km!

c) Emisje i rodzaje pracy

W tego typu propagacji, przy stosowaniu emisji telefonicznych należy pamiętać, że będą one posiadać zniekształcenia, szczególnie przy SSB (tylko dostateczna jakość). Stosowanie natomiast emisji cyfrowych z umiarkowanymi prędkościami nadawania zapewnia dobrą jakość (np. zastosowanie w radioliniach troposferycznych). W propagacji przez rozproszenie fal UKF należy pamiętać o zjawisku Dopplera powodującym przesunięcia sygnału rzędu kilkunastu, kilkudziesięciu Hz na niższych i średnich częstotliwościach i setek Hz na częstotliwościach rzędu GHz (dla 10 GHz jest to około 500 Hz i zaniki około 1min.).

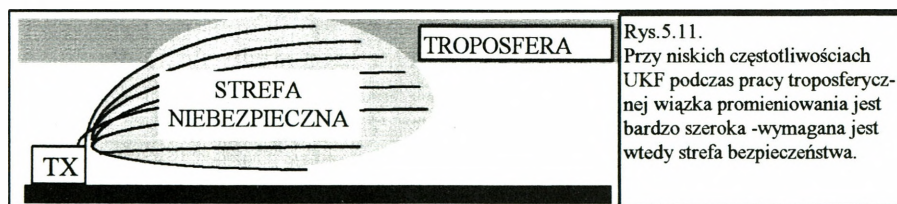
5. Inny rodzaj rozproszenia troposferycznego zakresu UKF

W związku z tym, iż w propagacji troposferycznej, z coraz mniejszą częstotliwością pracy rośnie szerokość wiązki wypromieniowanej anteny nadawczej, przy częstotliwościach rzędu 20 - 40 MHz kąty elewacji promieniowania anten muszą być coraz większe. Przy niezmiennym się kącie elewacji, a zwiększającej się wiązce promieniowania, fala stawałaby się przestrzenną i coraz częściej przeszkadzałyby jej przeszkody znajdujące się na powierzchni ziemi.

Z tego powodu przy pracy troposferycznej istnieje strefa bezpieczeństwa, gdyż:

- a) długość fali determinuje znaczne rozmiary anteny i wiązki jej promieniowania;
- b) stosowane są bardzo duże moce promieniowania,
- c) wykorzystywane są znaczne częstotliwości ze względu na wpływ na organizm ludzki.

Strefa taka, przy wymienionych wyżej czynnikach oraz uwzględnieniu wymaganej szerokiej i niskiej wiązki do łączności troposferycznej, często wynosi nawet kilkaset metrów !

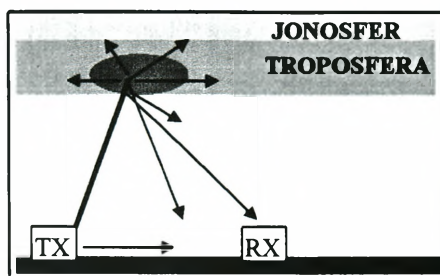


Rys.5.11.
Przy niskich częstotliwościach UKF podczas pracy troposferycznej wiązka promieniowania jest bardzo szeroka -wymagana jest wtedy strefa bezpieczeństwa.

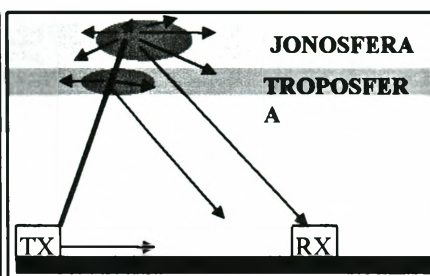
W zakresie 20 - 40 MHz łączność za pomocą rozproszenia troposferycznego polega na promieniowaniu szerokiej wiązki prawie lub zupełnie pionowo w górę i powrotowi pewnej jej części na ziemię dzięki rozproszeniu w troposferze i częściowo w jonosferze.

