

Wprowadzenie do propagacji KF

tłumaczenie artykułu z miesięcznika *Radio Communication*, maj 2007

Autor: Gwynn Williams; tłumaczenie: Krzysztof Słomczyński

Co to jest propagacja fal radiowych? Jak ta propagacja działa? Co powoduje działanie propagacji i jakie efekty dodatnie i ujemne są z nią związane? To tylko kilka z szeregu pytań, na które odpowiedź znajduje się poniżej. W przeszłości propagację wielokrotnie opisywano jako sztukę czarnoksiężską. Pomimo tego, podstawy są tu naprawdę całkiem proste; chociaż zrozumienie pewnych szczegółów wymaga pewnej wiedzy i przemyślenia.

PODSTAWY PROPAGACJI

Po pierwsze, potrzebna jest nam jonosfera, i na nasze szczęście, dysponujemy takową otaczającą Ziemię na wysokości od około 50 km do ponad 1000 km. Szereg cząsteczek jonosfery ulega jonizacji na skutek promieniowania Słońca powodowanego przez zjonizowane gazy i plazmę. Region ten nazywamy jonosferą. Jonizacja jest procesem w którym ujemnie naładowane elektrony są usuwane z obojętnych atomów lub cząsteczek, w wyniku czego powstają jony o ładunku dodatnim oraz swobodne elektrony. Nazwa jonosfera pochodzi od tych właśnie dodatnich jonów, jednakże to znacznie lżejsze i bardziej swobodnie poruszające się elektrony są decydujące dla propagacji fal radiowych w zakresie krótkofalowym (3-30 MHz).

Na **Rys. 1** pokazano typowy wykres gęstości elektronów w jonosferze. W porze dziennej występują cztery regiony jonosferyczne: D, E, F₁ i F₂. Odpowiadają one wysokościami: region D – 50 do 90 km, region E – 90 do 140 km, region F₁ – 140 do 210 km (występuje nie zawsze) i region F₂ – ponad 210 km. W porze dziennej region E może obejmować obszary bardziej intensywnej jonizacji (sporadyczna warstwa E), zaś w niektórych okresach cyklu słonecznego, nie występują odrębne regiony F₁ i F₂, które łączą się w jeden region F.

W porze nocnej, regiony D, E i F₁ zanikają, pozostaje jedynie region F₂, (ogólnie zwany regionem F). Nie jest rzadkością występowanie w godzinach nocnych sporadycznej warstwy E na wysokości około 100 km. Regiony jonosferyczne nie są od siebie odseparowane, przejście od jednego do drugiego odbywa się w sposób łagodny, obszary o największej gęstości elektronów w każdym regionie jonosferycznym noszą nazwę warstw; w warstwach tych załamują się najwyższe częstotliwości dla danego regionu. Niezależnie od zmian gęstości elektronów, każdy region charakteryzuje się różnymi własnościami chemicznymi i fizycznymi. Regiony D, E i F₁ są zależne od słońca, gdyż występują one tylko w porze dziennej. Region F jest zależny od innych czynników takich jak wiatry i pole magnetyczne Ziemi. Jego obecność w porze nocnej sprawia, że tworzy on warstwę istotną dla łączności krótkofalowej.

Jonizację jonosfery powodują dwa rodzaje promieniowania słonecznego. Są to ekstremalne promieniowanie ultrafioletowe (EUV, o długości fali w przybliżeniu 10 do 100 nm) oraz promieniowanie X (o długości fali w przybliżeniu 10⁻³ do 10 nm). Promienie X i zakres promieniowania przypadający wokół 122 nm powodują jonizację regionu D. Promienie X o większej długości fali niż tworzące region D, wraz z promieniowaniem EUV, powodują utworzenie regionu E. Promieniowane EUV jest ważniejszym promieniowaniem jonizującym, wytwarzanym przez jasne, gorące powierzchnie, które często otaczają grupy plam słonecznych, jak to widać na **Rys. 2**. Intensywność promieniowania EUV przez Słońce ulega wahaniom miesięcznym, rocznym i zgodnie z cyklem słonecznym; jest ono absorbowane przez jonosferę. Szereg instytucji i laboratoriów prowadzi regularne pomiary jonosfery.

W regularnych odstępach czasu mierzone są parametry takie, jak różne krytyczne częstotliwości dla poszczególnych warstw. Częstotliwość krytyczna to taka, która ulega pionowemu odbiciu od warstwy jonosferycznej. Tak więc, każda warstwa ma własną częstotliwość krytyczną, oznaczaną jako foF₂ (częstotliwość krytyczna warstwy F₂, foE (częstotliwość krytyczna warstwy E), itp. Innymi mierzonymi parametrami są wysokości poszczególnych warstw i ich gęstości elektronów.

Istnieje pięć głównych czynników wpływających na zmiany jonosfery: cykle słoneczne (plamy na Słońcu), zmiany dobowe, zależność od pór roku, zależność od szerokości geograficznej i zależność od wysokości.

Na **Rys. 3** przedstawiono ostatnie pięć cykli słonecznych; widoczne są ich szczyty i minima. Przy dużej liczbie plam słonecznych występuje intensywne promieniowanie EUV i jonosfera ziemska jest silnie zjonizowana. Przy minimach występuje odwrotny efekt.

Na **Rys. 4** przedstawiono typowy przebieg dobowy częstotliwości krytycznych, zarówno dla okresu dużej jak i małej liczby plam słonecznych.

