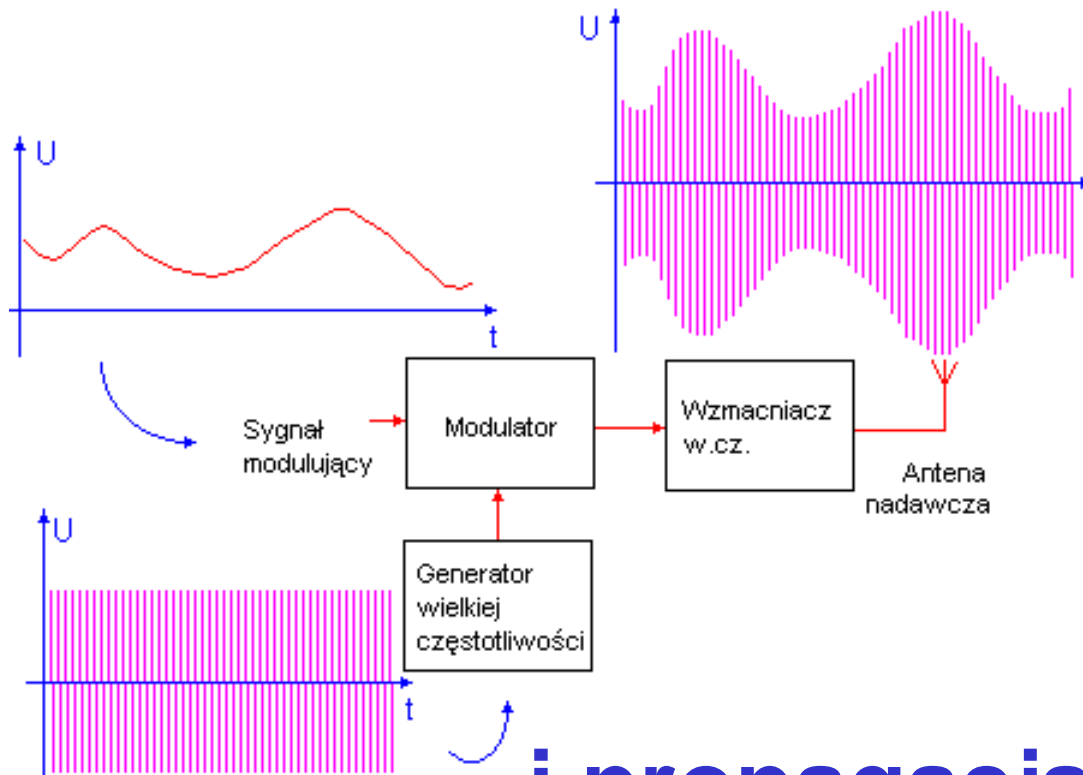


Fala elektromagnetyczna



i propagacja fal radiowych



Wprowadzenie

Fala radiowa jest jedną z wielu form promieniowania elektromagnetycznego. Oscylacje obu pól – magnetycznego i elektrycznego są ze sobą ściśle związane; pole elektryczne (wektor natężenia E) i pole magnetyczne (wektor natężenia H) są prostopadłe do siebie i kierunku propagacji. W wolnej – pustej przestrzeni pole e-m opisane jest układem równań Maxwella o postaci równania falowego:

$$\Delta H - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0$$

$$\Delta E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

gdzie:

Δ – laplasjan: $\Delta = \partial/\partial^2_x + \partial/\partial^2_y + \partial/\partial^2_z$,

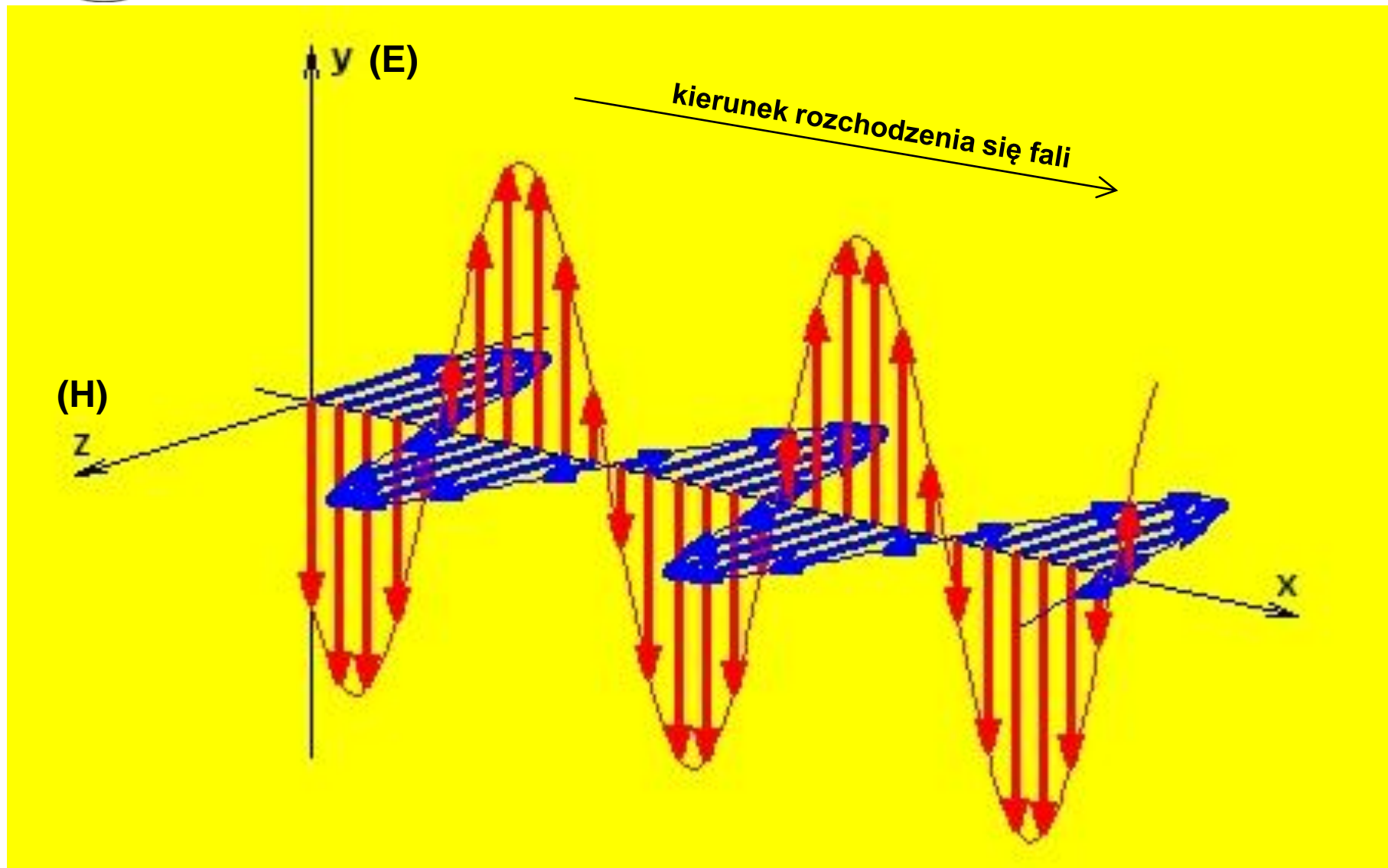
H – wektor natężenia pola magnetycznego,

