

BIBLIOTEKA  
POLSKIEGO KRÓTKOFALOWCA

48

KRZYSZTOF DĄBROWSKI  
OE1KDA

JONOSFERA I PROPAGACJA  
FAL

WIEDENŃ 2020



© Krzysztof Dąbrowski OE1KDA  
Wiedeń 2020

Opracowanie niniejsze może być rozpowszechniane i kopiowane na zasadach niekomercyjnych w dowolnej postaci (elektronicznej, drukowanej itp.) i na dowolnych nośnikach lub w sieciach komputerowych pod warunkiem nie dokonywania w nim żadnych zmian i nie usuwania nazwiska autora. Na tych samych warunkach dozwolone jest tłumaczenie na języki obce i rozpowszechnianie tych tłumaczeń.

Na rozpowszechnianie na innych zasadach konieczne jest uzyskanie pisemnej zgody autora.

# **Jonosfera i propagacja fal**

**Krzysztof Dąbrowski OE1KDA**

**Wydanie 1  
Wiedeń, marzec 2020**

## Spis treści

1. Wstęp	6
1.1. Podstawy teoretyczne rozchodzenia się fal radiowych	6
1.2. Dalsze podstawowe terminy	9
1.3. Pole geomagnetyczne	13
1.4. Czynniki pozaziemskie	14
1.5. Właściwości elektryczne powierzchniowych warstw lądu i morza	15
1.6. Właściwości elektryczne troposfery	16
2. Zjawiska w jonosferze	17
2.1. Zjawiska fizyczne	18
2.2. Warstwy jonosferyczne	19
2.3. Dobowy i sezonowy układ warstw	21
2.4. Niejednorodność jonosfery	22
2.5. Rodzaje fal i sposoby ich propagacji	22
2.6. Zaniki odbioru	26
2.7. Burze jonosferyczne i geomagnetyczne	27
3. Fale długie i średnie	28
3.1. Fale myriametrowe	28
3.2. Fale kilometrowe	29
3.3. Fale hektometrowe	30
4. Fale krótkie	32
4.1. Fale dekametrowe	32
4.2. Rozszczepienie fali na promień zwyczajny i nadzwyczajny	36
4.3. Fale promieniowane prawie pionowo	41
5. Pasma 6 m	44
6. Fale ultrakrótkie	48
7. Mikrofałe	52
7.1. Przepuszczalność atmosfery w funkcji częstotliwości	53
7.2. Dodatkowe tłumienie atmosferyczne	54
7.3. Odbicia od samolotów	54
7.4. Łączności przez rozproszenie deszczowe	55
8. Prognozy propagacji	60
Dodatek A. Wykrywanie trzęsień ziemi przez odbiór sygnałów KF	65
Dodatek B. Tłumienie wolnej przestrzeni	68
Literatura i adresy internetowe	71

## Sommaire

### Ionosphère et la propagation des ondes hertziennes

1. Préface	6
1.1. Base théorique de la propagation des ondes hertziennes	6
1.2. Autres notions fondamentales	9
1.3. Champ géomagnétique	13
1.4. Facteurs extraterrestres	14
1.5. Propriétés électriques des couches superficielles de la terre et de la mer	15
1.6. Propriétés électriques de troposphère	16
2. Phénomènes ionosphériques	17
2.1. Phénomènes physiques	18
2.2. Couches ionosphériques	19
2.3. Arrangement diurne et saisonnière des couches	21
2.4. Hétérogénéité de ionosphère	22
2.5. Types des ondes et méthodes de leur propagation	22
2.6. Évanouissements de réception	26
2.7. Orages ionosphériques et géomagnétiques	27
3. Ondes longues et moyennes	28
3.1. Ondes à très basses fréquences	28
3.2. Ondes kilométriques	29
3.3. Ondes hectométriques	30
4. Ondes courtes	32
4.1. Ondes décamétriques	32
4.2. Fission des ondes sur rayons ordinaire et extraordinaire	36
4.3. Ondes à incidence quasi verticale	41
5. Bande des 6 m	44
6. Ondes ultracourtes	48
7. Hyperfréquences	52
7.1. Perméabilité à l'atmosphère en fonction de fréquence	53
7.2. Affaiblissement supplémentaire atmosphérique	54
7.3. Reflexions par les objets volants	54
7.4. Dispersion pluvieuse (Rain Scatter)	55
8. Prévisions de propagation	60
Annexe A. Détection des tremblements de terre par la réception HF	65
Annexe B. Affaiblissement d'espace libre	68
Bibliographie et les pages web	71

## 1. Wstęp

W przeciwieństwie do aparatury nadawczej i odbiorczej droga przesyłowa w łączności radiowej jest w dużej mierze niezależna od człowieka. Przesyłanie sygnałów zależy od szeregu czynników i okoliczności pozostających poza wpływem działania ludzkiego. W każdym miejscu, czasie i zakresie częstotliwości istnieją podyktowane prawami fizyki warunki propagacyjne. Powinny one być dobrze znane, aby można było zastosować odpowiednie środki techniczne celem ich najwłaściwszego wykorzystania. Sprawność każdego systemu łączności radiowej i jego niezawodność zależą w dużym stopniu od umiejętnego wykorzystania warunków propagacji fal elektromagnetycznych – nazywanych też potocznie falami radiowymi. Niewłaściwy wybór częstotliwości pracy może dać przykładowo skutki porównywalne z wielokrotnym zmniejszeniem mocy nadawania.

Mimo poważnego zaawansowania teorii propagacji fal wyniki obliczeń opartych o wzory i krzywe teoretyczne nieraz odbiegają od rzeczywistości, a oprócz tego niejednokrotnie daje się zaobserwować zjawiska trudne do jednoznacznego wyjaśnienia. Również obserwacje i doświadczenia zbierane przez krótkofalowców mogą wnieść wkład do dokładniejszego wyjaśnienia przyczyn takich zjawisk. Duża ilość obserwacji krótkofalarskich pozwala na ich statystyczne ujęcie przez specjalistów, a na dodatek ich prowadzenie nie pociąga za sobą żadnych kosztów dla instytucji badających propagację fal elektromagnetycznych.

Na prawdopodobieństwo dobrego odbioru mają wpływ nie tylko zmienność warunków propagacji ale również – ulegający zmianom – poziom zakłóceń: naturalnych (atmosferycznych, galaktycznych itp.) i technicznych.

Zjawiska rozchodzenia się fal nie mogą być rozpatrywane w oderwaniu od właściwości środowiska propagacji. Konieczna jest więc znajomość struktury atmosfery ziemskiej oraz wiedza o czynnikach wywierających wpływ na propagację. Należą do nich oprócz znajomości zjawisk geofizycznych (czynników jonizujących górne warstwy atmosfery, polu magnetycznym ziemskim, najważniejszych zjawiskach meteorologicznych) także wiadomości o zjawiskach heliofizycznych (czyli zachodzących na Słońcu).

Szczególnym środowiskiem propagacyjnym jest sztucznie stworzone środowisko internetowe, z którego korzystają systemy łączności wspomaganą internetowo, takie jak systemy transmisji cyfrowego głosu D-STAR, DMR, C4FM itp. Problematyka ta nie należy jednak do tematów niniejszego skryptu.

### 1.1. Podstawy teoretyczne rozchodzenia się fal radiowych

Teoria Maxwella i związane z nią równania stanowią teoretyczną podstawę elektrodynamiki w ogólności, a radiotechniki w szczególności. Liczba opracowanych w 1863 roku przez Maxwella równań wynosiła wprawdzie początkowo 20, ale w 1885 roku zostały one przez Heaviside'a sprowadzone do postaci czterech i tak już zostało do dzisiaj.

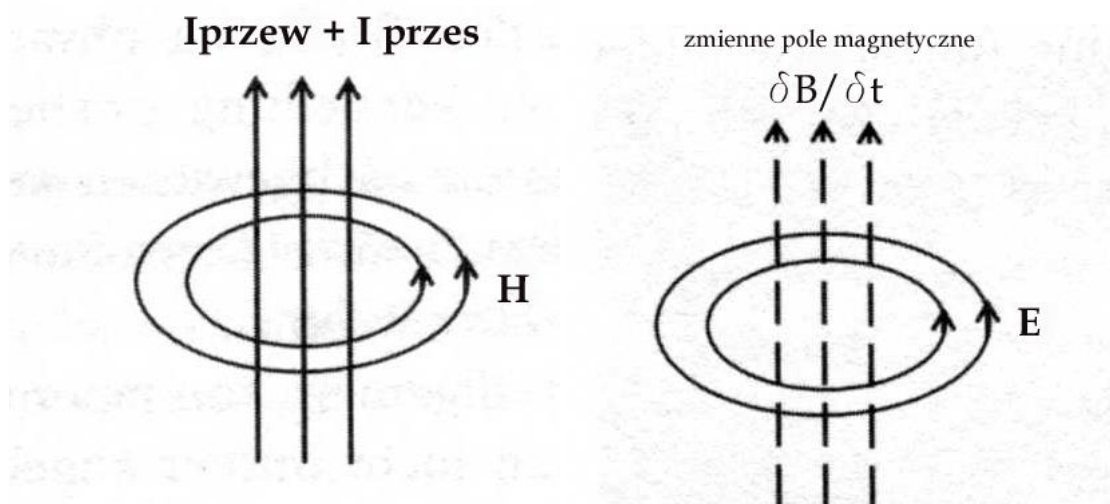
Równania te obejmują we wspólnej postaci znane już uprzednio prawa Ampera (indukowanie się pola magnetycznego w wyniku przepływu prądu elektrycznego) i Faradaya (indukowanie się siły elektromotorycznej w wyniku zmian strumienia magnetycznego) i opisują mówiąc najogólniej związki pól elektrycznych, magnetycznych, napięć i prądów w jedną całość noszącą nazwę pola elektromagnetycznego (elektromagnetyzmu). Stały one dzięki temu teoretyczną podstawą elektrotechniki.

Pole elektromagnetyczne jest utworzone przez cztery związane ze sobą pola wektorowe: wektor natężenia pola elektrycznego  $E$ , wektor natężenia pola magnetycznego  $H$ , wektor indukcji elektrycznej  $D$  i wektor indukcji magnetycznej  $B$ . Potocznie używane są nazwy skrócone: pole elektryczne, pole magnetyczne itd.

Przed podjęciem dalszych rozważań krótkie wyjaśnienie należy się pojęciu wektora. W fizyce (i nie tylko) stykamy się z dwoma rodzajami wielkości. Wielkości skalarne (skalary) są po prostu zwykłymi liczbami, przykładowo pojemność akumulatora wynosi 2000 mAh, temperatura 23°C. Oprócz wielkości mianowanych (wyrażanych w określonych jednostkach jak w przykładach z poprzedniego zdania) mamy też wielkości niemianowane – mogą to być przykładowo stosunki dwóch wielkości mianowanych – „napięcie w punkcie A jest dwa razy wyższe niż w punkcie B; stosunek napięć A i B wynosi 2” itd. Zgodnie z zasadami obowiązującymi w języku polskim jednostki i wielkości liczbowe powinny być pisane oddzielnie, a nie jak za oceanem – razem. W zapisie 0,5 l wiadomo na pierwszy rzut oka, że

chodzi o objętość 1/2 litra, natomiast zapis 0,5l kojarzy się raczej – zwłaszcza dla niektórych czcionek – z wartością 51/100 nie wiadomo czego.