Zasięg przy takim kącie promieniowania jest rzędu 75 - 200 km. Przy bardzo dużych mocach, fala dociera nawet do jonosfery dając w rezultacie rozproszenia troposferyczne i niewielkie jonosferyczne. Zjawisko to można wykorzystać do pracy w ruchu. Antena zmontowana na dachu pojazdu promieniuje zawsze kierunkowo - pionowo w górę i zapewnia łączność za pomocą rozproszenia troposferycznym do 80 - 120 km, doskonale

uzupełniając zasięg na fali przyziemnej. Uzyskuje się stabilny dookólny zasięg w promieniu określonym maksymalnym zasięgiem fali rozproszenia troposferycznego.

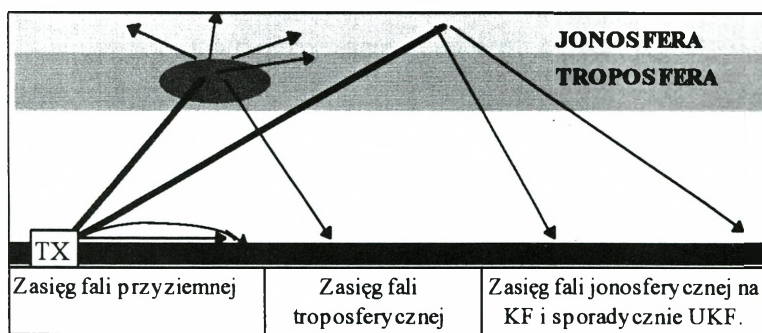


Rys. 5.12. Rozproszenie troposferyczne dla fali UKF wypromieniowanej pionowo.



Rys. 5.13. Rozproszenie jonosferyczno-troposferyczne dla fali UKF wypromieniowanej pionowo.

Łączność za pomocą rozproszenia troposferycznego fali UKF wypromieniowanej pionowo w górę nie tylko wspaniale uzupełnia zasięg fali przyziemnej, ale również, jeśli zaistnieją warunki łączności na fali jonosferycznej, uzupełnia strefę martwą. Taki rodzaj propagacji fal radiowych może posiadać szczególne zastosowanie w zakresie KF.



Rys. 5.14. Przykład praktycznego zastosowania rozproszenia troposferycznego przy wypromieniowanej fali UKF prawie pionowo w górę. Pozwala to znakomicie uzupełnić zasięg fali przyziemnej.

Uwarunkowania techniczne w tego typu propagacji są podobne jak dla zwykłej łączności troposferycznej. Niezbędna jest tutaj duża moc rzędu kW, a dla stacji mobilnych przynajmniej kilkuset watów. Stosowane są w tego typu propagacji czułe odbiorniki.

W tego typu propagacji wykorzystywane są anteny kierunkowe, ale o dość szerokich wiązkiach promieniowania (takie częstotliwości nie pozwalają technicznie na tak wąskie wiązki, jak na krótszych falach, np. rzędu dm czy cm). Często są to konstrukcje o znacznych powierzchniach i ukierunkowanej w górę charakterystyce promieniowania. W pracy tego typu występują niewielkie zniekształcenia emisji, ponieważ z powodu stosunkowo małej odległości od troposfery fala przebywa drogę tylko około $(2 \cdot 15 \text{ km} = 30 \text{ km})$ kilkudziesięciu kilometrów! W tego typu pracy ulegają zniekształceniu tylko sygnały fal wypromieniowanych przez nadajniki o znacznych mocach i to na skrajnie dużych odległościach dla tej propagacji - rzędu 250 km.

5.4. PROPAGACJA OD ŚLADÓW METEORÓW - ang. meteor scattering - MS

Łączność tego typu polega na odbijaniu wiązki fal radiowych od śladów zjonizowanego powietrza, powstałego w wyniku spalania się meteorów w atmosferze ziemskiej.