Bardziej skomplikowane są skutki zmiany pór roku; częstotliwości dla regionu E są wyższe w lecie niż w zimie, jednakże zmiany częstotliwości w regionie F są bardziej zagniatwane. Na obu półkulach częstotliwości w południe na ogół osiągają maksimum wokół równonocy (marzec i wrzesień). Podczas minimum słonecznego, letnie częstotliwości w południe są, jak można się spodziewać, zwykle większe niż w zimie, jednakże podczas maksimum słonecznego, częstotliwości zimowe mają tendencję być wyższymi niż w lecie. Dodatkowo, częstotliwości wokół równonocy są wyższe niż w okresie lata bądź zimy, zarówno dla maksimum jak i minimum aktywności słońca.

Zmiany jonizacji w funkcji wysokości przedstawione są na rys. 1, zaś zmiany częstotliwości w funkcji szerokości geomagnetycznej przedstawiono na **Rys. 5**.

Absorpcja jonosferyczna na większości tras krótkofalowych występuje głównie w regionie D i dodatnio koreluje z gęstością elektronów w tym regionie. Oznacza to, że absorpcja jest większa, gdy większa jest gęstość elektronów w regionie D. Region D charakteryzuje się wysoką częstotliwością kolizyjną (w porównaniu z innymi regionami jonosferycznymi) pomiędzy elektronami a cząsteczkami obojętnymi i jonami; energia fal radiowych jest tracona w wyniku rekombinacji elektronów z tymi cięższymi cząsteczkami. Gęstość elektronów w regionie D osiąga maksimum przy największej intensywności promieniowania jonizującego (EUV i promienie X). Tak więc absorpcja jest największa w porze południowej i w lecie, oraz przy maksimum słonecznych. Absorpcja zależy też od szerokości geograficznej, największa występuje wokół równika i maleje wraz ze zwiększaniem się szerokości.

Podczas dużych wybuchów na Słońcu, znacznie wzrasta słoneczne promieniowanie X, podnosząc poziom jonizacji w regionie D, co w wyniku zwiększa absorpcję sygnałów krótkofalowych. Takie zjawisko jest zwane zanikami krótkofalowymi i uniemożliwia łączność jedynie na trasach dziennych.

Sporadyczna propagacja E w zasadzie występuje nieregularnie i obejmuje obszary wewnątrz regionu jonosferycznego E o podwyższonej jonizacji i gęstości elektronów, występuje ona zazwyczaj na wysokościach między 90 i 130 km. Sporadyczne E na małych i średnich szerokościach występuje głównie w porze dziennej i wczesnym wieczorem; przede wszystkim w miesiącach letnich. Z drugiej strony, rozproszona warstwa F jest związana z nieregularnościami w jonosferze, mogącymi pogorszyć komunikację. W małych szerokościach geograficznych rozproszone F występuje głównie w porze nocnej i w czasie równonocy.

W rejonach równikowych, rozproszone F najczęściej występuje przy spokojnym polu geomagnetycznym. Przy średnich szerokościach, rozproszone F występuje rzadziej niż w rejonie równikowym i na dużych szerokościach, jednakże jej występowanie jest związane z aktywnością geomagnetyczną i następuje częściej w porze nocnej i w zimie. Na wszystkich szerokościach, rozproszone F przejawia tendencję do wzrostu wraz ze spadkiem foF_2 .

Studia nad jonosferą i polem magnetycznym Ziemi wykazały, że istnieje określona zależność częstotliwości krytycznych dla warstwy F w funkcji szerokości geograficznej, związana ze sztormami geomagnetycznymi. W pobliżu równika geomagnetycznego częstotliwości krytyczne mają tendencję, początkowo obniżenia przy pojawieniu się sztormu geomagnetycznego, a następnie nieznacznego wzrostu. Na średnich i wysokich szerokościach, częstotliwości krytyczne zazwyczaj mają tendencję do nieznacznego wzrostu a następnie znacznego spadku. Poszczególne sztormy jednakże, mogą lecz nie muszą stosować się do tych ogólnych zasad. Podczas sztormów jonosferycznych wysokość warstwy F zwykle ulega obniżeniu, co może mieć wpływ na skuteczność jonosferycznej komunikacji KF.

PROPAGACJA FAL RADIOWYCH

Fale radiowe w zakresie KF mogą docierać do miejsca odbioru (a) jako fala przyziemna, rozchodząca się wzdłuż powierzchni na niewielkich odległościach, do 100 km nad ziemią i do 300 km ponad morzem; (b) jako fala bezpośrednia lub horyzontalna (wzdłuż linii wzroku), fala ta może interferować z falą odbitą od Ziemi, zależnie od odległości między terminalami, częstotliwości i polaryzacji; (c) jako fala przestrzenna, załamana w jonosferze, rozchodząca się na wielkich odległościach, nawet wokół Ziemi. Jonosfera nie załamuje wszystkich fal KF: warstwy D i niższa E absorbują fale o zbyt niskich częstotliwościach; fale o zbyt wysokich częstotliwościach przenikają przez jonosferę. Użyteczny zakres częstotliwości ulega zmianom: w cyklu dobowym, pór roku i w ciągu cykli słonecznych wraz z liczbą plam słonecznych, zmienia się też zależnie od miejsca i wykorzystywanej warstwy jonosferycznej. Dolna graniczna częstotliwość zależy również od poziomu szumów, skuteczności anteny, mocy nadajnika tłumienia przez warstwę E i absorpcji przez jonosferę. Absorpcja również zależy od powyższych czynników.