E – wektor natężenia pola elektrostatycznego,

c – prędkość fazowa światła

Fale elektromagnetyczne są więc nośnikiem energii elektrycznej.

Spolaryzowana liniowo fala e-m





Parametry fali radiowej

Taki ruch, w którym zjawisko okresowe, przemieszcza się w przestrzeni, nazywamy ruchem falowym.

Zachowanie się fal elektromagnetycznych jest podobne do fal na wodzie: rozchodzą się od źródła, odbijają się od przeszkód, a gdy fala odbita dokładnie pokryje się z bieżącą, tworzą falę stojącą.

Podstawowym parametrem fali, jest liczba pełnych cykli w jednostce czasu. Wartość tę nazywa się **częstotliwością** (f) i wyraża się w hercach (Hz) - 1 Hz oznacza jeden pełny okres na sekundę.

Czas, w którym powtarza się sekwencja periodycznych zmian nazywa się **okresem** (T).

$$f = \frac{1}{T} \quad \left[\frac{1}{s} \right] = [Hz]$$



Parametry fali radiowej

W obrębie jednego okresu wyróżnia się **fazy**. Fazę określa czas od początku okresu (ϕ).

Prędkość fazowa rozchodzenia się fali (prędkość rozprzestrzeniania się fazy fali) jest zależna od rodzaju zjawiska okresowego i środowiska (współczynnika załamania i przewodności ośrodka). Przyjmuje się, że fale elektromagnetyczne rozchodzą się w próżni z prędkością fazową równą prędkości światła ($c=299\ 792\ 458$ m/s). Mogą się rozchodzić także w gazach, cieczach i ciałach stałych (z wyjątkiem metali). Ich częstotliwość jest narzucona przez źródło (generator) i w drodze nie ulega zmianie.

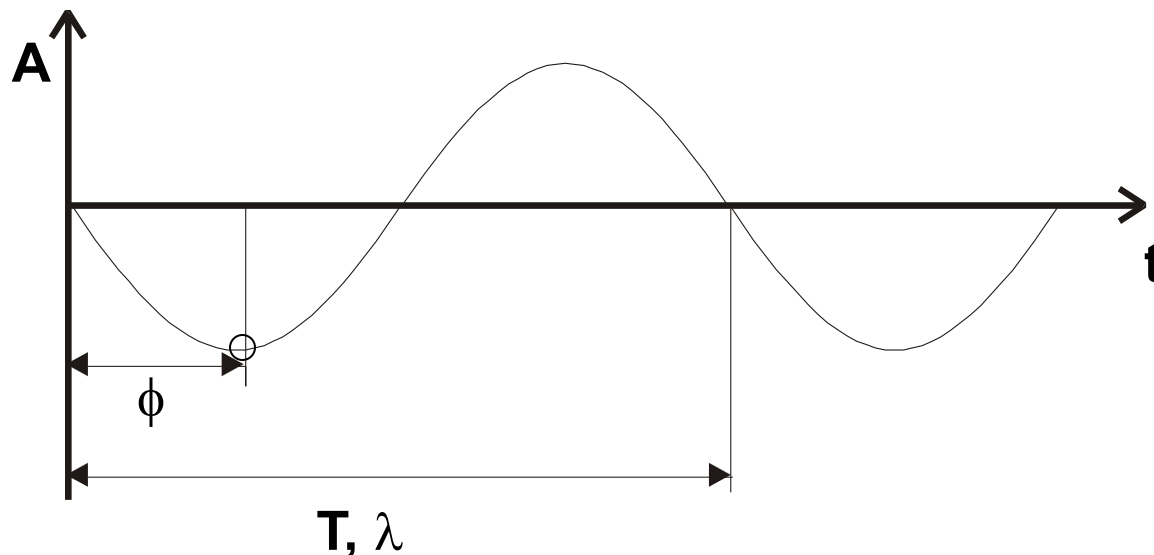


Parametry fali radiowej

Parametrem równorzędnym częstotliwości jest **długość fali**. Jest to odległość jaką zjawisko (w tym przypadku fala elektromagnetyczna) pokonuje w czasie jednego okresu.

$$\lambda = c \times T \quad [m]$$

Właśnie od długości fali pochodzą powszechnie znane określenia zakresów częstotliwości radiowych lub inaczej podział widma fal radiowych: fale długie, średnie, krótkie itd.