Drugim rodzajem wielkości są wielkości wektorowe. Dodatkowo do wartości liczbowej mają one kierunek i zwrot. Przykładowo wiatr północny ma kierunek południowy (wieje wzdłuż południka ziemskiego) i zwrot z północy na południe. Również wiatr południowy wieje wzdłuż południka, ale ma zwrot przeciwny – z południa na północ. W języku potocznym często kierunek i zwrot ujmuje się za pomocą pojedynczego określenia – kierunku. Pola elektromagnetyczne mają w każdym dowolnym momencie czasu i w każdym miejscu swoją wartość natężenia, kierunek i zwrot – mają więc charakter wektorowy.



Rys. 1.1.1 (po lewej). Przepływ zmiennego prądu powoduje zgodnie z pierwszym prawem Maxwella powstanie zmiennego wirowego pola magnetycznego, pola o liniach zamkniętych

Rys. 1.1.2 (po prawej). Zmienne pole magnetyczne jest źródłem zmiennego wirowego pola elektrycznego

Mówiąc o polach elektrycznym i magnetycznym warto też pamiętać, że rozróżniamy ich dwa rodzaje: pola statyczne i dynamiczne. Statyczne pole elektryczne (pole elektrostatyczne) towarzyszy statycznemu (niezmieniającemu się) rozkładowi ładunków elektrycznych w przestrzeni. Pole magnetostatyczne może istnieć jako wynik trwałego namagnesowania (np. żelaza) lub jako wynik przepływu prądu stałego.

Pola dynamiczne różnią się zarówno pod względem wytwarzających je źródeł, jak i pod względem zależności od czasu. Najprostszym rodzajem przebiegów dynamicznych są przebiegi harmoniczne, czyli o sinusoidalnej zależności od czasu. Pola o bardziej skomplikowanej zależności od czasu należy rozłożyć na zbiór pól zmieniających się harmonicznie – analogicznie jak dla omawianych już sygnałów elektrycznych. W wyniku tego rozkładu otrzymuje się widmo ciągłe lub dyskretne (składające się z prążków odpowiadających poszczególnym częstotliwościom).

Podstawą radiotechniki są cztery poniższe równania Maxwella:

$$\nabla \times H = I + \frac{\delta D}{\delta t}$$

$$\nabla \times E = - \frac{\delta B}{\delta t}$$

$$\nabla D = \rho$$

$$\nabla B = 0$$

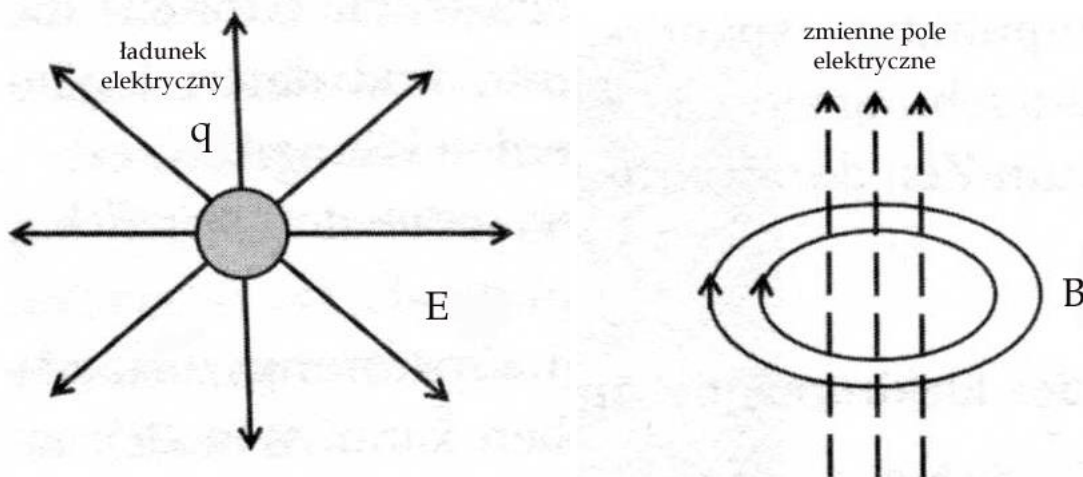
Pierwsze z równań Maxwella mówi po prostu, że źródłem wirowego pola magnetycznego jest przepływający prąd lub mówiąc językiem bardziej matematycznym rotacja (wirowość, zmienność w przestrzeni) pola magnetycznego jest równa całkowitej gęstości prądu w danym punkcie. Całkowity przepływający prąd składa się z dwóch składowych: prądu przewodzenia  $I$  płynącego w przewodnikach i prądu

przesunięcia będącego wynikiem ruchu ładunków elektrycznych – zmienności ładunku elektrycznego, a co za tym idzie – pola elektrycznego w funkcji czasu. Przykładowo dopływ ładunku elektrycznego do jednej z okładek kondensatora powoduje odpływ takiego samego ładunku z drugiej z nich – aby mogła naładować się przeciwnie, a więc mimo istnienia przerwy w obwodzie (izolacji kondensatora) płynie w nim prąd. Istniejące w obszarze między okładkami kondensatora zmienne pole elektryczne jest źródłem pola magnetycznego tak, jakby płynął tam prąd przewodzenia. Rzeczywista natura prądu przesunięcia i jego skutków była przedmiotem wielu dyskusji w wydawnictwach naukowych. Za źródło pola magnetycznego w obszarze nieprzewodzącym uważane bywają także prądy ładujące okładki kondensatora.

Wzór jest uogólnieniem prawa Ampera, przy czym szczególnym osiągnięciem Maxwella było właśnie wprowadzenie do niego prądu przesunięcia. Występujący po lewej stronie wzoru operator „ $\nabla \times \dots$ ” oznacza rotację – operację matematyczną opisującą zmienność wektora w przestrzeni (operator jest skróconym zapisem bardziej złożonych zależności różniczkowych, ale rezygnujemy w tym miejscu z dalszego komplikowania sprawy). Zamiast niego można używać również oznaczenia „rot”. Lewą stronę równania można więc zapisać jako „rot H”. W publikacjach anglojęzycznych odpowiada mu oznaczenie „curl”, a w niemieckojęzycznych również „rot”.

Drugi ze wzorów mówi z kolei, że źródłem wirowego pola elektrycznego są zmiany indukcji magnetycznej w funkcji czasu lub ściślej rotacja pola elektrycznego jest równa zmienności indukcji magnetycznej. Wzór ten odpowiada prawu indukcji Faradaya. Linie powstających dzięki indukcji pól wirowych tworzą figury zamknięte, a więc nie mają początku ani końca (patrz rys. 1.1.1 i 1.1.2).

Dwa ostatnie równania opisują rozbieżność (dywergencję, źródłowość) wektorów indukcji elektrycznej i magnetycznej zapisywaną za pomocą operatorów „ $\nabla \cdot$ ” lub „div” (reprezentującymi także bardziej złożone zależności różniczkowe, w które tutaj nie wnikamy). Pierwsze z nich – prawo Gaussa – mówi, że źródłem pola elektrycznego są ładunki elektryczne czyli że linie pola elektrycznego rozpoczynają się i kończą na tych ładunkach (rys. 1.1.3), drugie – że nie istnieją wolne ładunki magnetyczne analogiczne do elektrycznych, a więc wektor indukcji magnetycznej nie ma takiego źródła lub mówiąc jeszcze inaczej linie pola magnetycznego tworzą figury zamknięte (rys. 1.1.4). Jak wiadomo elementarne domeny magnetyczne występują w postaci dwubiegunów (dipoli) i niemożliwe jest rozdzielenie magnetycznych biegunów północnych i południowych.



Rys. 1.1.3 (po lewej). Ładunki elektryczne są źródłem pola elektrycznego

Rys. 1.1.4 (po prawej). Linie pola magnetycznego tworzą zamknięte pętle i nie mają źródła analogicznego do źródła pola elektrycznego. Ładunki magnetyczne nie istnieją. Rysunek ten ilustruje również powiązania ze sobą pól elektrycznego i magnetycznego tworzących razem pole elektromagnetyczne

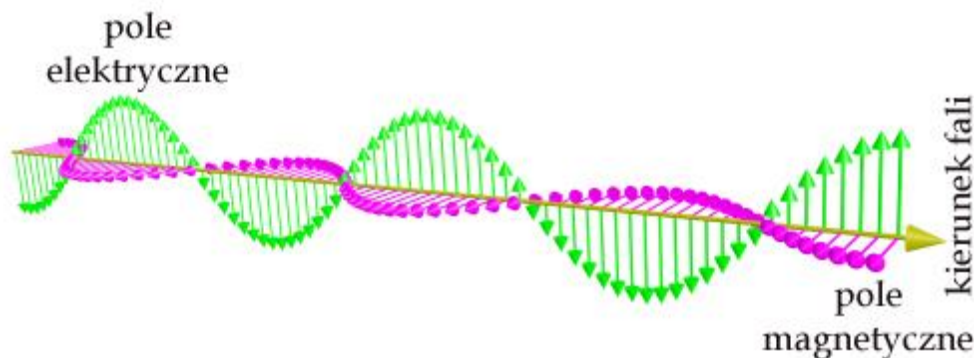
Powyższe równania Maxwella przedstawiamy w tzw. postaci różniczkowej i aby nie przytłoczyć czytelników wyższą matematyką rezygnujemy z podania ich postaci całkowitej, chociaż i taka istnieje.

Rozwiązanie tych równań w różnych warunkach i dla różnych ograniczeń stanowi główne zagadnienie elektrodynamiki. Aby już nie komplikować dalej tej sprawy powiedzmy od razu, że największe znaczenie praktyczne mają funkcje harmoniczne – fale o przebiegu sinusoidalnym lub złożone z wielu takich



przebiegów. W odróżnieniu od równań algebraicznych mających rozwiązania liczbowe, tutaj rozwiązaniami są funkcje matematyczne opisujące zjawiska fizyczne.

Jak wynika z pierwszych dwóch równań Maxwella przepływ zmiennego prądu elektrycznego powoduje powstanie zmiennego wirowego pola magnetycznego i z kolei w wyniku zmiennej indukcji magnetycznej powstaje zmienne wirowe pole elektryczne – a więc w sumie powstaje pole elektromagnetyczne (rys. 1.1.4 i 1.1.5). Konsekwencją praktyczną dla radiotechniki jest stwierdzenie, że powstanie silnego pola elektromagnetycznego wokół anteny wymaga, aby płynął w niej jak najsilniejszy prąd. Tłumacząc niemieckie wyrażenie stanowiące pewnego rodzaju pomoc mnemotechniczną można ująć to w skrócie jako – „prąd promieniuje”.



Rys. 1.1.5. Wzajemne oddziaływanie pól elektrycznego i magnetycznego skutkuje powstaniem fali elektromagnetycznej. Fale rozchodzą się w ośrodkach materialnych oraz w próżni i przenoszą energię

Kiedy w 1886 roku Henryk (*Heinrich*) Hertz rozpoczął doświadczenia z falami elektromagnetycznymi chciał jedynie wykazać prawdziwość twierdzeń Maxwella o istnieniu fal elektromagnetycznych. Nie myślał wówczas wogóle o praktycznym wykorzystaniu tej wiedzy.

## 1.2. Dalsze podstawowe terminy

Stosunek natężenia pola elektrycznego do natężenia pola magnetycznego jest nazywany opornością falową środowiska. Dla próżni i powietrza oporność falowa równa pierwiastkowi ze stosunku przenikalności magnetycznej do przenikalności dielektrycznej ośrodka wynosi  $120 \Pi$  omów czyli w przybliżeniu  $377 \Omega$ .