Ważną zależnością między falami padającymi pionowo i skośnie, jest współczynnik nachylenia. Większość danych jonosferycznych jest rejestrowana przy padaniu pionowym (tj. w pobliżu 90°), podczas gdy komunikacja KF jest rejestrowana przy pomiarze tras o skośnym kącie padania (między około 3° a 40°). Dane przy padaniu pionowym mogą być użyte do określenia trasy skośnej, współczynnik nachylenia warstwy F dla długości trasy 3000 km, oznaczony jako $M(3000)F_2$, jest przeliczony z jonogramów dla pionowego kąta padania przy użyciu tablic współczynnika odległości. Na podstawie współczynnika nachylenia i wartości foF_2 , określana jest maksymalna częstotliwość użyteczna (MUF – maximum usable frequency). Zależność przedstawia się jak poniżej.

$$MUF = foF_2 \times \text{współczynnik nachylenia}$$

MUF dla danej trasy zmienia się zależnie od pory doby, pory roku i cyklu słonecznego. Dla regionu F, MUF obejmuje zakres rozciągający się od dolnego punktu skali MUF (1) zwanego optymalną częstotliwością pracy (OWF – optimum working frequency), poprzez średnią MUF do górnego punktu skali MUF (10). Te wartości MUF zapewniają odpowiednio 90%, 50% i 10% szans pomyślnej propagacji. Dla warstwy E, zajmujemy się tylko średnią EMUF (MUF dla warstwy E). Ilustruje to **Rys 6**. Podczas gdy MUF przybiera ściśle określone wartości, najniższa częstotliwość użyteczna (LUF – lowest usable frequency) ma wartości płynne. LUF jest najniższą częstotliwością umożliwiającą akceptowalny poziom usługi. LUF dla danej trasy jest określona przez straty absorpcyjne wzdłuż trasy i zmienia się zależnie od długości trasy, pory dnia i innych poprzednio wymienionych czynników. Przy komunikacji za pomocą regionu F, LUF zależy również od obecności regionu E.

Dla trybu F z jednym skokiem, jeśli częstotliwość pracy jest niższa niż EMUF dla dwóch skoków, nie jest możliwa propagacja poprzez warstwę F z uwagi na ekranowanie przez warstwę E. Dla długich tras poprzez warstwę E, fala będzie ostatecznie absorbowana z uwagi na dużą liczbę skoków i silną absorpcję w regionie D. Ponieważ warstwa E jest wykorzystywana przy niższych częstotliwościach, absorpcja będzie tu większa niż dla propagacji przez region F. Sporadyczna warstwa E może również ekranować fale załamane w warstwie F, gdy fala przebywa część swej trasy poprzez warstwę E_s. Skutkiem będzie nie dotarcie fali do zamierzonego punktu przeznaczenia.

Częstotliwość ograniczona przez absorpcję (ALF – absorption limiting frequency) jest używana dla określenia dolnej granicy użytecznego pasma częstotliwości. ALF jest określana ze wzoru empirycznego (ustalonego na podstawie doświadczeń) i uwzględnia zarówno absorpcję jak i ekranowanie przez warstwę E.

Rozpatrzmy zmiany częstotliwości nadawania, kąt promieniowania anteny i odległość na jaką ma być ustanowiona komunikacja.

- Wraz ze wzrostem częstotliwości w kierunku MUF, fale ulegają odbiciu wyżej w jonosferze i odległość wzrasta – przebieg 1 i 2 na **Rys. 7**.
- Po osiągnięciu MUF dochodzimy do maksymalnej odległości – przebieg 3.
- Po przekroczeniu MUF, fala przenika przez jonosferę – przebieg 4.

Dla zapewnienia komunikacji na stałej trasie, może okazać się konieczne dobrana kąta promieniowania (elewacji) anteny dla skompensowania zmian w jonosferze powodujących zwiększenie MUF. Przy małych kątach elewacji, długość trasy jest największa – przebieg 1 na **Rys. 8**. Wraz ze wzrostem kąta elewacji, maleje długość trasy gdyż fala załamuje się w wyższych obszarach jonosfery – przebiegi 2 i 3. Odległość maleje do wartości minimalnej (skip distance) przy krytycznym kącie elewacji – przebieg 3.

Wokół nadajnika istnieje strefa martwa (skip zone), w której nie jest możliwa komunikacja jonosferyczna na danej częstotliwości. Przy zwiększaniu kąta elewacji ponad wartość krytyczną, fala przenika przez jonosferę – przebieg 4. Strefa martwa nie ma miejsca, jeśli częstotliwość pracy będzie niższa od częstotliwości krytycznej przy pionowym kącie padania, f_oF_2 , gdyż fala nie będzie przenikać przez jonosferę, nawet przy kącie elewacji anteny 90° , co ma zastosowanie przy pracy z wykorzystaniem propagacji NVIS (near-vertical incidence sky-wave).

Długość skoku jest to odległość pokryta przez sygnał radiowy po jego załamaniu w jonosferze i powrocie na Ziemię. Górna granica długości skoku jest określona przez wysokość jonosfery i krzywiznę Ziemi. Dla wysokości warstw E i F równych 100 km i 300 km, maksymalne długości skoku wynoszą odpowiednio 2000 i 4000 km. Cyfry te dotyczą kąta elewacji anteny 0° , co jest nadzwyczaj trudne do zrealizowania w praktyce. Bardziej realistyczny kąt elewacji 4° , zapewnia odległości skoku 1800 km i 3200 km, odpowiednio dla warstw E i F. Istnieje szereg trybów w jakich fala przestrzenna może się rozchodzić od nadajnika do odbiornika za pośrednictwem jonosfery. Tryb łączności, który wymaga najmniejszej liczby skoków między terminalami trasy, nosi nazwę trybu pierwszego rzędu. Tryb wykorzystujący w tym celu o jeden skok więcej, nosi nazwę trybu drugiego rzędu. Proste tryby wykorzystują tylko jedną warstwę, na przykład warstwę E. Programy prognozowania propagacji, przeznaczone dla trybów prostych, stosują oznaczenia 1E – jeden skok przez warstwę E, 1F – jeden skok przez warstwę F.