Podział widma fal radiowych

Podział dekadowy	Podział tradycyjny	Długość fali [m]	Częstotliwość [MHz]	Uwagi dotyczące propagacji fali na Ziemi
fale myriametrowe	fale bardzo długie	100000 - 10 000	0.003 - 0.03	słabo tłumiona fala powierzchniowa i fale jonosferyczne
fale kilometrowe	fale długie	10 000 - 1 000	0.03 - 0.3	fala powierzchniowa tłumiona, fala jonosferyczna
fale hektometrowe		1000 - 100	0.3 - 3	zależność od pory dnia: w dzień fala powierzchniowa, w nocy fala jonosferyczna, zjawiska zaniku selektywnego, interferencji
	fale średnie	1000 - 200	0.3 - 1.5	j.w.
	fale pośrednie	200 - 75	1.5 - 4	j.w.
fale dekametrowe		100 - 10	3 - 30	dominuje fala jonosferyczna, wielokrotnie odbita
	fale krótkie	75 - 10	4 - 30	j.w.
fale metrowe		10 - 1	30 - 300	fala nadziemna, głównie w obszarze widoczności nadajnika
	fale ultrakrótkie	10-0.3	30 - 1000	j.w.
	mikrofale	< 0.3	> 1000	j.w.



Podział widma fal radiowych

fale metrowe		10 - 1	30 - 300	fala nadziemna, głównie w obszarze widoczności nadajnika
	fale ultrakrótkie	10-0.3	30 - 1000	j.w.
	mikrofale	< 0.3	> 1000	j.w.
fale decymetrowe		1 - 0.1	300 - 3 000	j.w.
fale centymetrowe		0.1 - 0.01	3 000 - 30 000	fala troposferyczna
fale milimetrowe		0.01 - 0.001	30 000 - 300 000	j.w.
fale decymilimetrowe		0.001 - 0.0001	300 000 - 3 000 000	j.w.



Podział mikrofal

	Częstotliwość	Długość fali
L	1 - 2 GHz	30 - 15 cm
S	2 - 4 GHz	15 - 7.5 cm
C	4 - 8 GHz	7.5 - 3.25 cm
X	8 - 12.5 GHz	3.25 - 2.5 cm
Ku	12.5 - 18 GHz	2.5 - 1.66 cm
K	18 - 26.5 GHz	1.66 - 1.15 cm
Ka	26.5 - 40 GHz	1.15 - 0.75 cm
V	40 - 75 GHz	
W	75 - 110 GHz	
mm	>110 GHz	



Podział pasm radiowych ITU

Table of ITU Radio Bands		
Band Number	Symbols	Frequency Range
4	VLF	3 to 30 kHz
5	LF	30 to 300 kHz
6	MF	300 to 3000 kHz
7	HF	3 to 30 MHz
8	VHF	30 to 300 MHz
9	UHF	300 to 3000 MHz
10	SHF	3 to 30 GHz
11	EHF	30 to 300 GHz
12		300 to 3000 GHz



Propagacja fali radiowej

Wspólną cechą wszystkich systemów telekomunikacyjnych jest przekazywanie informacji przez ośrodek propagacji fal: atmosferę, wodę, wewnątrz Ziemi, drut, światłowód. Przetwarzanie informacji na sygnały, transmisja sygnałów, a także ich odbiór i odtwarzanie zależą od układu i konstrukcji urządzeń przeznaczonych do tych celów; natomiast warunki propagacji fal radiowych są zależne od wielu czynników nie dających się regulować.

Atmosfera jest podstawowym ośrodkiem, w którym uprawia się radionawigację. Jej budowa i zjawiska w niej zachodzące mają zasadniczy wpływ na rozchodzenie się fal radiowych. Tylko w niektórych przypadkach mamy do czynienia z propagacją fal w przestrzeni swobodnej (okołoziemskiej).



Propagacja fali radiowej

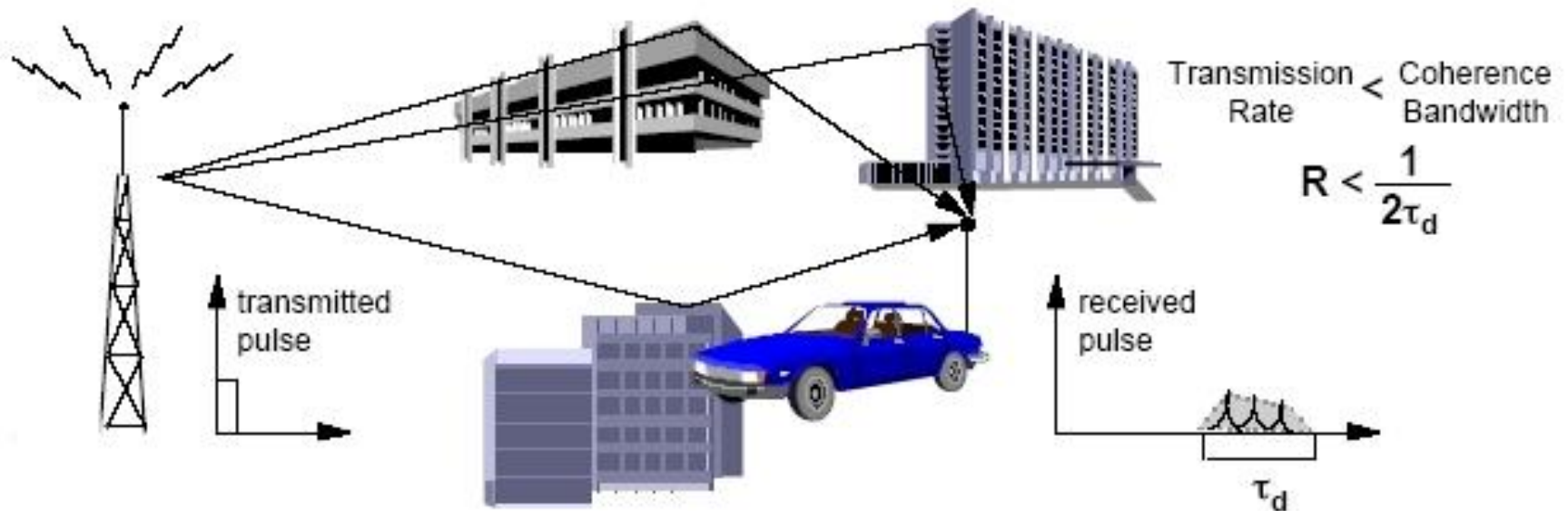
W wielkim uproszczeniu w atmosferze można wyróżnić dwie istotne dla radionawigacji (i radiokomunikacji) warstwy: **troposferę i jonosferę, przedzielone dość obojętną stratosferą.**

Troposfera rozciąga się od powierzchni Ziemi do wysokości od około 10km nad biegunami do 18km nad równikiem. Charakteryzuje się ona stałym składem powietrza i spadkiem temperatury z wysokością.