Częstotliwość, długość fali i prędkość rozchodzenia się fal są ze sobą powiązane wzorem  $f = v/\lambda$ , gdzie  $f$  jest częstotliwością,  $v$  – szybkością rozchodzenia się fal, a  $\lambda$  – długością fali. Dla celów praktycznych przyjmuje się zaokrągloną prędkość rozchodzenia się fali w próżni i w niezjonizowanej atmosferze wynoszącą  $300\,000$  km/sek, jest ona oznaczana literą  $c$ .

Długość fali w próżni lub powietrzu wynosi więc  $\lambda = c/f$  [m], gdzie  $f$  podane jest w Hz, a  $c$  w m/sek. Prędkość rozchodzenia się fal radiowych może jednak znacznie różnić się od  $c$ , jeżeli fale rozchodzą się w środowisku o parametrach znacznie odbiegających od parametrów próżni, względnie powietrza. Prędkość fali maleje z pierwiastkiem ze względnej przenikalności dielektrycznej materiału  $v = c / \sqrt{\epsilon_r}$ , przenikalność magnetyczna  $\mu_r = 1$  dla środowisk, z którymi praktycznie mamy do czynienia w łączności radiowej. Jak wynika ze wzoru w dielektrykach prędkość rozchodzenia się fali jest mniejsza niż w próżni, przykładowo dla wody o  $\epsilon_r = 80$  wynosi ona  $33,7 \times 10^8$  km/sek. Zmniejszenie prędkości rozchodzenia się fali oznacza proporcjonalne zmniejszenie jej długości.

Parametry środowiska mogą być niezależne od częstotliwości lub mogą być zmienne w funkcji częstotliwości fali. Jeżeli istnieje zależność środowisko to jest nazywane dyspersyjnym, a przy jej braku – niedyspersyjnym.

Fala zmodulowana stanowi w ogólnym przypadku grupę falową zawierającą falę nośną i wstęgi boczne o pewnej szerokości pasma. Jeżeli fala ta rozchodzi się w ośrodku dyspersyjnym każda z jej składo-

wych rozchodzi się z inną prędkością i w konsekwencji fala ulega zniekształceniu. W środowisku niedispersyjnym wszystkie składowe biegną z jednakową prędkością i fala zachowuje swój kształt.

W związku z powyższym rozróżnia się dwie prędkości: prędkość fazową i prędkość grupową. Prędkość fazową można określić jako prędkość z jaką powinien poruszać się obserwator wzdłuż trasy fali aby utrzymać swe położenie względem fazy fali. Prędkość grupowa natomiast jest to prędkość z jaką porusza się energia fali, czyli prędkość z jaką przebiega sygnał składający się z grupy fal. Prędkość ta nie może przekraczać prędkości światła, natomiast dla prędkości fazowej jest to możliwe.

Pole elektromagnetyczne charakteryzują trzy wielkości: natężenie pola elektrycznego, natężenie pola magnetycznego i określający moc pola wektor Poyntinga. Ponieważ te trzy wielkości są ze sobą powiązane wystarczy zmierzyć tylko jedną z nich, aby można było określić pozostałe.

Ze względów technicznych przeważnie najdogodniej jest mierzyć natężenie pola elektrycznego. Jego jednostką podstawową jest volt/metr – V/m. W praktyce najczęściej posługujemy się jednostkami mniejszymi mV/m lub  $\mu\text{V/m}$ . Natężenie pola magnetycznego można obliczyć z natężenia pola elektrycznego i oporności falowej środowiska, która dla niezjonizowanego powietrza wynosi  $120 \Pi$  [ $\Omega$ ]. Wektor Poyntinga czyli gęstość mocy obliczana jest przez podzielenie kwadratu natężenia pola elektrycznego przez oporność falową środowiska. Wskazuje on kierunek i zwrot rozchodzenia się energii fali.

Polaryzacja fali radiowej określa usytuowanie wektorów pola elektromagnetycznego względem płaszczyzny odniesienia. W praktyce jest to najczęściej płaszczyzna ziemi, która w dostatecznie małym obszarze można traktować jako płaską. Kierunkiem polaryzacji przyjęto umownie nazywać kierunek wektora pola elektrycznego, zaś płaszczyzną polaryzacji nazywamy płaszczyznę, w której leżą wektory natężenia pola elektrycznego i przepływu energii.

Rozróżnia się pięć rodzajów polaryzacji fal elektromagnetycznych: pionowa, pozioma, skośna, eliptyczna i kołowa. Polaryzacja pionowa charakteryzuje się pionowym względem powierzchni ziemi usytuowaniem płaszczyzny polaryzacji, przykładem może być fala promieniowana przez pionowo umieszczony promiennik ćwierć- lub półfalowy UKF. Polaryzacja jest pozioma gdy wektor pola elektrycznego jest usytuowany poziomo względem powierzchni ziemi. Płaszczyzna polaryzacji może być albo równoległa do powierzchni albo nachylona względem niej pod pewnym kątem. Przykładem może być fala promieniowana przez dipol poziomy.

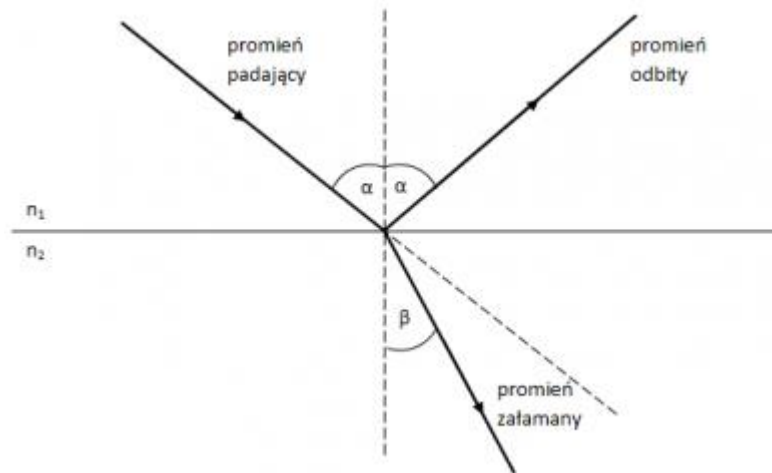
Płaszczyzna polaryzacji jest nachylona pod pewnym kątem również przy polaryzacji skośnej. Różnicą między przedstawionym poprzednio przypadkiem nachylonej fali o polaryzacji poziomej, a polaryzacją skośną polega na tym, że przy polaryzacji skośnej wszystkie trzy wektory są nachylone w stosunku do powierzchni ziemi, a w poprzednim wektor pola elektrycznego był do niej równoległy (przykładem może być fala o polaryzacji poziomej rozchodząca się w górę). Wszystkie te trzy rodzaje polaryzacji zaliczają się do polaryzacji liniowej, przy czym polaryzacja pionowa i pozioma są szczególnymi przypadkami polaryzacji skośnej ponieważ sygnał o polaryzacji skośnej można rozłożyć na będące w fazie składowe pionową i poziomą, a w przypadku gdy jedna z nich ma wartość zero pozostaje druga.

Cechą charakterystyczną polaryzacji eliptycznej i kołowej jest występowanie w nich dwóch składowych pionowej i poziomej ale przesuniętych względem siebie w fazie przy czym dla polaryzacji eliptycznej obie składowe mają różne wartości i mogą być przesunięte w fazie o dowolny kąt, a przy kołowej mają wartości równe i przesunięte w fazie o 90 stopni. W pierwszym przypadku koniec wektora wypadkowego natężenia pola zakreśla elipsę, a w drugim okrąg.

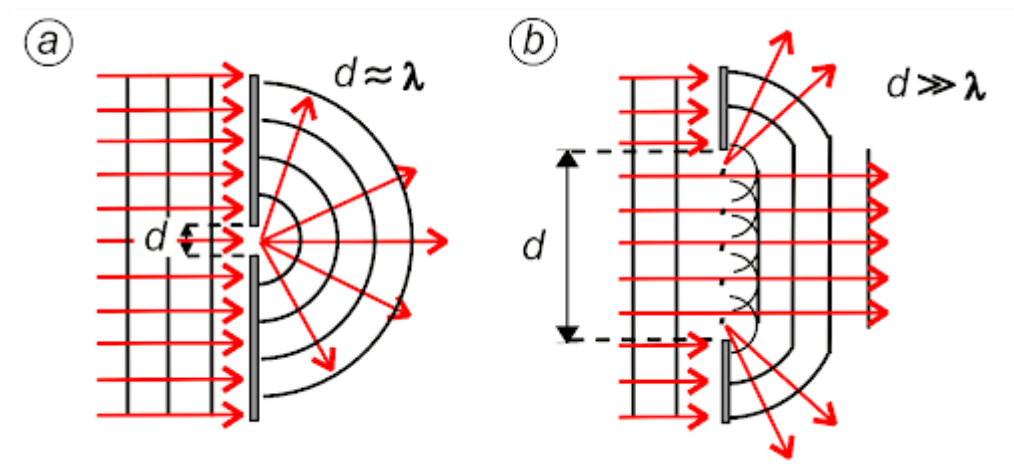
W środowisku półprzewodzącym (środowisku o skończonej i większej od zera przewodności) fala ulega tłumieniu – jej natężenie pola maleje wykładniczo wraz z przebytą odległością. Dochodzi również do przesunięcia względem siebie składowych magnetycznej i elektrycznej pola. Ziemia należy do środowisk półprzewodzących.

Na granicy środowisk o różnych właściwościach – przykładowo prawie idealnym dielektrykiem powietrzem i półprzewodzącą ziemią – dochodzi do załamania lub odbicia padającej fali. W przypadku odbicia obowiązuje ogólnie znane prawo mówiące, że kąt padania jest równy kątowi odbicia. W przypadku załamania fala rozchodzi się dalej w głąb drugiego z ośrodków, ale jej kierunek zbliża się do prostej prostopadłej do granicy ośrodków dla ośrodka o większej przenikalności dielektrycznej albo oddala się dla ośrodka o mniejszej przenikalności dielektrycznej. Ośrodek niejednorodny można podzielić na cienkie warstwy o zmieniającej się przenikalności dielektrycznej i rozpatrywać przejście fali przez kolejne granice warstw. Zamiast ostrego załamania dochodzi wówczas do płynnej zmiany kierunku fali – jej ugięcia lub zawrócenia.

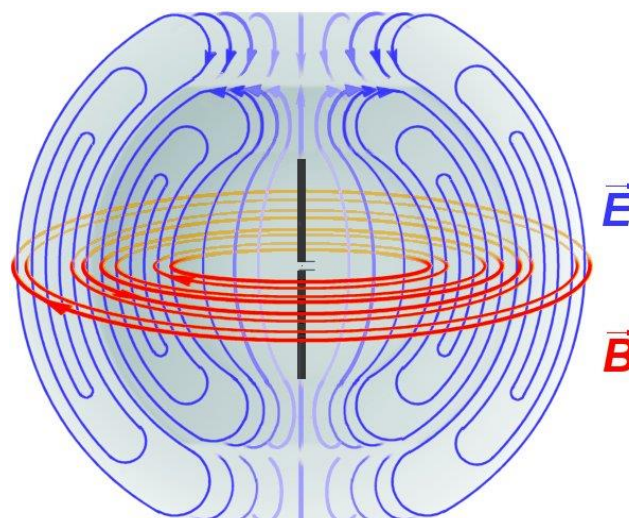
Na granicy z ośrodkiem przewodzącym następuje pełne odbicie fali, a fala załamana w ogóle nie istnieje.