Możliwe są tryby proste wieloskokowe, takie jak 2E lub 3F, gdyż Ziemia może odbijać fale radiowe przychodzące z jonosfery z powrotem w jej kierunku. Na **Rys. 9** przedstawiono bardziej skomplikowane tryby oraz kombinacje załamania w obu warstwach E i F. Możliwe są też tryby propagacji poprzez dukty i po cięciwie.

Rozpatrzmy teraz pewne aspekty propagacji przynoszące niekorzystne skutki. Aktywność słońca może powodować zaniki, wynikłe ze zwiększonej absorpcji w regionie D. Ten rodzaj zaników jest zwany zanikami krótkofalowymi lub dziennymi, jest on zazwyczaj powodowany przez nagłe zakłócenia jonosferyczne (SID – sudden ionospheric disturbance). Zaniki wielościeżkowe wynikają z rozpraszania sygnału przez antenę nadawczą. Wynikłe stąd fale mogą ulegać odbiciu przez różne regiony jonosfery, co powoduje różnice amplitud i faz tych fal z uwagi na różne przebyte drogi. Nieregularności w jonosferze, takie jak rozproszona warstwa F, również mogą powodować szereg sygnałów różniących się w fazie. Sporadyczne warstwy E mogą albo całkowicie przesłonić warstwę F lub umożliwić częściowe przenikanie sygnału do regionu F. Zakłócenia znane jako ruchome zakłócenia jonosferyczne (TID – travelling ionospheric disturbances), mogą zakłócić daną warstwę tak, że sygnał będzie skupiany lub rozpraszany. Wynikiem będą okresowe zaniki rzędu 10 minut do jednej godziny. Również, gdy użyta częstotliwość jest bliska MUF, mogą wystąpić zaniki w wyniku martwej strefy, kiedy fala będzie raz załamywana, a raz będzie przenikać przez jonosferę, w takt fluktuacji stanu jonosfery. Innym aspektem niekorzystnym dla propagacji są szумы.

Istnieją trzy różne rodzaje szumów: atmosferyczne, galaktyczne i wytwarzane przez człowieka. Szумы atmosferyczne, powodowane przez burze, są głównym powodem zakłóceń w zakresach KF. Wytwarzane stąd szумы radiowe będą szczególnie zakłócać trasy przechodzące przez granicę dnia i nocy. Szумы atmosferyczne są większe w regionach równikowych i zmniejszają się wraz ze wzrostem szerokości geograficznej; efekt ten jest wyraźniejszy na niższych częstotliwościach.

Szумы galaktyczne pochodzą z naszej galaktyki; ponieważ muszą one przeniknąć przez jonosferę, do miejsca odbioru dotrą jedynie te częstotliwości, które przewyższają częstotliwość pionowego kąta padania. Bardziej narażone na tego typu szумы są anteny mające listki boczne pod wysokim kątem.

Szумы powodowane przez człowieka obejmują zakłócenia od systemów zapłonowych, przewodów, urządzeń spawalniczych, jak też szумы wewnętrzne generowane w systemach odbiorczych. Ten typ szumów jest zależny od gęstości zaludnienia i poziomu technologicznego społeczeństwa.

Ponieważ propagacja jonosferyczna jest zależna od słońca, poniżej podano kilka danych astronomicznych.

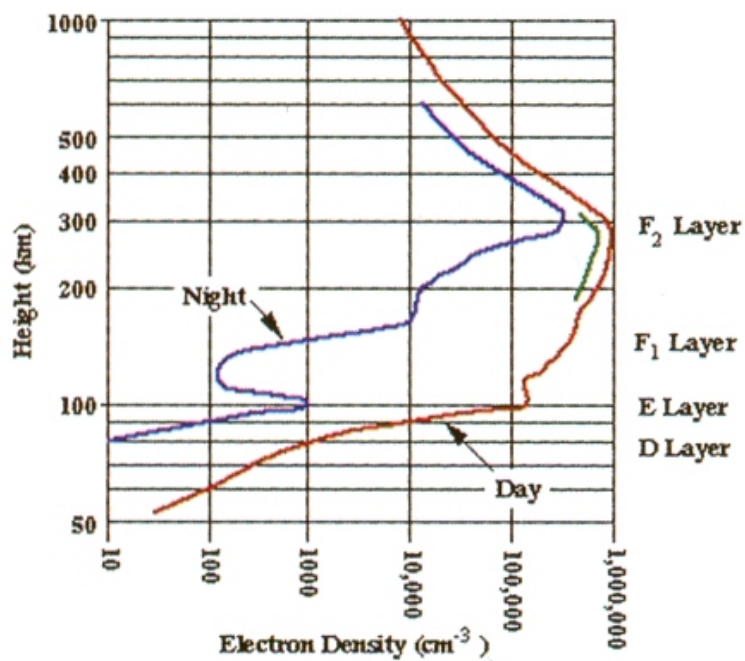
- Średnica Słońca wynosi 865.000 mil, czyli 109 razy więcej niż średnica Ziemi.
- Masa Słońca jest 330.000 razy większa niż Ziemi.
- Objętość Słońca jest około 1,3 miliona razy większa niż Ziemi, lecz średnia gęstość wynosi jedynie $\frac{1}{4}$ gęstości Ziemi.
- Patrząc z Ziemi, Słońce obraca się wokół swej osi raz na 27 dni. jednakże w przeciwieństwie do Ziemi, szybkość obrotu Słońca zależy od odległości od równika. Na równiku pełny obrót Słońca wynosi 25 dni, jednak w okolicy biegunów jest on większy od 30 dni.. Zjawisko to nazywa się obrotem różnicowym. (differential rotation).
- Odległość od Słońca do Ziemi wynosi 93 miliony mil, światło słoneczne potrzebuje 500 sekund na dotarcie do Ziemi.
- Temperatura powierzchni Słońca wynosi 5500°C . Temperatura we wnętrzu Słońca wynosi $15.000.000^{\circ}\text{C}$, zachodzą tam procesy nuklearne będące źródłem energii Słońca.
- Słońce promieniuje energię rzędu $3,8 \times 10^{23}$ W. W odległości Ziemi, ta energia odpowiada 1360 W/m^2 .