Propagacja fal w troposferze jest silnie uzależniona od zjawisk meteorologicznych. Fale radiowe mogą być w niej **tłumione** i **rozpraszane** w stopniu zależnym od zakresu oraz może zachodzić **refrakcja**, czyli odchylenie toru fali od linii prostej. Refrakcja może być dodatnia (w stronę Ziemi) lub ujemna. Istnieje też **superrefrakcja**, czyli refrakcja nadkrytyczna, przy której promień zakrzywienia toru fali jest mniejszy od promienia Ziemi. Fala wraca wtedy na powierzchnię Ziemi.

Propagacja fali radiowej

Wpływ odbić wielokrotnych (**ang. multipath**) na kształt sygnału radiowego odebranego na fali powierzchniowej (w troposferze):





Propagacja fali radiowej

Jonosfera jest znacznie bardziej skomplikowanym mechanizmem. Jest ona mocno zjonizowaną przez promieniowanie słoneczne częścią atmosfery, znajdującą się powyżej 60km nad powierzchnią Ziemi. Oprócz Słońca czynnikami jonizującymi są promieniowane kosmiczne i pył kosmiczny wchodzący w kontakt z atmosferą.

Na dolnej granicy jonosfery występuje lokalne maksimum temperatury - około 400K. Wyżej temperatura spada, osiągając na wysokości 80km 200K, po czym znów zaczyna rosnać do ponad tysiąca kelwinów.

W jonosferze wyróżniono szereg warstw o różnych właściwościach. Ich grubość zmienia się zależnie od intensywności czynników jonizujących, szczególnie dobowej.



Propagacja fali radiowej

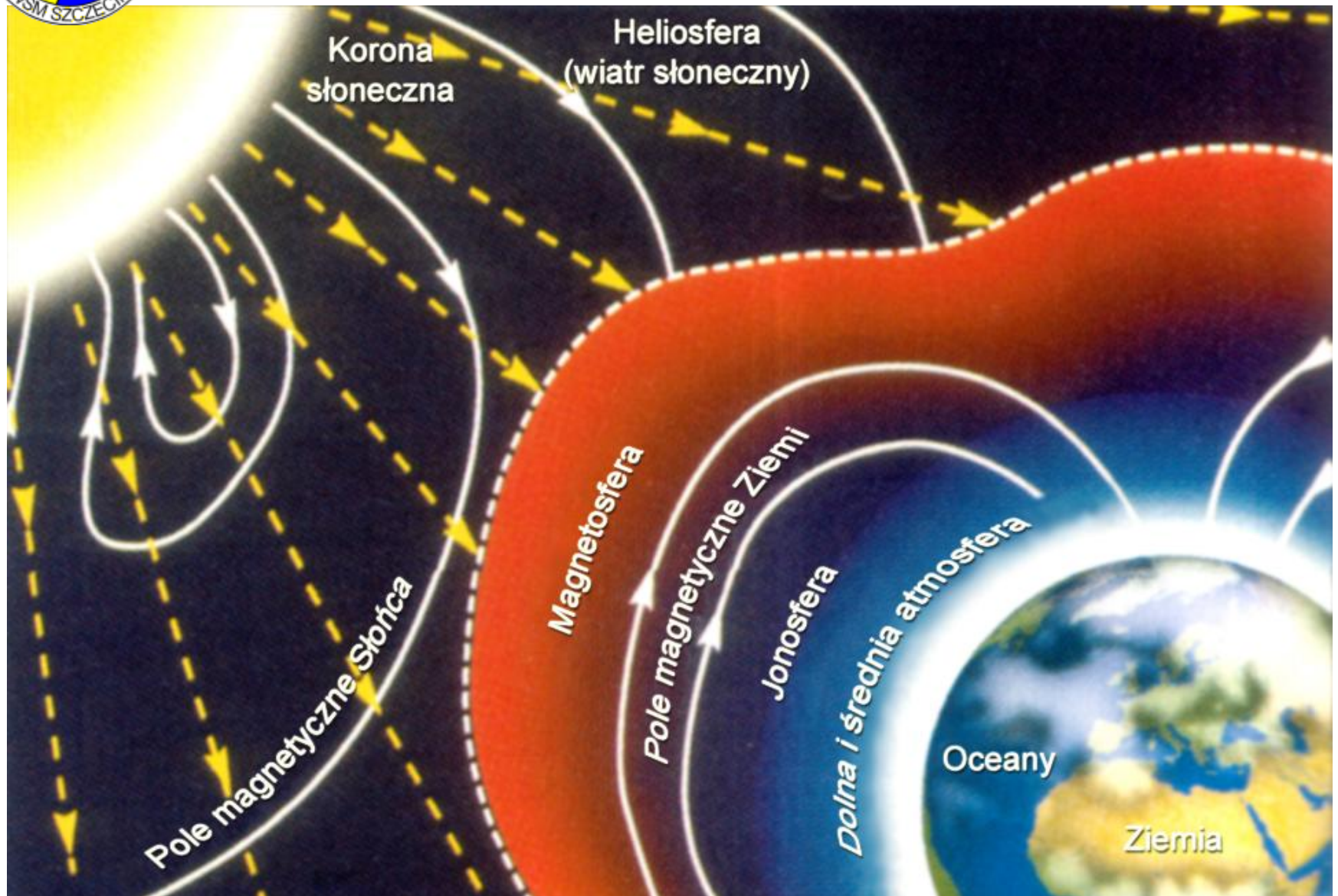
W ciągu dnia wyróżnia się cztery warstwy: **D** (60 - 90km), **E** (100 - 120km), **F1** (180 - 240km, istnieje tylko latem), **F2** (230 - 400km, dość niestabilna).

Nocą warstwy **D** i **F1** zanikają, a pozostałe warstwy wykazują własności słabsze niż za dnia.