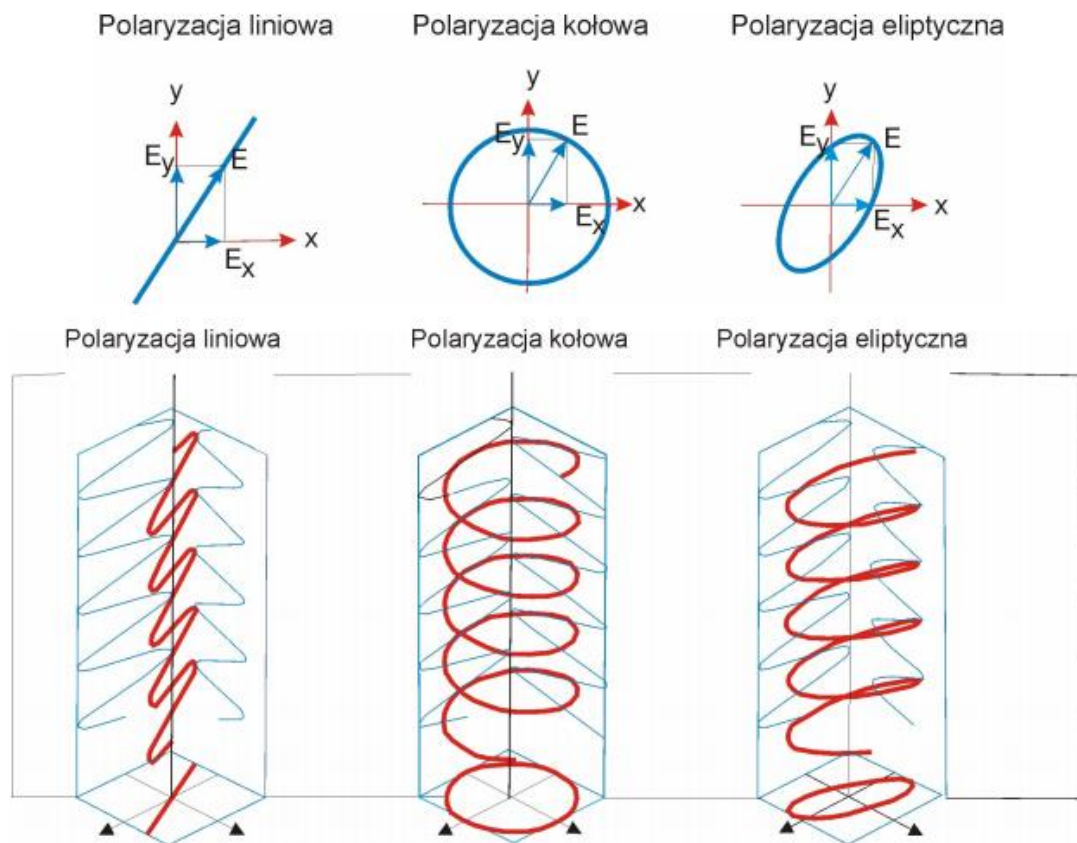
Rys. 1.2.1. Odbicie i załamanie fali na granicy dwóch ośrodków o różnych właściwościach,  $\sin\alpha/\sin\beta = n_2 / n_1 = v_1 / v_2$ , gdzie  $v$  jest szybkością rozchodzenia się fali w danym ośrodku



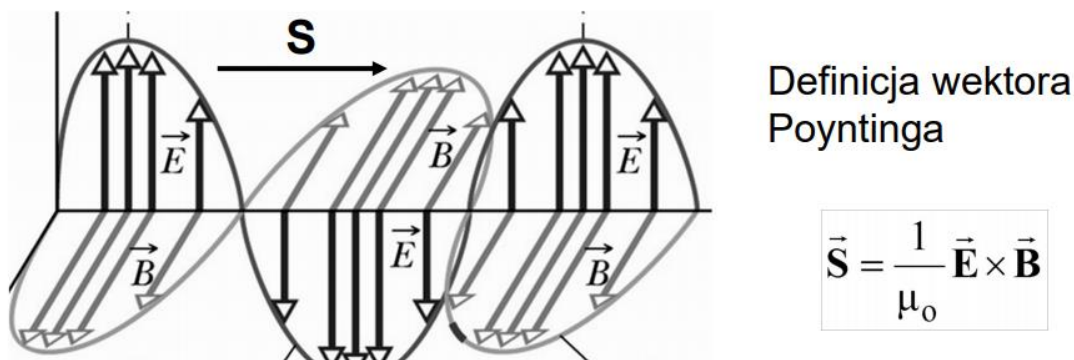
Rys. 1.2.2. Dyfrakcja i interferencja fali



Rys. 1.2.3. Płaszczyzna polaryzacji fali jest zgodna z położeniem płaszczyzny pola elektrycznego. Prostopadle do niej leży płaszczyzna pola magnetycznego



Rys. 1.2.4. Liniowa, kołowa i eliptyczna polaryzacja fali



Kierunek wektora Poyntinga jest kierunkiem rozchodzenia się fali i kierunkiem przepływu energii

Rys. 1.2.5. Wektor Poyntinga

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad \mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ H / m} \quad c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m / s}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F / m}$$

Rys. 1.2.6. Zależność prędkości fali od bezwzględnych stałych przenikalności elektrycznej i magnetycznej próżni i powietrza. W innych ośrodkach w iloczynie pod pierwiastkiem występują dodatkowo współczynniki przenikalności względnej powodujące jej zmniejszenie



### 1.3. Pole geomagnetyczne

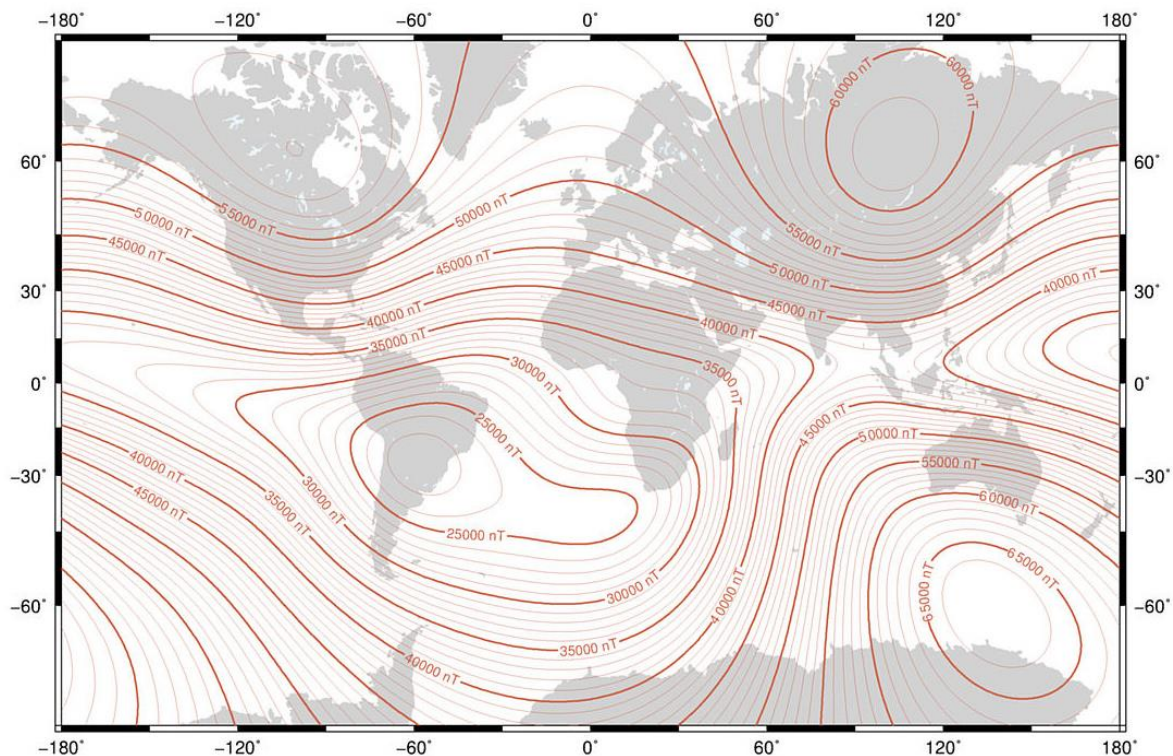
Propagacja fal radiowych w pobliżu Ziemi podlega, między innymi, wpływom magnetycznego pola ziemskiego, czyli pola geomagnetycznego, które oddziałuje szczególnie na fale rozchodzące się w jonosferze. Istniejące wokół ziemi pole geomagnetyczne nie jest polem stałym, podlega ono zmianom chwilowym i okresowym oraz zdarzającym się od czasu do czasu zaburzeniom. Jeżeli pominiemy zaburzenia to chwilowe fluktuacje i zmiany okresowe są stosunkowo niewielkie więc w przybliżeniu możemy traktować to pole jako stałe.

Natężenie pola geomagnetycznego w dowolnym punkcie powierzchni Ziemi charakteryzuje się wektorem o określonym kierunku, zwrocie i wielkości. Wektor pola jest nachylony względem płaszczyzny stycznej w danym punkcie do powierzchni Ziemi pod pewnym kątem. Wartość tego kąta nazywa się inklinacją magnetyczną. Składowa pozioma wektora w danym punkcie tworzy z południkiem geograficznym kąt zwany deklinacją magnetyczną.

Rozkład natężenia pola magnetycznego na kuli ziemskiej jest taki, że składowa pionowa jest na półkuli północnej skierowana w dół, zaś na półkuli południowej – w górę. Składowa pozioma jest skierowana zawsze w zasadzie z południa na północ, z wyżej wspomnianą deklinacją.

Linie pola magnetycznego ziemskiego przebiegają z południa na północ skupiając się w dwóch punktach, w których składowa pozioma staje się równa zero, co oznacza, że natężenia pola ustawia się w tych punktach pionowo. Są to bieguny magnetyczne Ziemi, przy czym przyjęło się, że biegun znajdujący się w pobliżu geograficznego bieguna północnego nazywa się biegunem magnetycznym północnym, a znajdujący się na półkuli południowej – biegunem magnetycznym południowym. Należy jednak zwrócić uwagę na zachodzącą tu niezgodność z innymi ustaleniami, gdyż linie pola magnetycznego mają kierunek od bieguna północnego do południowego, czyli w zasadzie nazwę bieguna magnetycznego północnego powinien nosić biegun położony na półkuli południowej i odwrotnie.

Położenie biegunów magnetycznych nie pokrywa się z położeniem biegunów geograficznych i ulega przesunięciom w funkcji czasu.



Rys. 1.3.1. Natężenie ziemskiego pola magnetycznego wynosi 70000 nT (0,7 Gaussa) w pobliżu biegunów magnetycznych i spada do około 25000 nT (0,25 Gaussa) na równiku. Amplitudy wahań pola magnetycznego wynoszą od kilkuset do kilku tysięcy nT przy silnych burzach magnetycznych. W dłuższych okresach czasu średnia zmian wynosi zero

Podobnie jak o biegunach magnetycznych można mówić i o równiku magnetycznym. Jest to miejsce geometryczne punktów, w których inklinacja jest równa zeru. Równik magnetyczny także nie pokrywa się z równikiem geograficznym i ma przebieg pofalowany.

Powierzchnię Ziemi można więc pokryć siatką geomagnetyczną analogiczną do siatki geograficznej (ale oczywiście nie identyczną z nią) i posługiwać się pojęciami długości i szerokości geomagnetycznej.