Korona słoneczna (najbardziej zewnętrzna warstwa atmosfery słonecznej) jest ogrzana do temperatury około dwóch milionów stopni. W wyniku tego, cząsteczki korony opuszczają Słońce w punkcie, gdzie nie są już związane siłami grawitacji. Ten ciągły strumień materii zwany jest wiatrem słonecznym (solar wind). Materiał wiatru słonecznego posiada ładunek elektryczny i jest wysoce przewodzący. Powoduje to, że część pola magnetycznego Słońca jest przenoszona wraz z wiatrem słonecznym. Naładowane cząsteczki i pole magnetyczne wiatru słonecznego współdziałają z polem magnetycznym Ziemi, tworząc obszar zwany magnetosferą – patrz Rys. 10. Między Słońcem a magnetosferą powstaje efekt łukowy (bow shock). Wiatr słoneczny powoduje kompresję magnetosfery od strony nadejścia i jej rozciągnięcie od strony przeciwnej, tworząc tzw. ogon magnetyczny. Wahania szybkości i gęstości wiatru słonecznego powodują odpowiadające im zmiany pola magnetycznego Ziemi. Jest to właśnie mechanizm wpływu Słońca na jonosferę Ziemi.

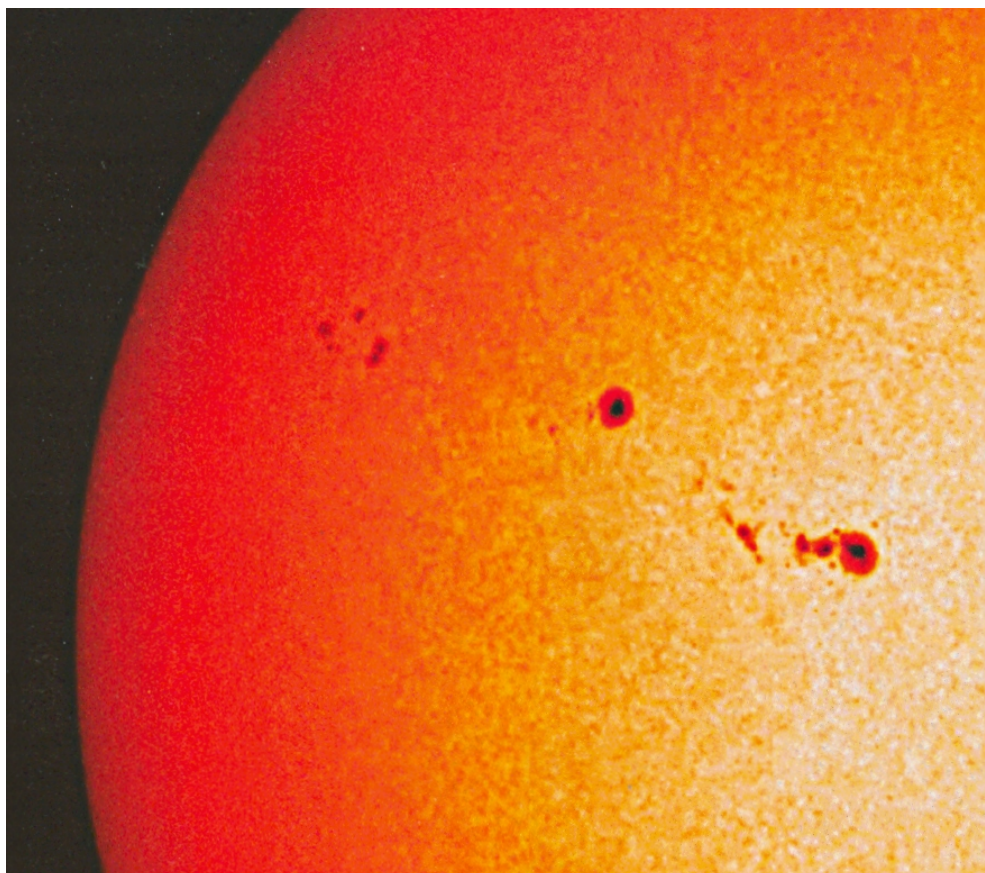
PODSUMOWANIE

Dla utrzymania radiokomunikacji krótkofalowej a więc umożliwienia użytkownikom tej części widma radiowego prowadzenie łączności na dużych odległościach, w naszej atmosferze muszą występować zjonizowane warstwy. Powyżej opisano mechanizmy powodujące istnienie jonosfery i metody jej wykorzystania. Opisano podstawy dla zrozumienia kiedy i w jaki sposób rozchodzą się sygnały radiowe. Oczywiście bardziej ambitne działania wymagają bardziej złożonych rozważań jak i kiedy odbywa się propagacja sygnałów radiowych. Otwiera się więc pole dla dalszego eksperymentowania.