Zresztą pomiary wykazały, że obszary o różnych właściwościach mają tak rozmyte granice, iż obecnie przedstawia się jonosferę złożoną z kilku maksimum gęstości elektronowej, których intensywność i wysokość podlegają stałym fluktuacjom, zarówno okresowym jak i przypadkowym.

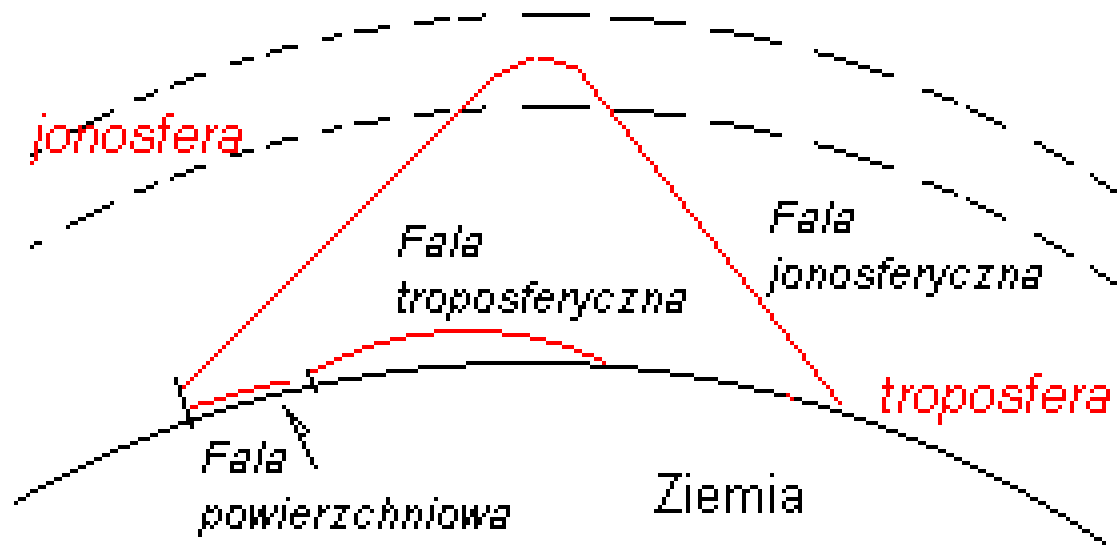


Propagacja fali radiowej





Propagacja fali radiowej

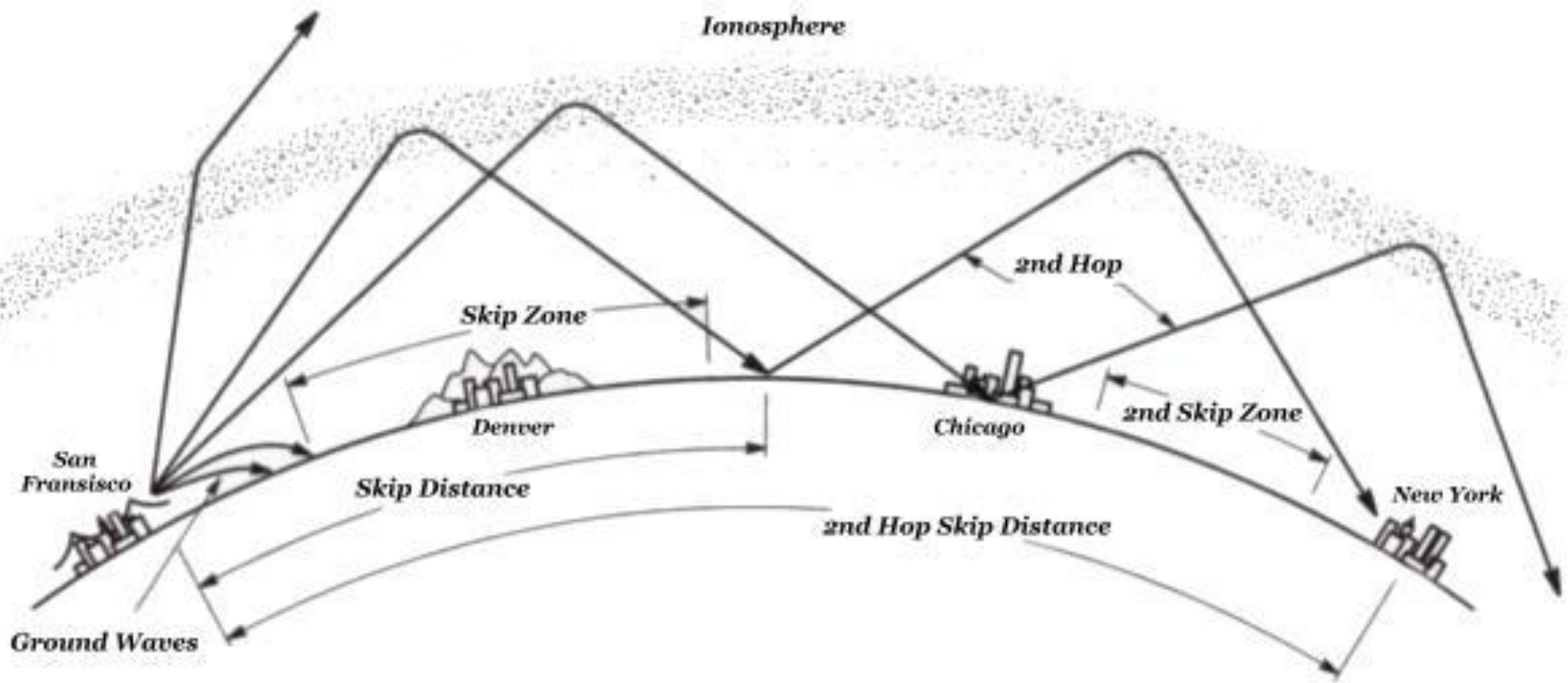


Zasadniczo fale radiowe odbijają się od jonosfery. Wiry i wiatry jonosferyczne, związane z oddziaływaniem mas Słońca i Księżycy, powodują dodatkowo rozproszenie fal. Do tego częstym zjawiskiem są odbicia fal od zjonizowanych śladów przejścia meteorów (czasem sięgających w dół do stratosfery).