#### 1.4. Czynniki pozaziemskie

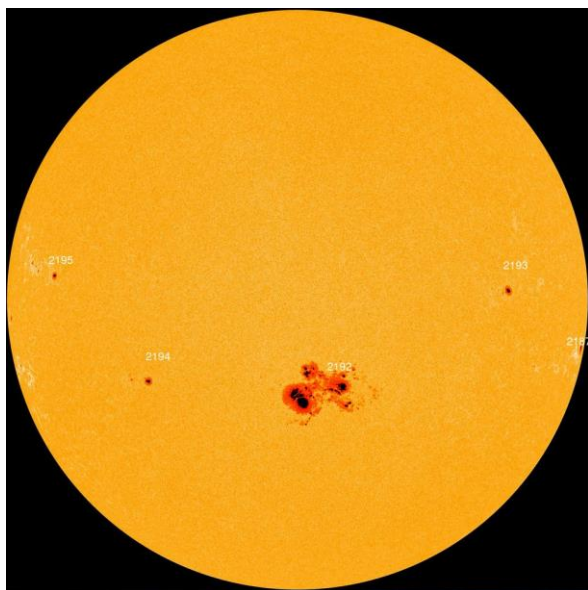
Głównym czynnikiem oddziałującym na atmosferę, a w wyniku tego i na propagację fal, jest Słońce. Bezpośrednio widzialna część powierzchni Słońca nosi nazwę fotosfery. Promieniuje ona ciągłe widmo fal świetlnych o dość szerokim zakresie częstotliwości. Ponieważ gazy tworzące fotosferę są w ciągłym ruchu bezładnym, rozkład energii cieplnej na powierzchni fotosfery nie jest równomierny. Powstają miejsca bardziej gorące, jaśniej świecące i miejsca chłodniejsze – nieco ciemniejsze. Z tej przyczyny powierzchnia fotosfery ma wygląd ziarnisty, nazwano to granulacją fotosferyczną.

Fotosfera jest otoczona warstwą rozżarzonych gazów pochłaniających selektywnie energię fal świetlnych o częstotliwościach odpowiadających poszczególnym prążkom w widmie spektralnym. Grubość tej warstwy gazów jest stosunkowo niewielka.

Następną z kolei warstwą jest chromosfera. Ma ona grubość rzędu kilkunastu tysięcy kilometrów i strzępiastą strukturę; składa się jak gdyby z dużej ilości płomienistych włókien. Chromosfera jest widoczna tylko podczas całkowitych zaćmień Słońca ponieważ w normalnych warunkach maskuje ją rozproszone w atmosferze światło fotosfery. Wygląd chromosfery ulega zmianom, charakterystyczne dla niej są protuberancje w postaci nieustannie pojawiających się na jej powierzchni ognistych języków. Ponadto odczasu do czasu zachodzą w niej gigantyczne wybuchy, zwane rozbłyskami, które powodują wyrzucanie w przestrzeń znacznych ilości materii.

Na zewnątrz Słońce jest otoczone przostającą w nieustannym ruchu atmosferą zwaną koroną słoneczną. Jest to warstwa gazów o bardzo małej gęstości i grubości przekraczającej średnicę Słońca. Podobnie jak chromosfera, korona słoneczna jest dostrzegalna tylko podczas zaćmienia Słońca. Korona słoneczna jest głównym źródłem promieniowania ponadfioletowego i promieniowania korpuskularnego mających zasadnicze znaczenie dla propagacji fal w górnych warstwach atmosfery ziemskiej.

Poza promieniowaniem świetlnym Słońce emituje również promienie X (rentgenowski) oraz fale radiowe. Ich źródłem są chromosfera i korona słoneczna.



Fot. 1.4.1. Plamy słoneczne. Ich średnice przekraczają często średnicę Ziemi

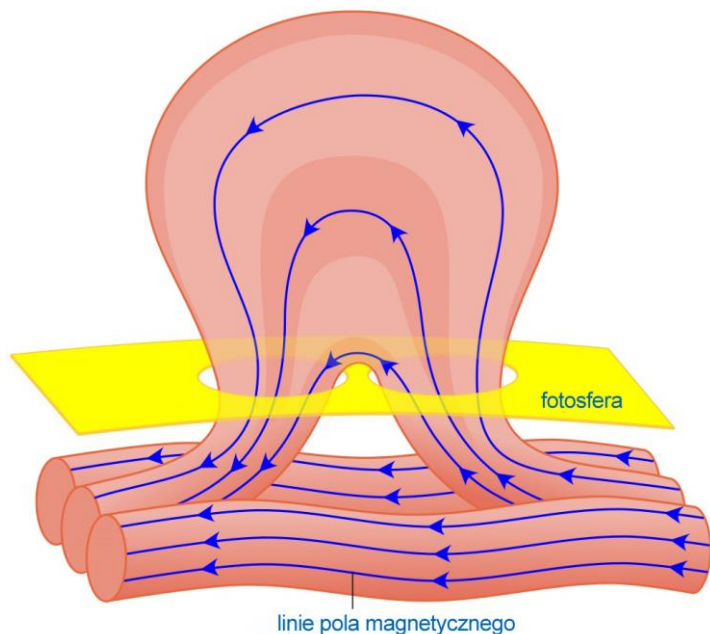
Aktywność słoneczna ma zasadnicze znaczenie dla propagacji fal radiowych w jonosferze. Najważniejszym przejawem tej aktywności jest tworzenie się plam słonecznych. Pojawiają się one na powierzchni fotosfery w postaci jak gdyby wirów gazów znacznie chłodniejszych i przez to ciemniejszych od otaczającej je fotosfery. Plamy słoneczne wyraźnie odróżniają się od zwykłej granulacji fotosfery. Cechą charakterystyczną jest okresowość występowania zjawiska. Odstępy pomiędzy maksimami plam słonecznych wynoszą średnio 11 lat, wahając się w granicach od 9 do 13 lat. Para cykli jedenastoletnich składa się na cykl dwudziestodwuletni. Oprócz tego występują cykle dłuższe modulujące amplitudę cykli 11-letnich. Wywierają one wpływ

na pogodę i średnią temperaturę na Ziemi i innych planetach. Do najbardziej znanych skutków tych długookresowych cykli należy minimum Maundera, w czasie którego w XVII i na początku XVIII wieku nie występowały plamy słoneczne, a okres ochłodzenia na Ziemi zyskał nazwę małej epoki lodowcowej – w zimie zamarzał Bałtyk i wiele rzek europejskich.



Wskaźnikiem aktywności słonecznej jest względna liczba plam słonecznych, zwana od nazwiska szwajcarskiego astronoma liczbą Wolfa. Jest ona obliczana w następujący sposób:

$W = k(n + 10g)$ , gdzie  $k$  jest współczynnikiem zależnym od zdolności rozdzielczej teleskopu użytego do obserwacji,  $n$  jest liczbą pojedynczych plam słonecznych, a  $g$  – liczbą grup plam słonecznych. Duży rozrzut wartości dziennych powoduje, że publikowane są średnie miesięczne liczby plam słonecznych. Wpływ aktywności słonecznej na atmosferę ziemską jest powiązany także z 27-dniowym okresem obrotu Słońca wokół jego osi.



Rys. 1.4.2. Plamy słoneczne powstają wówczas gdy linie pola magnetycznego wychodzą ponad fotosferę

Wiatr słoneczny jest stałym strumieniem cząstek wyrzucanych przez Słońce z prędkością dochodzącą do 400 km/sek. Ich źródłem jest korona słoneczna.

Innym przejawem aktywności słonecznej są wymienione powyżej protuberancje i rozbłyski. Również i one wywierają wpływ na propagację fal radiowych.

Dalszym czynnikiem wpływającym na jonizację atmosfery ziemskiej są promienie kosmiczne. Tak zwane promieniowanie pierwotne składa się głównie z protonów i cząstek alfa (jąder helu zawierających po dwa protony i po dwa

neutrony). Cząsteczki te wpadając z wielką prędkością do atmosfery wywołują na skutek zderzeń z atomami promieniowanie wtórne w postaci rozchodzących się wachlarzowato strumieni elektronów, mezonów, protonów i fotonów. Kolejnym przejawem aktywności słonecznej są koronalne wyrzuty materii i dziury koronalne. W okresach niskiej liczby plam słonecznych dziury koronalne powodują początkowo poprawę warunków propagacyjnych (wzrost jonizacji górnych warstw), a następnie zwiększone tłumienie fal przez silniej zjonizowaną warstwę D.

Gwiazdy stanowią wprawdzie kolejne ze źródeł jonizacji atmosfery, ale ze względu na ich olbrzymie odległości od Ziemi nie ma ona większego znaczenia dla propagacji fal radiowych.

Na jonizację atmosfery ziemskiej wpływają też w pewnym stopniu meteory. Ich znaczenie dla propagacji fal radiowych objawia się w szczególności w zakresie fal metrowych. Sprawę tą omówiono dokładniej w dalszej części skryptu.

### 1.5. Właściwości elektryczne powierzchniowych warstw lądu i morza

Propagacja fal radiowych rozchodzących się wzdłuż powierzchni ziemi, a częściowo także fal rozchodzących się w inny sposób ale ulegającym odbiciom od ziemi jest w dużym stopniu uzależniona od parametrów elektrycznych powierzchniowych warstw ziemi i od pokrycia terenu.

Struktura gleby i jej podłoża jest na ogół dosyć złożona, a właściwości elektryczne poszczególnych składników gleby, podłoża, i obiektów zaliczanych do pokrycia terenu zależą od ich struktury, temperatury i wilgotności. O ile dany materiał posiada właściwości dyspersyjne to jego parametry elektryczne zmieniają się również w funkcji częstotliwości.

Na ogół własności elektryczne minerałów, składników gleby, materiałów budowlanych itp. w warunkach naturalnych różnią się w pewnym stopniu od własności próbek badanych w warunkach laboratoryjnych chociażby z powodu ograniczonego rozmiaru próbki i otoczenia laboratoryjnego różniącego się od naturalnego.

Powierzchniowe warstwy ziemi mają na ogół strukturę niejednorodną, dlatego też w praktyce stosowane są wartości skuteczne, tj. przenikalność dielektryczna i przewodność, jakie miałyby ta warstwa gdyby była jednorodna.

Grubość warstwy ziemi biorącej udział w propagacji fal radiowych zależy od ich częstotliwości. Warstwa ta jest tym grubsza im niższa jest częstotliwość fali. Wynika stąd, że skuteczne wartości parametrów elektrycznych są poprzez grubość wchodzącej w grę warstwy również zależne od częstotliwości.

Nierówności terenu i jego pokrycie mają podobne, w skutkach, znaczenie jak pogorszenie przewodności właściwej – czyli powodują wzrost tłumienia fali. Zwiększenie strat energii powstaje na skutek ugięcia się fali na wzniesieniach i nierównościach terenu oraz w wyniku wzbudzenia się prądów, np. w pniach drzew lub napotykanym na drodze fali przedmiotów metalowych.

Lasy powodują dość silne tłumienie fali, przy czym zauważa się różnice między lasami liściastymi i iglastymi. Pokrycie roślinne i liście na drzewach powodują wzrost tłumienia fali.

Dzięki swemu zasoleniu woda morska odznacza się bardzo dobrą przewodnością natomiast woda słodka zalicza się do środowisk najgorzej przewodzących.