1. Zjawisko meteorów - uwarunkowania propagacyjne

Meteory przechodząc przez atmosferę ziemską spalają się, pozostawiając ślady w postaci smugi zjonizowanego powietrza w kształcie kolumny, walca lub paraboloidy złożonej w dużej części z Fe, Ni i kamieni. Ślady te są o długości 25 km i szerokości (średnicy) około 1 metra. Powstają one na wysokości 80 - 120 km nad powierzchnią ziemi; Ten rodzaj propagacji jest wykorzystywany w zakresie 30 - 500 MHz z następującym prawdopodobieństwem i jakością:

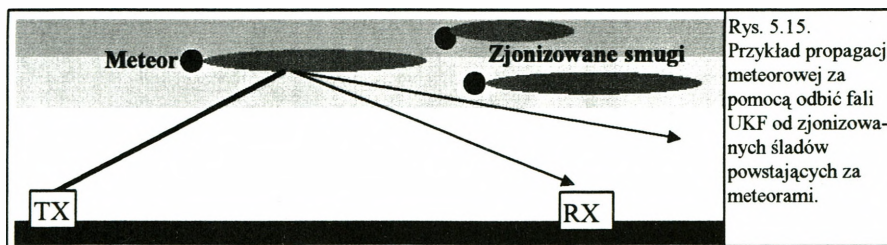
- podzakres podstawowego wykorzystania MS: 40 MHz - 100 MHz,
- podzakres jeszcze dużego prawdopodobieństwa przeprowadzenia łączności i dobrej jej jakości to 30 - 300 MHz,
- podzakres możliwej łączności, choć z małym prawdopodobieństwem i niską jakością to: 300 MHz - 500 MHz.

Poziom sygnału w łączności MS szybko maleje wraz ze wzrostem częstotliwości pracy w taki sposób, że dla wartości 450 MHz jest on 27 razy słabszy niż dla 150 MHz.

Czas odbicia od śladu meteorów maleje wraz ze wzrostem częstotliwości pracy w taki sposób, że na częstotliwości 450 MHz jest on 9 razy krótszy niż na 150 MHz.

Czas odbijania fali radiowej od śladu meteorów jest dłuższy dla częstotliwości niższych UKF

W radiokomunikacji profesjonalnej stosuje się stałą pracę emisjami i rodzajami pracy, umożliwiającymi transmisję danych o bardzo dużych możliwościach przesyłania informacji. Jeszcze innym rodzajem łączności profesjonalnej jest praca w zaplanowanych okresach aktywności meteorowej i stosowaniu emisji cyfrowych o potężnych szybkościach przetwarzania.



2. Uwarunkowania techniczne

a) Stosowane moce:

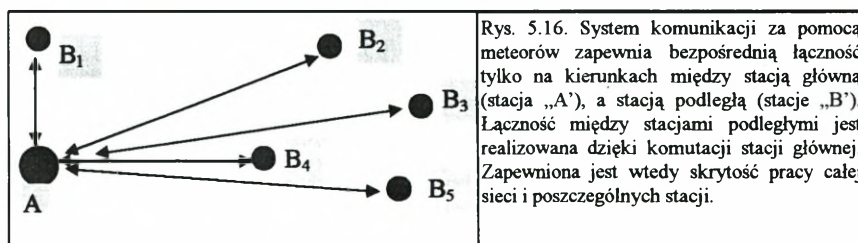
- w warunkach aktywności meteorowej, co najmniej rzędu 100 watów,
- w warunkach sporadycznych kilka razy większa.

b) Stosowane anteny:

- standardowo czteroelementowe Yagi umieszczone nisko nad ziemią,
- specjalistyczne - kilku elementowe anteny typu krzyżowego,
- w najnowszych zastosowaniach zmniejszone elektrycznie anteny logarymiczno-periodyczne.

c) **Czułość odbiornika** - dla mocy nadajników rzędu 100 W wymagana czułość wynosi około 3 - 4 kTo.

d) **Stabilność** - średnio 10 Hz/h, przy odczycie częstotliwości z dokładnością standardową 100 Hz.