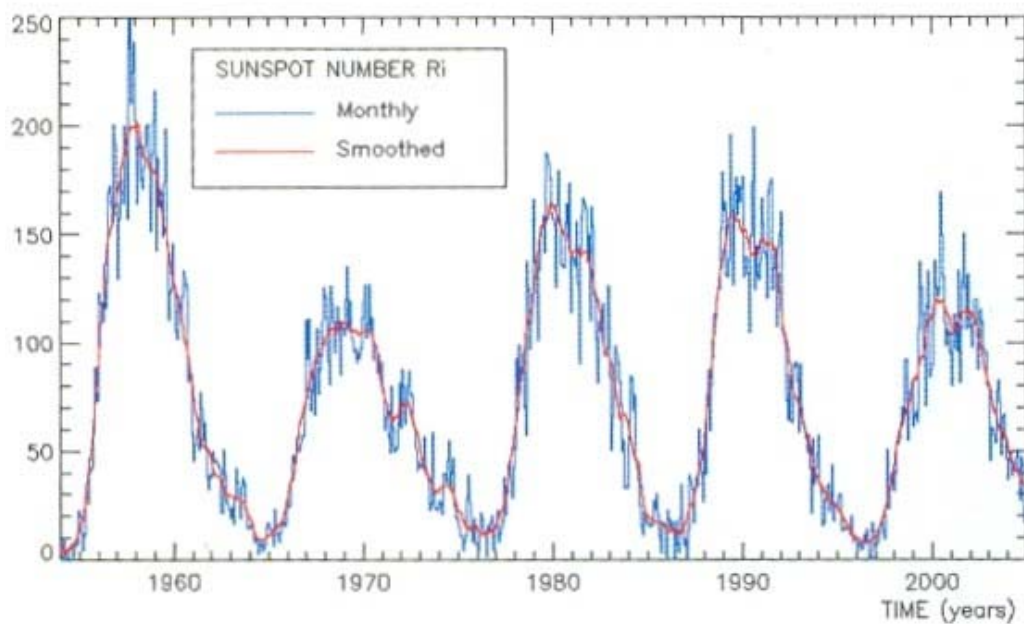
Na zakończenie, kilka uwag odnośnie wykorzystania programów komputerowych dla prognozowania propagacji. Programy takie uwzględniają większość, jeśli nie wszystkie różnorodne czynniki komunikacji jonosferycznej. Jedna uwaga: jeżeli dany program komputerowy jest oparty o VOCAP lub REC533 bądź ich pochodne, jako dane wejściowe można wpisywać tylko uśrednioną liczbę plam słonecznych. Jest to spowodowane użyciem algorytmów uwzględniających tylko takie dane, a użycie innych parametrów takich jak dzienny strumień słoneczny (solar flux), zniekształci wyniki.



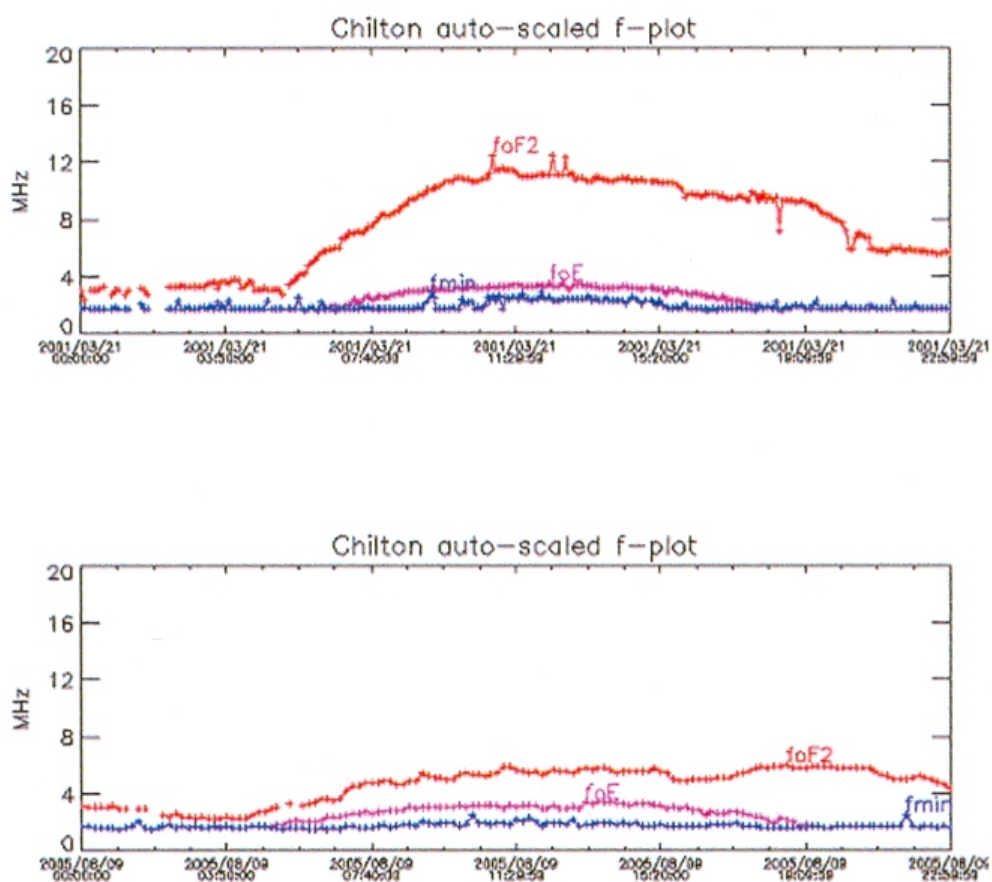
Rys. 1. Gęstość elektronów w jonosferze w porze dziennej i nocnej.