### 1.6. Właściwości elektryczne troposfery

Propagacja fal radiowych w najniższych warstwach atmosfery jest w znacznym stopniu zależna od warunków meteorologicznych. Ich wpływ objawia się w postaci załamania się lub rozpraszania fal w troposferze oraz w postaci tłumienia fali przez mgły i opady atmosferyczne. Załamywanie się czyli refrakcja troposferyczna jest związana z różnicami przenikalności dielektrycznej. Względna przenikalność dielektryczna powietrza jest bliska jedności i ulega stosunkowo niewielkim zmianom w funkcji wysokości. Jednak nawet ta stosunkowo mała zmienność wystarcza do wystąpienia refrakcji mającej znaczenie praktyczne. Współczynnik refrakcji troposferycznej jest zależny od temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza, a w przypadku szczególnym od jego warstw. Ponieważ wilgotność, temperatura i ciśnienie powietrza zmieniają się z wysokością więc współczynnik refrakcji zależy od ich rozkładu przetrzennego. Wilgotność powietrza i temperatura wywierają większy wpływ na propagację fali w troposferze, natomiast wpływ ciśnienia można uznać za drugorzędny.

Normalnie temperatura maleje z wysokością aż do granicy tropopauzy. Wilgotność również maleje bardzo szybko. W rezultacie współczynnik refrakcji również zmniejsza się w funkcji wysokości, czyli że gradient współczynnika refrakcji ma wartość ujemną.

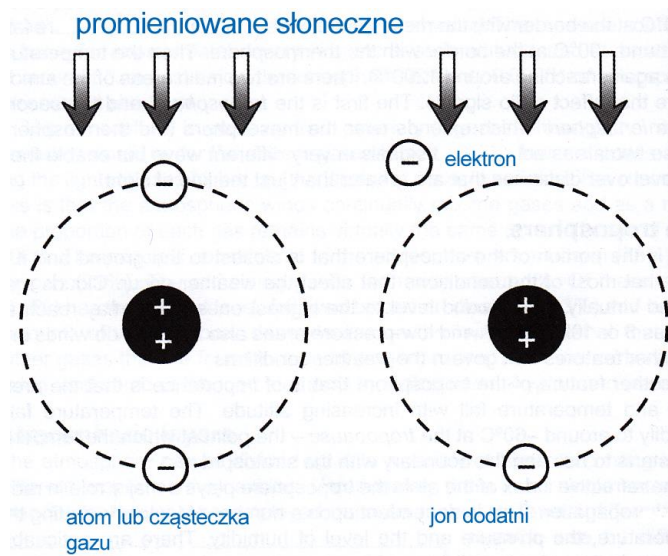
Niekiedy zdarza się, że temperatura w pewnym obszarze zamiast maleć wzrasta, oczywiście też do jakiejś granicy. Zjawisko to nazywane inwersją temperatury powoduje najczęściej zwiększenie ujemnego gradientu współczynnika refrakcji w danym obszarze. Zdarzają się jednak przypadki szybkiego spadku temperatury i nagłego wzrostu wilgotności w funkcji wysokości. Gradient współczynnika refrakcji może wówczas stać się dodatni. Wszelkie tego rodzaju odchylenia od normy sprzyjają dalekosiężnej łączności radiowej poprzez dukty troposferyczne.



## 2. Zjawiska w jonosferze

Środowiskiem mającym największe znaczenie praktyczne w propagacji fal radiowych jest atmosfera ziemska. W jej skład wchodzi następujące gazy: tlen ( $O_2$ ), azot ( $N_2$ ), dwutlenek węgla ( $CO_2$ ), tlenki azotu ( $NO_x$ ), wodór ( $H_2$ ), i gazy szlachetne hel, neon i argon. Poza tym atmosfera zawiera pewną ilość pary wodnej. Ilościowy skład atmosfery ulega zmianie wraz z wysokością, ale do wysokości około 100 km zmiany te są względnie niewielkie ponieważ na skutek istnienia termicznych prądów powietrznych, wstępujących i zstępujących dolne warstwy ulegają ciągłemu przemieszczaniu. Stosunkowo najsilniejszym zmianom ulega zawartość pary wodnej co powoduje w sprzyjających warunkach wystąpienie opadów deszczu lub śniegu. Na wysokości 30 – 60 km tlen występuje w postaci ozonu ( $O_3$ ) ale powyżej mamy znowu do czynienia z jego klasyczną odmianą  $O_2$ . Powyżej stu kilkudziesięciu km występuje odmiana atomowa tlenu O, a nad nią warstwa atomowego azotu N. Zmianom w funkcji wysokości ulegają także ciśnienie atmosferyczne i temperatura.

Atmosfera ziemska dzieli się na szereg warstw (obszarów) różniących między sobą właściwościami fizycznymi, ale ich omawianie wykracza poza interesującą nas tematykę. Z punktu widzenia właściwości elektrycznych można ją podzielić natomiast na dwa zasadnicze obszary: neurosferę i jonosferę. W zaczynającej się od powierzchni ziemi i rozciągającej się do wysokości 60 km neurosferze występują tylko pojedyncze naładowane cząsteczki gazów (jej dolna warstwa o grubości ok. 8 km zwana troposferą wpływa znacząco na propagację fal ultrakrótkich i mikrofal). Natomiast znajdująca się wyżej jonosfera obejmuje rozległe obszary gazów zjonizowanych i to właśnie jej rola w propagacji fal radiowych, a zwłaszcza dekametrowych czyli fal krótkich jest olbrzymia.



Rys 2.1. Jonizacja gazu. Po ustaniu promieniowania następuje ponowne połączenie elektronów z atomami – rekombinacja

Jonizacja gazu polega na wytrąceniu z poszczególnych jego atomów jednego lub kilku elektronów warstwy zewnętrznej. Dlatego też gaz zjonizowany zawiera, obok cząsteczek i atomów obojętnych elektrycznie również pewną ilość swobodnych elektronów i dodatnio naładowanych (pozbawionych elektronów) atomów czyli jonów. Atmosfera ziemska jest jonizowana w sposób naturalny bądź przez promieniowanie bądź przez bombardowanie korpuskułami. Pierwszy z tych sposobów nosi nazwę fotojonizacji, a drugi jonizacji uderzeniowej.

Fotojonizacja polega na wytrąceniu elektronów z atomu przez promieniowanie elektromagnetyczne. Zjonizowanie atomu wymaga dostarczenia pewnej, niewielkiej zresztą, ilości energii – mierzonej w tym przypadku w elektronowoltach. Jeden elektronowolt jest energią kinetyczną elektronu przyspieszonego przez różnicę potencjałów 1 wolta. Ilość energii potrzebną do zjonizowania jednego atomu nazywa się pracą jonizacji. Zależy ona od rodzaju i struktury cząsteczkowej jonizowanego gazu.

Według teorii kwantowej falę świetlną można traktować jako strumień cząsteczek elektronowych. Energia każdego kwantu jest proporcjonalna do częstotliwości promieniowania. Aby energia promieniowania była wystarczająca do zjonizowania atomu danego gazu musi być przekroczona pewna częstotliwość krytyczna, która jest nazywana częstotliwością jonizacji. Odpowiada jej długość fali jonizacji. Gazy występujące w atmosferze ziemskiej wymagają naogół bardzo wielkich częstotliwości jonizacji leżących w zakresie promieni nadfioletowych i miękkiego promieniowania X.

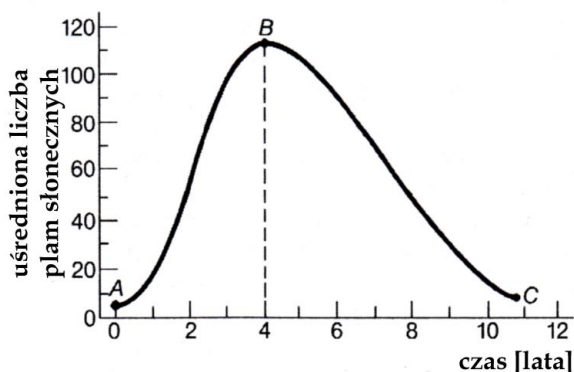
Promieniowanie elektromagnetyczne wywołuje również dysocjację gazów w atmosferze, polegającą na rozpadzie dwuatomowych cząsteczek tlenu i azotu na pojedyncze atomy. Tlen atomowy O wymaga większej pracy jonizacji aniżeli tlen cząsteczkowy  $O_2$ . Przeciwnie atomowy azot N jonizuje się przy mniejszej energii aniżeli azot cząsteczkowy  $N_2$ .

Jonizacja uderzeniowa zachodzi wówczas gdy elektron jest wytrącony z atomu w wyniku uderzenia przez lekką lub ciężką cząsteczkę w postaci mezonu, elektronu lub protonu posiadającego dostatecznie dużą energię kinetyczną. Normalnie przeważa działanie fotojonizacyjne Słońca, a intensywność jonizacji uderzeniowej jest w przybliżeniu o połowę mniejsza. Od czasu do czasu zdarzają się jednak rozbłyski będące źródłem ogromnych ilości cząsteczek wywołujących bardzo intensywną, ale przeważnie krótkotrwałą jonizację.

W wyniku procesu jonizującego jednostka objętości gazu zjonizowanego zawiera pewną liczbę swobodnych elektronów i pewną liczbę jonów, przy czym liczby te nie muszą być sobie równe, gdyż niektóre atomy mogą stracić dwa lub więcej elektronów. Jako miarę stopnia jonizacji stosuje się pojęcie gęstości elektronowej – równej liczbie swobodnych elektronów na jednostkę objętości gazu. Maksymalne gęstości elektronowe warstw jonosferycznych zawierają się naogół w granicach  $10^8$  do  $10^{12}$  elektronów na  $m^3$ . Jonizacja w atmosferze ziemskiej zachodzi najintensywniej w porze dziennej. Równoległe z powstawaniem swobodnych jonów i elektronów zachodzi proces odwrotny polegający na ponownym łączeniu się swobodnych elektronów z jonami i noszący nazwę rekombinacji. Przy rekombinacji wydzielona jest ilość energii równa włożonej uprzednio pracy jonizacji. Prawdopodobieństwo rekombinacji jest tym większe im większa jest gęstość elektronowa – zależna od intensywności jonizacji. Ustala się więc pewien stan równowagi dynamicznej pomiędzy jonizacją i rekombinacją. Jest to stan uśredniony gdyż w rzeczywistości gęstość elektronowa podlega ciągłym fluktuacjom. Szybkość rekombinacji zależy od gęstości gazu (jego ciśnienia) i dlatego jest ona największa w warstwie D (zanikającej stosunkowo szybko po zachodzie Słońca), a warstwa F2 utrzymuje się przez całą noc.

## 2.1. Zjawiska fizyczne

Głównym czynnikiem oddziałującym na atmosferę, a tym samym na propagację fal jest Słońce. Promieniuje ono ciągłe widmo fal elektromagnetycznych: świetlnych o szerokim zakresie częstotliwości, promieniowanie nadfioletowe, rentgenowskie (X), radiowe i promieniowanie korpuskularne. Od czasu do czasu dochodzi na Słońcu do gigantycznych wybuchów wyrzucających w przestrzeń znaczne ilości materii i powodujących szczególnie intensywną choć krótkotrwałą jonizację. Istotne znaczenie dla propagacji fal radiowych ma aktywność słoneczna, a jej widocznym objawem są plamy na Słońcu. Aktywność słoneczna (liczba plam) ulega cyklicznym zmianom przy czym do najbardziej znanych cykli należy cykl 11-letni (rys. 2.1.1). Jest to wartość średnia ponieważ w rzeczywistości zaobserwowano długości cyklu od 9 do 13 lat. Oprócz niego zaobserwowano również istnienie dłuższych cykli: 22-letniego i innych, których omawianie wykraczałoby poza ramy niniejszego opracowania. Ich najbardziej zauważalnym skutkiem jest zmiana maksymalnych intensywności cykli 11-letnich – swego rodzaju modulacja ich amplitudy oddziałująca nie tylko na propagację fal ale w ogóle na klimat ziemski.