5.5. PROPAGACJA ZA POMOCĄ SZTUCZNYCH SATELITÓW (SAT)

Z chwilą pojawienia się sztucznych satelitów Ziemi powstał nowy rodzaj łączności radiowej. Polega on na wykorzystaniu prostoliniowego rozchodzenia się z najmniejszymi stratami fal UKF przechodzących przez warstwy atmosfery do satelity.

1. Uwarunkowania propagacyjne

Organizację łączności satelitarnej na fali bezpośredniej oparto na doświadczeniach z wykorzystaniem fal radiowych do łączności z samolotami i między samolotami, tzn. na pracy na coraz wyższych częstotliwościach.

Pozwoliło to na wysnucie wniosków, że do łączności kosmicznej są najlepsze fale możliwie jak najkrótsze rzędu pojedynczych, dziesiątek i setek GHz. Są one stosowane w łączności typu:

- statek kosmiczny - statek kosmiczny,
- statek kosmiczny - stacje na Ziemi,
- nasłuch sygnałów z kosmosu przez stacje naziemne,
- nasłuch sygnałów z kosmosu przez stacje pokładowe statków kosmicznych.

Na początku komunikacji satelitarnej wykorzystywano zakres krótkofalowy (!) 19 800 - 20 150 kHz oraz 29 900 - 30 100 kHz w łącznościach typu jednostronnego, gdy często tylko można było odbierać sygnały nadawane przez satelitę (i to w paśmie niemal ogólnodostępnym - na zwykłym odbiorniku radiofonicznym). Takie wartości zakresów wykorzystywanych przez profesjonalne służby satelitarne pozwalały na odbiór tych korespondencji przez radioamatorów. W miarę postępu techniki łączności i budowy statków kosmicznych, zakres ten przeniósł się na pasmo 108,023 MHz, 136 - 138 MHz oraz 149 - 150 MHz a następnie 200 - 385 MHz i 400 - 406,5 MHz.

W ostatnich latach służby satelitarne eksploatują pasma: **1,55 GHz; 1,7 GHz; 2,5 GHz; 11,5 MHz.**

Z tego też powodu częstotliwości rzędu 1,3 GHz - 15 GHz nazywane są „oknem satelitarnym”.

Tendencją lat dziewięćdziesiątych jest używanie przez służby satelitarne częstotliwości rzędu kilkudziesięciu i kilkuset GHz! (teoretycznie do 450 GHz). Najwyższe wartości częstotliwości szczególnie stosowane są do łączności: statek kosmiczny - statek kosmiczny. Fale radiowe o tak małych długościach jak mikrofałe są wykorzystywane w łączności satelitarno - kosmicznej, gdyż dla innych służb łączności są nieprzydatne. W łączności na powierzchni Ziemi podlegają one znacznemu tłumieniu, rozproszeniu i licznym ugięciom.

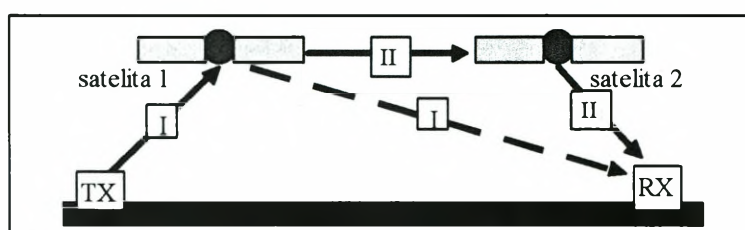
Zjawiska atmosferyczne takie jak deszcz, mgła, śnieg, czy nawet zanieczyszczenia powietrza i zawartość tlenu w powietrzu w znacznym stopniu ograniczają zasięg tych fal.

Należy pamiętać o tym, że uginanie i załamanie fal jest bardzo ułatwione dla fal porównywanym swoją długością z wymiarami przeszkody.

Tak więc, poza radiolokacją, która skrzętnie wykorzystuje „wady” mikrofal, służby satelitarne są jedynym użytkownikiem tak dużych częstotliwości.