Przejście fal elektromagnetycznych przez jonosferę jest uzależnione od długości fal i kąta ich padania na powierzchnię jonosfery. Pasma w których jest możliwa łączność z obiektami w przestrzeni kosmicznej nazywa się oknami radiowymi.

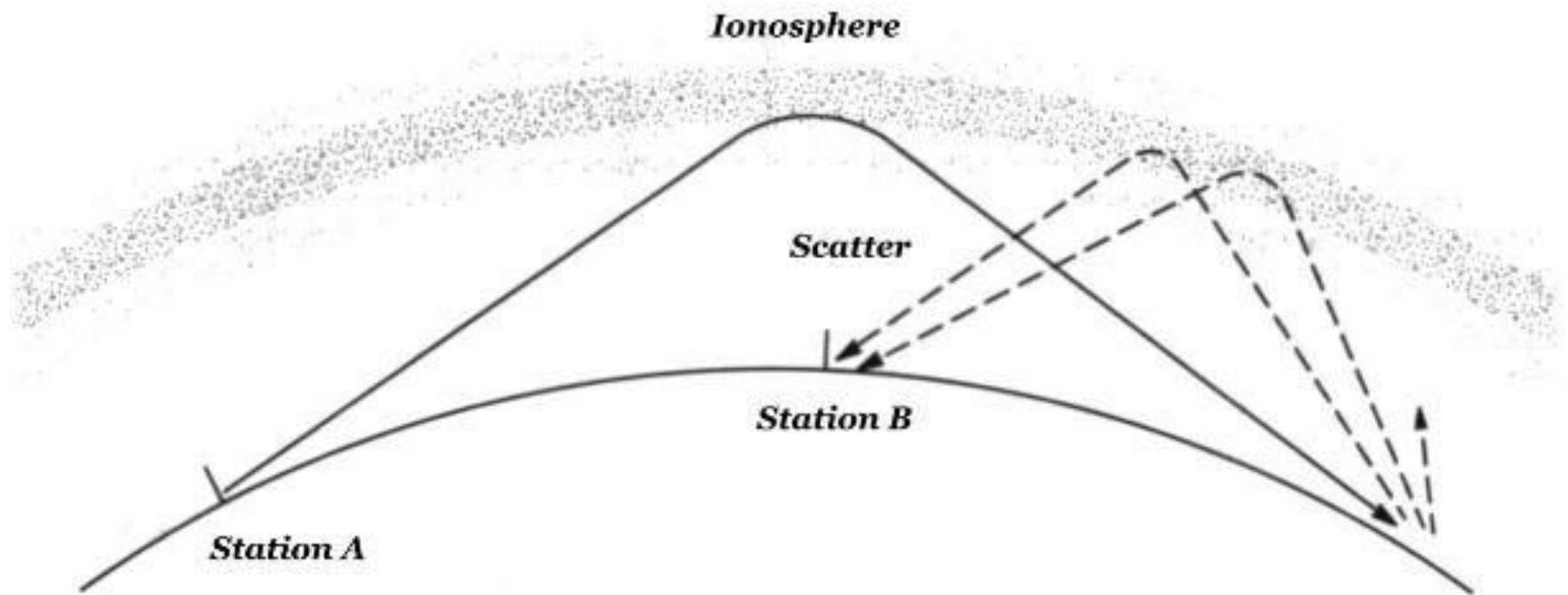


Propagacja fali radiowej



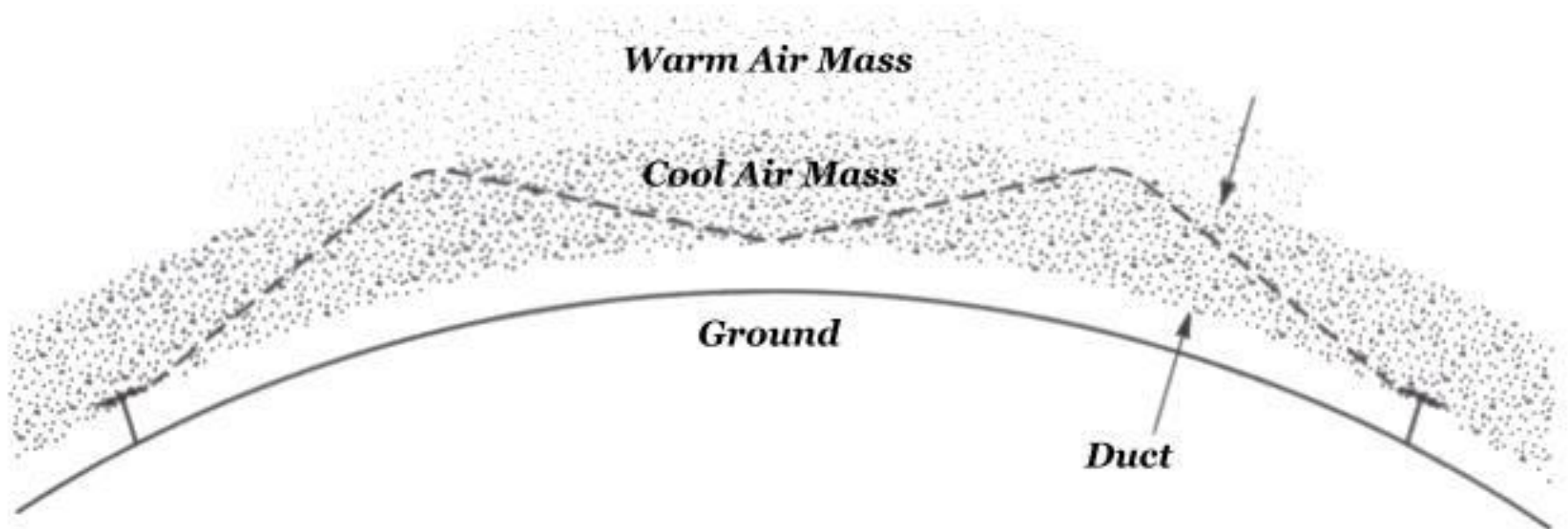
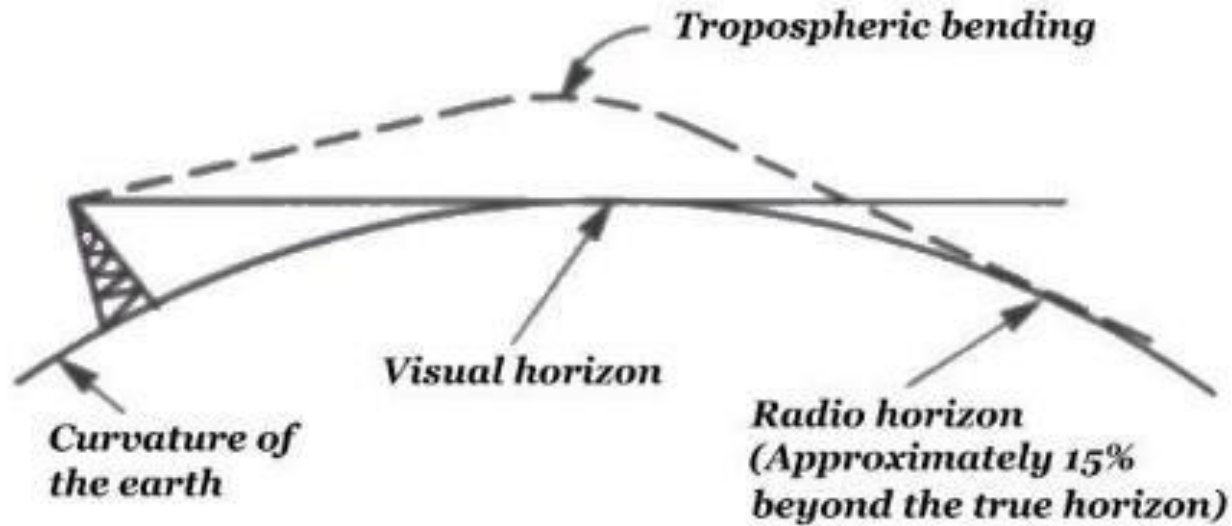