Cykl słoneczny uśredniony od 1749 roku

- A - minimum
- B - maksimum 112
- A - B 4 lata
- B - C 6,8 roku
- A - C 10,8 roku

Wskaźnikiem aktywności słonecznej jest względna liczba plam na jego powierzchni wyrażana tzw. liczbą Wolfa. Drugim z powszechnie przyjętych i publikowanych wskaźników aktywności jest strumień energii w paśmie 2,8 GHz (na fali ok. 10,7 cm). Oba wskaźniki są ze sobą powiązane. Plamy słoneczne są oczywiście rozłożone nierównomiernie na powierzchni Słońca dlatego też ich wpływ na propagację podlega dodatkowo wahaniom w 27-dniowym okresie obrotu Słońca wokół własnej osi.

Rys. 2.1.1. Typowy przebieg 11-letniego cyklu aktywności słonecznej (źródło *Rothammel*)

Do jonizacji atmosfery ziemskiej przyczynia się też w pewnym stopniu promieniowanie kosmiczne składające się z głównie z protonów i cząsteczek alfa. Cząsteczki te wpadając do atmosfery z wielką

prędkością wywołują na skutek zderzeń z atomami promieniowanie wtórne w postaci rozchodzących się wachlarzowato strumieni elektronów, mezonów, protonów i fotonów. Promieniowanie to jest wprawdzie słabym ale za to stałym czynnikiem jonizującym. Gwiazdy są zasadniczo silnym źródłem jonizacji ale ze względu na olbrzymie odległości od ziemi znacznie słabszym niż Słońce. Na stan jonosfery wywiera również wpływ ziemskie pole magnetyczne. Dlatego też wszelkie jego zmiany i zaburzenia odbijają się na warunkach propagacji fal, a wskaźniki aktywności geomagnetycznej mają zapewnione stałe miejsce w prognozach propagacji.

Na jonizację atmosfery wpływają również w pewnym stopniu meteoryty, których znaczenie dla propagacji fal radiowych objawia się w szczególności w zakresie fal metrowych. Jest to jednak tylko jonizacja sporadyczna. Wyładowania atmosferyczne wywierają natomiast krótkotrwałe działanie jonizacyjne i to głównie w troposferze. Ich wpływ na jonosferę jest bardzo mały.

Propagacja fal radiowych rozchodzących się wzdłuż powierzchni ziemi i w mniejszym stopniu dla fal rozchodzących się w inny sposób jest uzależniona od właściwości elektrycznych warstw powierzchniowych i od pokrycia terenu. Ujmując rzecz możliwie najogólniej straty energii w na powierzchni ziemi są tym niższe im wyższe jest jej przewodnictwo (właściwe). Najlepsze pod tym względem są więc akwenu wodne, przede wszystkim słonowodne, następnie grunty mokre i wilgotne, a na końcu skały znajdują się grunty suche. Głębokość wnikania fal, a więc i grubość warstw oddziaływujących na ich propagację zależy od długości fali i maleje wraz z nią – na falach krótkich są to głębokości rzędu kilku metrów do poniżej metra dla górnej granicy zakresu. Poprawę przewodności gruntu w pobliżu anteny uzyskuje się przez zainstalowanie przeciwwag – układu przewodów znajdujących się albo na powierzchni ziemi albo płytko pod nią, czasami też na niewielkiej wysokości nad powierzchnią.

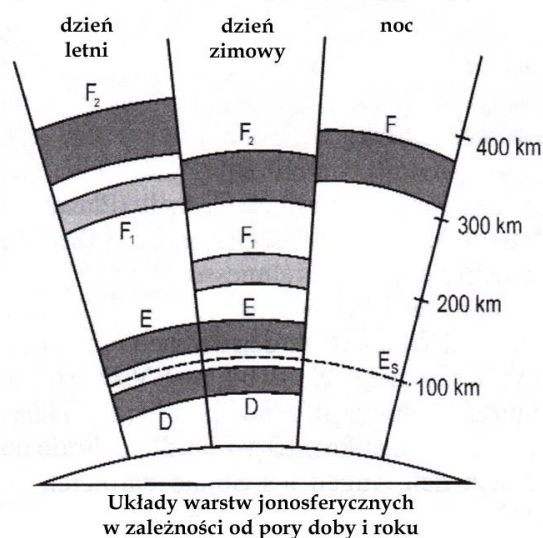
Nierówności terenu i jego pokrycie (w tym również roślinne, a zwłaszcza lasy) powodują dodatkowe tłumienie fal radiowych.

Jonizacja gazu polega na wytrąceniu z jego poszczególnych atomów jednego lub więcej elektronów warstwy zewnętrznej. W jonosferze zachodzi ona głównie pod wpływem promieniowania nadfioletowego i miękkiego rentgenowskiego Słońca lub zderzeń z korpuskułami pochodzenia słonecznego lub kosmicznego. Gaz zjonizowany zawiera oprócz elektrycznie obojętnych atomów i cząsteczek również pewną ilość swobodnych elektronów i dodatkowo naładowanych jonów dzięki czemu ma właściwości przewodzące. Ze względu na to, że energia niezbędna do jonizacji gazu zależy od jego rodzaju, i na fakt, że gazy w atmosferze ziemskiej są rozmieszczone nierównomiernie oraz że energia kwantów promieniowania jest zależna od jego częstotliwości i oczywiście jest przez nie tracona w wyniku jonizacji gazu co oznacza zwiększenie tłumienia promieniowania w tym podzakresie częstotliwości jonizacja gazów w atmosferze ziemskiej nie jest równomierna, a wprost przeciwnie. Występują w niej pewne obszary lub warstwy o zwiększonej jonizacji przedzielone obszarami słabiej zjonizowanymi. Stopnie czyli gęstości jonizacji każdej z warstw są różne. Poruszające się po przypadkowych torach elektrony i jony zderzają się również ze sobą przez co dochodzi do rekombinacji – ponownego połączenia elektronów z jonami i powstania neutralnych cząsteczek gazu. W jonosferze panuje więc stan dynamicznej równowagi, przy czym chwilowy stopień jonizacji ulega ciągłym fluktuacjom.

Wypadkowa gęstość jonizacji – gęstość elektronowa – zależna jest od natężenia docierającego do ziemi promieniowania i zmienia się w cyklu dobowym, rocznym (spowodowanym przez zmiany stosunku czasu naświetlenia do długości doby a także przez zmiany kąta naświetlenia) i w cyklach zależnych od aktywności Słońca. Do pewnego stopnia rolę odgrywa też 27-dniowy okres obrotu Słońca wokół własnej osi, w związku z nierównomiernym rozmieszczeniem plam słonecznych.

## 2.2. Warstwy jonosferyczne

Obszarami jonosferycznymi wywierającymi istotny wpływ na propagację fal radiowych są warstwy D, E i najwyższa F – rozdzielająca się w okresach intensywnego napromieniowania na dwie warstwy F1 i F2 (rys. 2.2.1). Warstwy te istnieją bądź stale bądź też tworzą się regularnie w określonych warunkach dlatego też są nazywane warstwami regularnymi. Rozdzielające je minima są wprawdzie płytkie ale jednak mierzalne. Oprócz nich w jonosferze tworzą się jeszcze warstwy sporadyczne, z których najważniejszą dla propagacji fal jest warstwa Es. Najsilniejszej jonizacji podlegają warstwy najwyższej położone.



Rys. 2.2.1. Układ warstw jonosferycznych w zależności od pory doby i roku (źródło Rothammel)

W miarę przenikania w głąb atmosfery intensywność promieniowania nadfioletowego wprawdzie maleje, ale jednocześnie rośnie gęstość atmosfery co powoduje wzrost gęstości elektronów. Fakt ten oraz zmiany składu atmosfery, a co za nim idzie energii niezbędnej do zjonizowania gazu powodują nierównomierny rozkład gęstości elektronowej i w efekcie pozwala na rozróżnienie obszarów o różnym stopniu jonizacji.

Najniżej położonym obszarem regularnym jest warstwa D rozciągająca się na od około 60 do około 90 km nad powierzchnią ziemi, przy czym jej maksimum wypada na wysokości 70–80 km. Występująca w niej maksymalna gęstość elektronowa leży w granicach  $2 \times 10^8 - 7 \times 10^8$  elektronów/m<sup>3</sup>. Warstwa ta odbija fale kilometrowe, a więc wywiera znaczący wpływ na propagację fal długich. Niestety jednocześnie tłumi ona dość silnie fale z dolnego zakresu fal krótkich. Jej tłumienie maleje z kwadratem częstotliwości. Warstwa ta powstaje stosunkowo szybko po wschodzie Słońca, a po jego zachodzie zanika równie szybko w wyniku rekombinacji. Jonizacja zachodzi pod wpływem twardego promieniowania X i promieniowania Liman-alfa o długościach rzędu 121,5 nm. W warstwie D zachodzi również jonizacja tlenu azotu NO.

Powyżej warstwy D, na wysokościach 90–130 km rozciąga się warstwa E, której główną cechą jest regularność zachodzących w niej zjawisk. Odbijają się od niej w nocy głównie fale długie i średnie a w dzień także fale z dolnego zakresu fal krótkich. Maksimum gęstości elektronowej w ciągu dnia wynosi od  $4 \times 10^{10}$  do  $12 \times 10^{10}$  e/m<sup>3</sup>, a w nocy spada do  $5 \times 10^9 - 10^{10}$  e/m<sup>3</sup>. Gęstość elektronowa warstwy E jest w dzień znacznie mniejsza w zimie niż w lecie. W nocy jej gęstość elektronowa wprawdzie znacznie maleje, także przy zachowaniu różnicy między latem i zimą, jednakże w dalszym ciągu jest ona w stanie odbijać fale długie i średnie. Warstwa E znajduje się jeszcze w obszarze jednorodnej atmosfery gdzie przeważającymi składnikami są tlen cząsteczkowy O<sub>2</sub> i azot cząsteczkowy N<sub>2</sub>. Jonizacja zachodzi pod wpływem miękkiego promieniowania X i krótkofalowego promieniowania nadfioletowego. Orientacyjna maksymalna długość skoku wynosi 2000 km.

Na wysokości 130–200 km rozpoczyna się największy obszar jonosfery – warstwa F dochodząca do około 450 km. W warunkach intensywnego naświetlenia – w letni dzień – występują w niej dwa maksima oznaczane jako F1 i F2. Obydwie warstwy F1 i F2 tworzą się w tego samego procesu fotojonizacji tlenu atomowego przez promienie nadfioletowe; pewną rolę może grać tu również fotojonizacja azotu cząsteczkowego i atomowego.

Warstwa F2 pomimo, że nie odznacza się taką regularnością jak E to jednak istnieje stale w normalnych warunkach jonosferycznych i to jej stan decyduje o warunkach propagacji fal krótkich. Obszar ten odznacza się dużą wrażliwością na zaburzenia jonosferyczne.

Obszar F1 pojawia się natomiast w dzień i to praktycznie tylko w lecie, a w zimie tylko czasami w warunkach dużej aktywności słonecznej. Jego maksimum wypada na wysokości około 160 – 200 km. Dla propagacji fal radiowych ma on znaczenie raczej drugorzędne, a nawet zachodzącą w niej absorpcję można uznać w pewnym stopniu za szkodliwą.