Na łączu satelitarnym mogą wystąpić niewielkie zakłócenia z powodu:

- straty energii fali przy odbiciu przypadkowym MS,
- straty energii fali przy bardzo znacznych zmianach stanu atmosfery,
- przypadkowego znalezienia się obiektów powietrznych, które powodują odbicie pewnej części energii,
- zakłócenia typu echa i falowania sygnału wynikające z różnych dróg rozchodzenia się fali;
- odbicia fal najdłuższych z zakresu UKF od wyjątkowo silnej sporadycznej warstwy Es mogącej spowodować podobne skutki jak podane wyżej,
- osłabienia lub zupełnego zaniku sygnału przy łączności dwustronnej,
- przesunięcia Dopplera związane z przemieszczaniem się satelity (rzędu nawet kilku lub kilkunastu kHz), ale znacznie rekompensowanego stosowaniem w tym rodzaju łączności, emisji szerokopasmowych.



Rys. 5.17. Przykład łącza satelitarnego: I - bezpośredniego; II - za pośrednictwem stacji strefowych (stosowane w systemach rozbudowanych). RX - odbiornik; TX - nadajnik

2. Uwarunkowania techniczne

a) Moce nadajników

Dla stacji naziemnych powinny to być możliwie jak największe rzędu 100 W - 10 kW.

Stacje pokładowe satelitów, z racji skromnych możliwości energetycznych źródeł zasilania statków powietrznych (baterie słoneczne), są rzędu dziesiątek watów (stacje profesjonalne) do pojedynczych watów (stacje amatorskie).

b) Anteny

Anteny stacji naziemnych obszarowo są jak największe, najczęściej typu parabolicznego i anteny ścianowej. W systemach geostacjonarnych często wykorzystuje się naturalne

ukształtowanie terenu, np. niecki wulkaniczne do wyłożenia struktury (szkieletu) reflektorów anteny (np. w Puerto Rico) Anteny stacji naziemnej występują często z całym mechanizmem elektronicznego sterowania ruchem anteny, w celu śledzenia ruchu satelitów typu niestacjonarnego.

Dla stacji pokładowych satelitów wykorzystywane są anteny konstruowane według wielkości miejsca do przeznaczonego na ich rozwinięcie. Najczęściej są to anteny ścienne wykonane techniką napyłania poszczególnych warstw elementów.

c) Odbiorniki

Odbiorniki do łączności satelitarnej charakteryzują się kilkoma przemianami częstotliwości (3 - 5), dużą czułością stopnia wejściowego oraz torem korekcji położenia anteny na podstawie poziomego odbieranego sygnału (ARW kieruje systemem korekcji).

Jest to często rodzaj pracy dla stacji stałych i satelitarnych - automatyczny, dla pracy dla stacji naziemnych - mobilnych, półautomatyczny.

Zastosowanie mają wszystkie możliwe rodzaje emisji, a w przypadku profesjonalnych satelitarnych łączy radioliniowych (telekomunikacyjnych) - emisje cyfrowe oraz rodzaje pracy typu FDMA, SCPC oraz SS/TDMA.

Wykorzystywanymi przez służby profesjonalne pasmami dla łączności satelitarnej są:

- 136-138 MHz (lotnictwo cywilne i meteorologia)
- 220 - 406 MHz (pasma wojskowe – lotnicze i morskie);
- 1525 - 1695 MHz (systemy cywilne – morskie i lotnicze);
- 3,7 - 4,2 GHz (telewizja satelitarna);
- 11,7 - 12,2 GHz (telewizja satelitarna);
- 5,9 - 6,4GHz (radiokomunikacja).

W łączności satelitarnej spotyka się pracę typu:

a) UPLINK (odbior sygnału przez satelitę) - najczęściej w paśmie o wyższych częstotliwościach,

b) DOWNLINK (nadawanie sygnałów przez satelitę) - najczęściej w paśmie o niższych częstotliwościach. Jest to praca w systemie kilku transponderów, tzn. praca kilku (2 - 5) niezależnych segmentów (części) satelity mogących, np. tak samo nadawać i odbierać w różnych pasmach