Propagacja fali radiowej





Propagacja fali radiowej





Rozchodzenie się fal długich i bardzo długich

Fale długie, wskutek bardzo małego tłumienia w gruncie, który dla tego zakresu zachowuje się praktycznie jak przewodnik, oraz dużej dyfrakcji, rozchodzą się w postaci fali powierzchniowej na dość duże odległości. Jednakże już w odległości 1000 - 2000 km od nadajnika natężenie pola fali jonosferycznej przewyższa natężenie pola fali powierzchniowej. Dlatego też w dalekosiężnej komunikacji na falach długich wykorzystuje się falę jonosferyczną. Zasięg łączności na falach długich wzrasta w nocy, co wynika z faktu, że tłumienie tych fal przez warstwę E jonosfery jest mniejsze niż tłumienie ich przez warstwę D, która w nocy zanika.

Warunki propagacji fal długich ulegają małym i powolnym zmianom w czasie, co jest dużą zaletą łączności długofalowej. Tłumienie fal długich przez jonosferę podlega wahaniom w rytmie dobowym, pór roku, rocznym i jedenastoletnim (okres aktywności słonecznej).



Rozchodzenie się fal średnich

O zasięgu na falach średnich w dzień decyduje fala powierzchniowa. Dzieje się tak, ponieważ warstwa D jonosfery nie odbija fal średnich, lecz je tłumi. Fale przedostają się do jonosfery i są odbijane przez warstwę E, ale tłumienie, a właściwie absorpcja, ich w warstwie D jest tak duża, że falę jonosferyczną można pominąć. Zjawisko to dotyczy szczególnie fali o długości 200 m. Z zapadnięciem zmroku warstwa D zanika, wskutek czego w ciągu nocy o zasięgu fal średnich decyduje fala jonosferyczna. Wtedy silne radiostacje średniofalowe są słyszalne na odległość powyżej 3000km.

Z powodu pewnej zmienności warunków propagacji fal jonosferycznych i ich interferencji z falą przyziemną, przed świtem występuje efekt nocny, objawiający się błędami radionamierzenia mogącymi dochodzić do 90 stopni.



Rozchodzenie się fal średnich

W nocy natomiast zdarza się czasem tzw. „efekt luksemburski”. Na skutek tak zwanych zjawisk nieliniowych w jonosferze jedna fala przejmuje modulację innej, w rezultacie czego jej modulacja staje się mieszanką obu, niekiedy z przewagą tej przechwyconej.

Zasięg łączności na fali powierzchniowej maleje wraz z długością fali. Rozchodzenie się fali powierzchniowej jest też silnie uzależnione od rodzaju (konkretnie od przewodności) powierzchni Ziemi. Największy zasięg uzyskuje się nad morzem, a najmniejszy - nad terenem suchym (piaski, tereny miejskie). Na styku tych środowisk może wystąpić zjawisko brzegowe, objawiające się załamaniem kierunku rozchodzenia się fal powierzchniowych. Błąd wywołany efektem brzegowym rośnie wraz ze zmniejszaniem kąta między kierunkiem rozchodzenia się fali a brzegiem, z drogą przebytą przez falę nad lądem i ze wzrostem częstotliwości.



Rozchodzenie się fal pośrednich

Właściwości propagacyjne fal pośrednich mają charakter przejściowy pomiędzy typowymi właściwościami fal średnich a właściwościami fal krótkich. O przewadze jednych lub drugich właściwości decyduje częstotliwość, aktualny stan jonosfery i rodzaj terenu.

W zakresie częstotliwości powyżej 1,5 MHz fale powierzchniowe są silnie tłumione, szczególnie nad terenem suchym. Natomiast fale jonosferyczne w dzień nie są całkowicie wytłumione przez jonosferę. Pod tym względem warunki propagacji w jonosferze są w tym zakresie korzystniejsze niż dla fal średnich. W nocy krótsze fale pośrednie ulegają odbiciu tylko w przypadku wypromieniowania pod bardzo małym kątem do powierzchni jonosfery. Zasięg fali odbitej wynosi na ogół do kilku tysięcy kilometrów. Ze względu na silne tłumienie fali powierzchniowej na terenach lądowych, fale pośrednie były stosowane głównie w radionawigacji morskiej (system Decca).