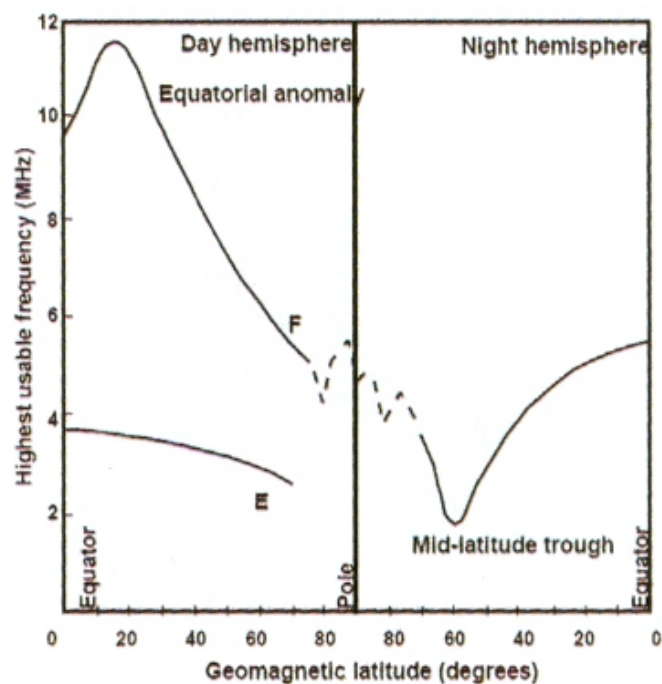
Rys. 2. Grupa plam słonecznych z widocznymi ciemnymi plamami; wokół plam znajdują się jaśniejsze obszary.



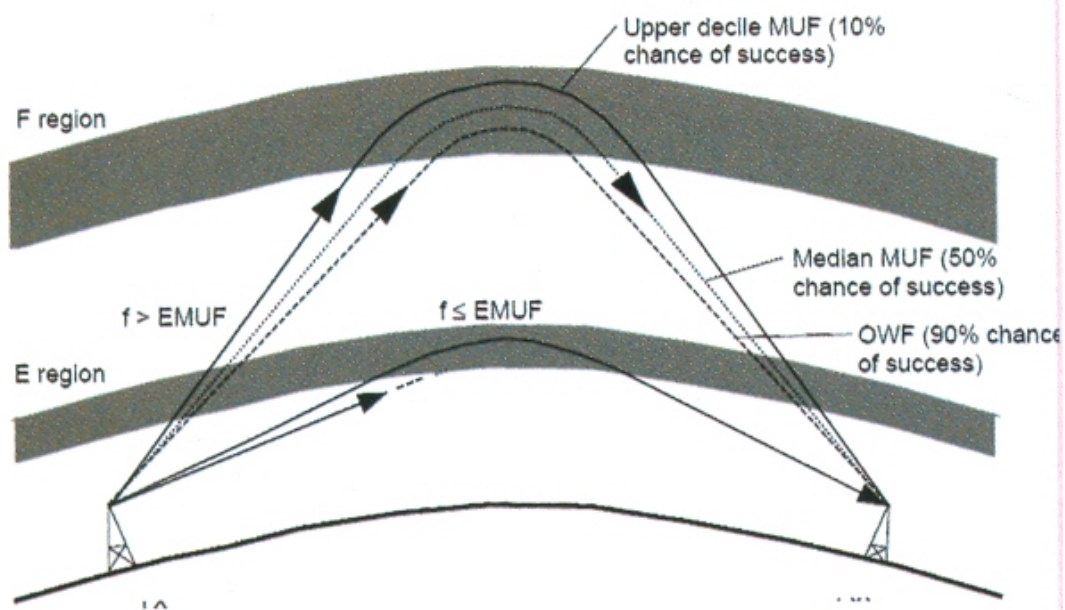
Rys. 3. Wahania miesięczne (kolor niebieski) i uśredniona (kolor czerwony) liczba plam słonecznych podczas ostatnich pięciu cykli 11-to letnich.



Rys. 4. Zmiany częstotliwości foF_2 ; u góry w okresie dużej liczby plam słonecznych, u dołu w okresie małej liczby plam słonecznych.

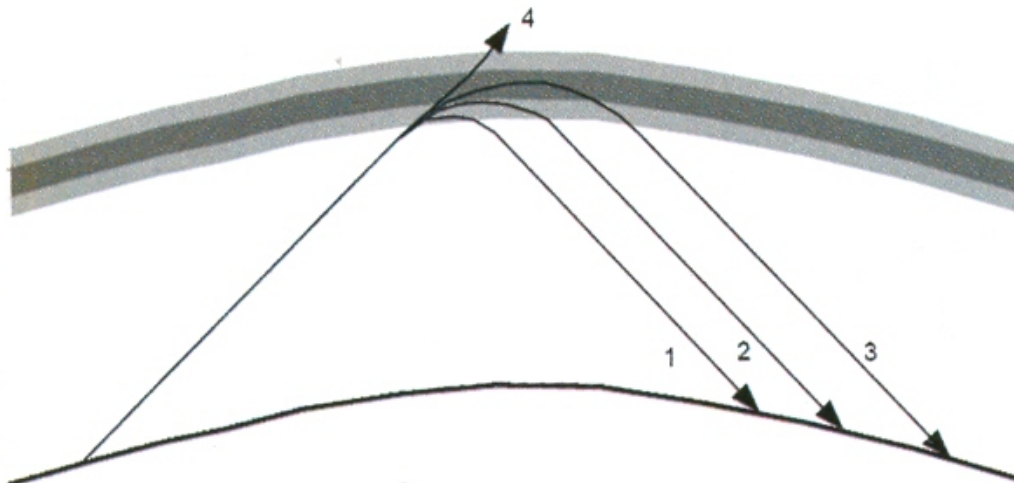


Rys. 5. Zmiany MUF w funkcji szerokości geomagnetycznej, na półkuli dziennej i nocnej.