Rozchodzenie się fal krótkich

Ze względu na krzywiznę Ziemi i tłumienie tego zakresu fal przez powierzchnię terenu zasięg fali powierzchniowej w zakresie fal krótkich jest niewielki: od kilkudziesięciu kilometrów od nadajnika (fale rzędu 100 m) do kilku kilometrów (fale rzędu 10 m). Jednakże fale krótkie mogą się odbić (raz lub wielokrotnie) od jonosfery i od Ziemi, umożliwiając na fali jonosferycznej łączność o zasięgu ogólnosiwiatowym.

Pierwszą niedogodnością łączności na falach krótkich jest fakt, że rozmaite częstotliwości krytyczne i maksymalne dla jonosfery leżą w tym zakresie fal. Fale krótkie są odbijane głównie przez warstwę F2, ale okresowo także inne (E i F1), w tym warstwy występujące sporadycznie. Stan i ilość warstw jonosfery zależy od kąta padania promieni słonecznych oraz od aktywności słonecznej, dlatego też w różnych przedziałach czasu warunki propagacyjne na obu końcach zakresu fal krótkich mogą ulegać zmianom.



Rozchodzenie się fal krótkich

O wartości maksymalnej użytecznej częstotliwości w zakresie fal krótkich decydują pory doby, pory roku i faza cyklu aktywności słonecznej. Ogólnie częstotliwość ta jest większa w dzień niż w nocy, jej nocna wartość jest większa w lecie, a wartość dzienna zimą (szczególnie przed południem).

W praktyce zdarza się odchylenie rzeczywistej drogi fal krótkich od trasy najkrótszej (ortodromy). Zjawisko to nazywamy **propagacją pozaortodromową**. Spowodowane jest ono zmianami wysokości warstw jonosferycznych w obszarach wschodu i zachodu Słońca - na przejściu pomiędzy obszarem oświetlonym a strefą cienia następuje nachylenie pułapu jonosfery. Odbicie od warstwy nachylonej powoduje czasowe odchylenie toru fali. Podobnie dzieje się wskutek odbić od nachylonej powierzchni terenu w miejscu odbicia fali od Ziemi. Zmiany wysokości jonosfery wywołują dodatkowo efekt Dopplera.



Rozchodzenie się fal krótkich

Poważne pogorszenia łączności na falach krótkich są spowodowane przez burze jonosferyczne. Częstotliwość występowania burz jonosferycznych jest związana z przebiegiem jedenastoletniego cyklu aktywności słonecznej - najczęściej w latach maksimum plam słonecznych. Burza jonosferyczna trwa zazwyczaj od kilku godzin do paru dni, przeważnie jednak nie dłużej niż dwie doby.

Szczególnym rodzajem zaburzenia jonosferycznego jest zjawisko zaniku powszechnego, czyli zaniku odbioru fal krótkich na całej półkuli oświetlonej przez Słońce. Normalnie zanik powszechny jest krótkotrwały; od kilku minut do 2 - 3 godzin. Najdłużej trwa na mniejszych częstotliwościach zakresu. Przyczyną zaniku powszechnego są rozbłyski w chromosferze Słońca, czyli protuberancje, którym towarzyszy wzmożone promieniowanie ultrafioletowe, a także korpuskularne i kosmiczne.



Rozchodzenie się fal krótkich

Zanik powszechny jest spowodowany przez promieniowanie ultrafioletowe, które biegnąc z prędkością światła dochodzi do Ziemi i wywołuje wzrost jonizacji warstwy D i w efekcie gwałtowny wzrost absorpcji fal krótkich.

Innym efektem charakterystycznym dla fal krótkich jest zjawisko echa. Jego źródłem jest zaleta tego zakresu fal, czyli ogólnoświatowy zasięg. Fala z nadajnika może docierać do odbiornika zarówno najkrótszą drogą jako sygnał bezpośredni, albo jako sygnał pośredni po okrążeniu Ziemi. A może to zrobić nawet wielokrotnie. Różnicy drogi sygnałów bezpośredniego i pośredniego równej 1000 km odpowiada różnica czasu odebrania sygnałów około 3 milisekund. Zjawisko echa występuje najczęściej, gdy nadajnik i odbiornik znajdują się w strefie zmiany pory doby (w strefie półmroku). Droga obu sygnałów przebiega wtedy wzdłuż strefy półmroku.



Rozchodzenie się fal ultrakrótkich i mikrofal

Fale ultrakrótkie rozchodzą się w zasadzie prostoliniowo, podobnie jak światło widzialne. Podlegają one odbiciu od obiektów o dużej gęstości, oraz rozpraszaniu i tłumieniu w atmosferze i innych ośrodkach.

Gdyby stwierdzenie takie było w stu procentach ściśle ich zasięg powinien ograniczać się do horyzontu optycznego. W rzeczywistości zasięg fal ultrakrótkich jest większy dzięki refrakcji troposferycznej, dyfrakcji, czyli załamaniu toru fali na krawędzi horyzontu czy wzniesień i budynków, no i niekiedy dzięki odbiciom od śladów meteorytów w atmosferze. W praktyce stosuje się uproszczoną zależność od sumy pierwiastków wysokości anten nadawczej i odbiorczej przemnożonej przez współczynnik 2.3 dla warunków normalnych [Mm].



Rozchodzenie się fal ultrakrótkich i mikrofal

Rozpraszaniu fal ultrakrótkich towarzyszą fluktuacje wynikające ze zmian stopnia refrakcji i zmienności zjawisk meteorologicznych. Tłumienie jest spowodowane głównie obecnością wody pod postacią opadów (deszczu, śniegu, gradu, mgły, itd) i pary wodnej. Intensywność tłumienia zależy od długości fali; dla fal poniżej 10 cm (pasmo radarowe) tłumienie gwałtownie rośnie. W radiolokacji wpływ tłumienia sygnału przez opady zmniejsza się przez stosowanie polaryzacji kołowej fal i tzw. pracę **diversity**, polegającą na jednoczesnej pracy dwóch kanałów nadawczo - odbiorczych radaru z różnymi częstotliwościami powtarzania impulsów.



Widmo fali elektromagnetycznej