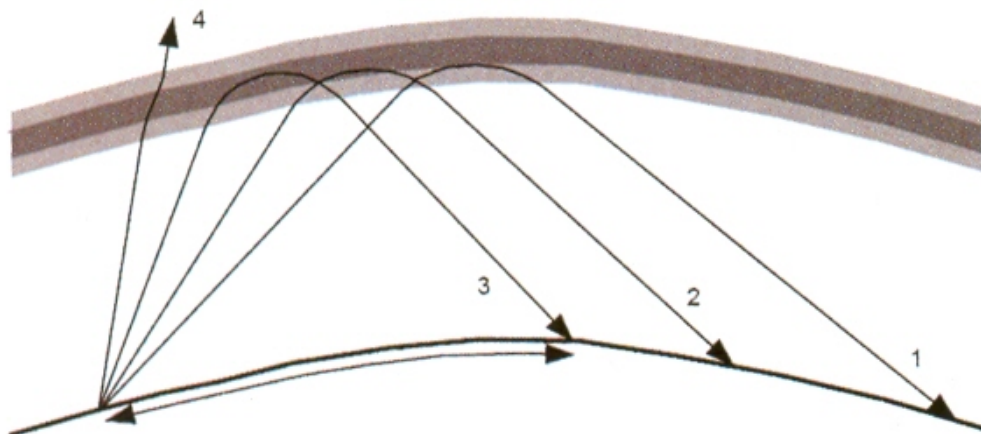


Rys. 6. Zakres użytecznych częstotliwości.

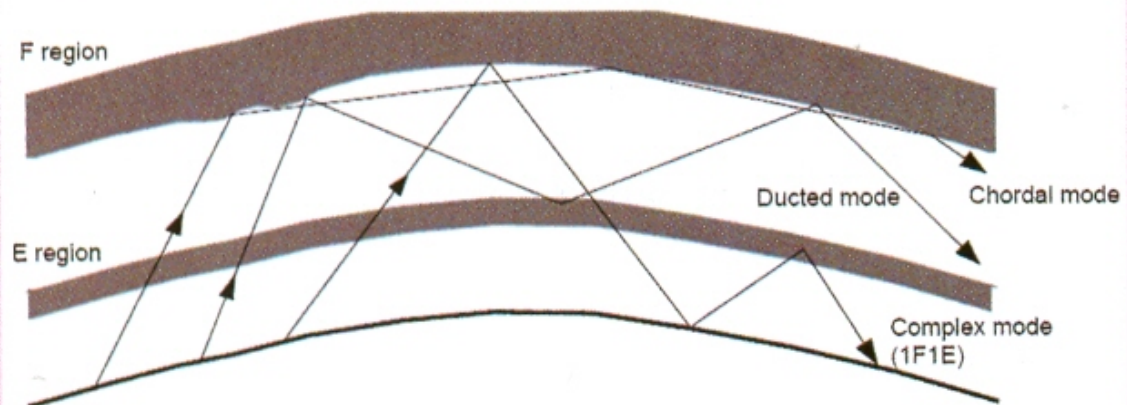
Jeśli częstotliwość f jest zbliżona do ALF, fala może podlegać absorpcji w regionie D.
 Jeśli częstotliwość jest wyższa od EMUF, propagacja odbywa się poprzez region F.



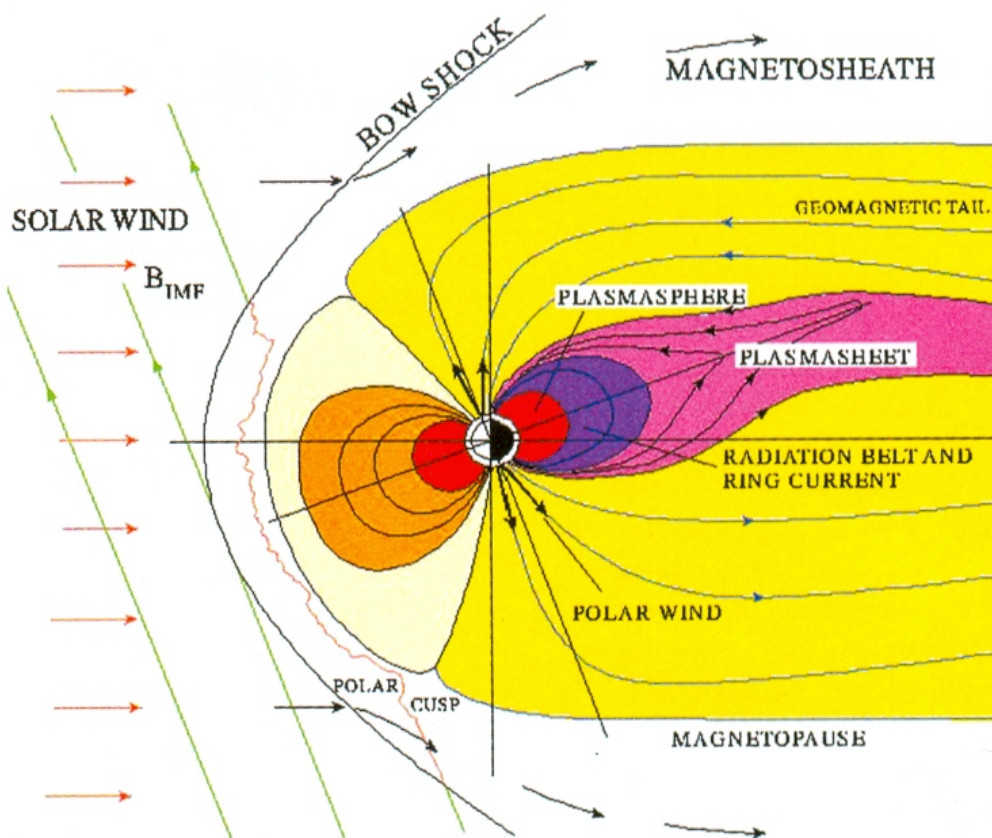
Rys. 7. Propagacja przy stałym kącie elewacji anteny.



Rys. 8. Propagacja wokół strefy martwej przy różnych kątach elewacji anteny.



Rys. 9. Różne tryby propagacji.



Rys. 10. Ziemia pod wpływem wiatru słonecznego.