W porze nocnej, a w zimie także w dzień istnieje tylko pojedyncza warstwa F2, oznaczana czasami w literaturze w tej sytuacji jako warstwa F. Dzięki znacznemu rozrzedzeniu atmosfery na tych wysokościach rekombinacja w warstwie F2 zachodzi stosunkowo wolniej i dlatego może ona utrzymać się dłużej nawet bez dostatecznego naświetlenia. Maksimum jonizacji obszaru F2 leży w dzień w zimie i w warunkach słabszej aktywności słonecznej na wysokości około 210 km, a w warunkach letnich – na wysokości około 260 km. W nocy znajduje się ono na wysokości około 320 km. Maksimum to jest



w zimowy dzień silniejsze ( $2 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ) aniżeli w letni ( $10^{12} \text{ e/m}^3$ ) ze względu na mniejsze rozszerzanie się gazów w zimowych warunkach termicznych. Maksimum dzienne gęstości elektronów wypada we wczesnych godzinach popołudniowych. Jedną z najistotniejszych cech warstwy F2 jest jej asymetria względem równika geograficznego; symetria zauważa się raczej w stosunku do równika geomagnetycznego. W pobliżu równika geomagnetycznego występuje obniżenie gęstości elektronowej, zaś w odległości około 10 – 15 stopni od niego po obu stronach występują dość wyraźne maksima gęstości elektronowej.

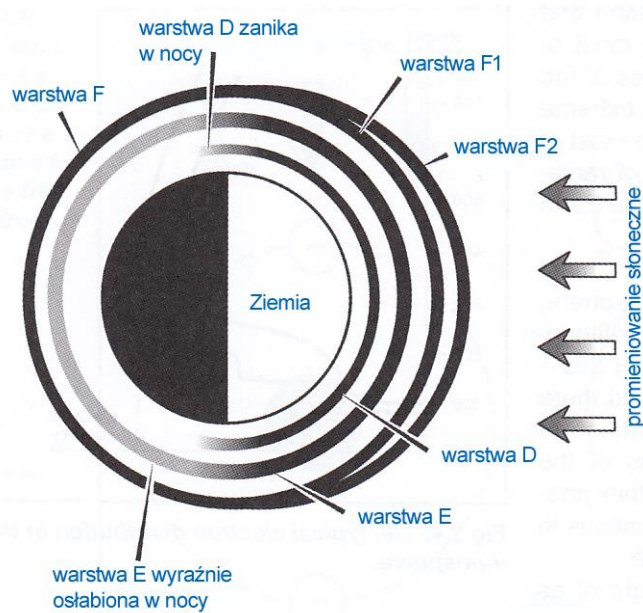
Od warstwy F2 odbijają się fale krótkie o średnich i większych częstotliwościach aż do omówionej dalej granicy możliwości ich odbijania. Orientacyjna maksymalna długość skoku fali odbitej wynosi 4000 km. Leżąca na wysokości 700–800 km warstwa G nie ma większego znaczenia dla propagacji fal radiowych. Podobnie też nieistotna jest występująca porankami na wysokości 65 – 70 km słabo zjonizowana przez promieniowanie kosmiczne warstwa C.

Spośród warstw sporadycznych najważniejszą i najczęściej występującą jest sporadyczna warstwa E nosząca oznaczenie Es. Znajduje się ona w obszarze stałej warstwy E i składa się z szybko poruszających się obłoków o dosyć silnej koncentracji elektronów i zmiennej strukturze. Jej grubość jest bardzo mała. Warstwa Es występuje głównie w lecie – pomiędzy majem a sierpniem na półkuli północnej. Powstaje ona najprawdopodobniej wskutek działania meteorów, promieni kosmicznych i promieniowania cząsteczkowego. Warstwa ta może utrzymywać się nawet przez kilka godzin i ma głównie znaczenie dla propagacji fal w dolnym zakresie UKF, a więc dla pasm amatorskich 50, 70 i czasami też 144 MHz.

Poprawa warunków propagacji w strefie półcienia (ang. *grey line*) na pograniczu dnia i nocy jest spowodowana szybszym zanikaniem warstwy D w porównaniu z obniżaniem poziomu jonizacji warstw wyższych. Poprawa jest zauważalna w pierwszym rzędzie na niższych pasmach krótkofalowych do około 10 MHz. Z pasm amatorskich są to zakresy 80, 60, 40 i 30 m. Pasma wyższe są i tak wyraźnie słabiej tłumione przez warstwę D. Na pasmach wyższych wpływ propagacji w półcieniu daje się czasami zaobserwować gdy na jednym końcu trasy warstwa F jest jeszcze dostatecznie zjonizowana aby umożliwić łączność na tych częstotliwościach, a na drugim końcu jonizacja już wzrasta w dostatecznym stopniu. Zaobserwowano także wzrost poziomu sygnału na trasach przecinających prostopadłe obszar półcienia, ale zjawisko to nie jest jeszcze dostatecznie wyjaśnione.

### 2.3. Dobowy i sezonowy układ warstw

Systematyzując przedstawione powyżej zależności można rozróżnić cztery zasadnicze przypadki: dzień letni i zimowy, oraz lenią i zimową noc.



Rys. 2.3.1. Rozkład warstw jonosferycznych wokół Ziemi

W lecie w dzień istnieją cztery warstwy: D, E, F1 i F2, natomiast w zimie w dzień przeważnie występują tylko trzy: D, E i F2. Warstwa F1 może występować w zimie w latach większej aktywności słonecznej. Gęstość elektronowa warstw D i E jest w zimie niższa aniżeli w lecie, a w warstwie F2 panuje sytuacja odwrotna, w dzień, a zwłaszcza popołudniami jest ona w zimie dużo wyższa niż w lecie.

W nocy warstwa D zanika całkowicie, niezależnie od pory roku, a gęstość elektronowa warstwy E znacznie maleje, jest więc ona w zimową noc mniejsza aniżeli w letnią. Główną warstwą zarówno w noc zimową jak i letnią pozostaje F2, z tym że w zimie jej

gęstość elektronowa jest mniejsza aniżeli w lecie. Stopień jonizacji maleje w miarę zbliżania się do obszarów podbiegunowych.

Wzrost liczby Wolfa – aktywności słonecznej – wpływa na zwiększenie gęstości elektronowej warstw zjonizowanych, i odwrotnie, ze spadkiem liczby plam słonecznych idzie w parze zmniejszenie koncentracji elektronów. Zmiany gęstości elektronowej wywołane normalną zmiennością aktywności słonecznej są długookresowe.

Na długookresowy zmienny przebieg gęstości elektronowej związany z cykliczną zmiennością aktywności słonecznej nakładają się zmiany sezonowe, a na te z kolei zmiany dobowe, a dalej chwilowe zmiany fluktuacyjne. W dłuższych okresach czasu należy uwzględnić zmiany aktywności słonecznej wywołane długimi cyklami słonecznymi. W wyniku tej superpozycji struktura jonosfery jest w większym lub mniejszym stopniu nieustannie zmienna, co z kolei decyduje o niestabilnym charakterze propagacji jonosferycznej, zwłaszcza w zakresie fal dekametrowych (o długościach 10 – 100 m; fal krótkich).

Oprócz przedstawionej w przybliżeniu regularnej zmienności struktury jonosfery następują jeszcze co pewen czas gwałtowne, stosunkowo krótkotrwałe (rzędu godzin lub dni) zaburzenia prowadzące do częściowego lub zupełnego rozbicia regularnych warstw jonosferycznych albo do gwałtownego wzrostu jonizacji, daleko ponad zwykłą normę.

#### 2.4. Niejednorodność jonosfery

Jedną z istotniejszych cech jonosfery jest jej niejednorodność. Niezależnie od struktury warstwowej i charakterystycznych dla warstw sporadycznych obłoków elektronowych występują w niej liczne drobne niejednorodności. Jeśli potraktować powierzchnię warstw jako odbijającą to na skutek tych niejednorodności należałoby określić ją jako szorstką. Ponieważ fale radiowe wnikają do warstwy jonosferycznej, od której pozornie ulegają odbiciu interesujące z punktu widzenia propagacji są nie tylko niejednorodności występujące na powierzchni warstwy ale także istniejące w jej wnętrzu.

Drobne niejednorodności powodują, że struktura warstwy jest niejednolita. Zawiera ona zazwyczaj większą lub mniejszą ilość małych obłoków i „granul”. Pojawiają się one nieustannie i znikają, a na ich miejscu powstają nowe. W rezultacie warstwę można uznać za zmętnioną. Mówi się wówczas o mętności jonosfery. Niejednorodności zanikają wskutek dyfuzji – polegającej na wzajemnym przenikaniu cząsteczek.

Powstawanie i zanikanie niejednorodności jonosferycznych zachodzi zasadniczo w sposób chaotyczny. W pewnych obszarach zmiany te mogą też zachodzić w sposób bardziej uporządkowany. Po zaniknięciu niejednorodności w jednym miejscu pojawiają się nowe w sąsiedztwie, po czym znowu zanikają i pojawiają nieco dalej. Sprawia to wrażenie jak gdyby niejednorodności przesuwały się w określonym kierunku. Niekiedy dokonuje się to z bardzo dużymi prędkościami rzędu kilku tys. km/h. Zjawisko to jest znane pod nazwą wichrów jonosferycznych. Mogą one mieć kierunek równoległy do powierzchni ziemi (wichry poziome). Występują też przemieszczenia mające charakter turbulencji.

Oprócz tego warstwy mają charakter pofalowany (wynikający z niejednorodnego rozmieszczenia gęstości elektronowej w funkcji odległości od powierzchni ziemi). Powoduje to odbijanie fal w wielu innych kierunkach, a nawet występowanie propagacji cięciwowej (ang. *chordal hop*, niem. *Chordal Hop Propagation*), kiedy to fala odbita w jednym miejscu jonosfery trafia nie na powierzchnię ziemi, a na inny punkt warstwy odbijającej i dopiero stamtąd na powierzchnię ziemi. Zjawiskiem tym zajmował się prof. St.Manczarski.

#### 2.5. Rodzaje fal i sposoby ich propagacji

W zależności od dominującego wpływu środowiska na właściwości propagacji rozróżniamy następujące rodzaje fal radiowych:

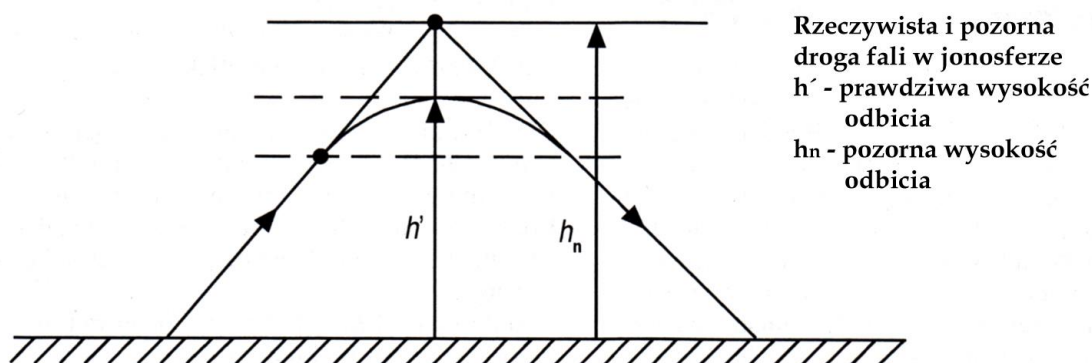
- fale przyziemne,
- fale troposferyczne,
- fale jonosferyczne.

Dla łączności kosmicznych można przyjąć kosmos jako wolną przestrzeń, a rozchodzące się w nim fale – jako fale w wolnej przestrzeni. Nie jest to jednak idealna wolna przestrzeń ponieważ meteory, pyły

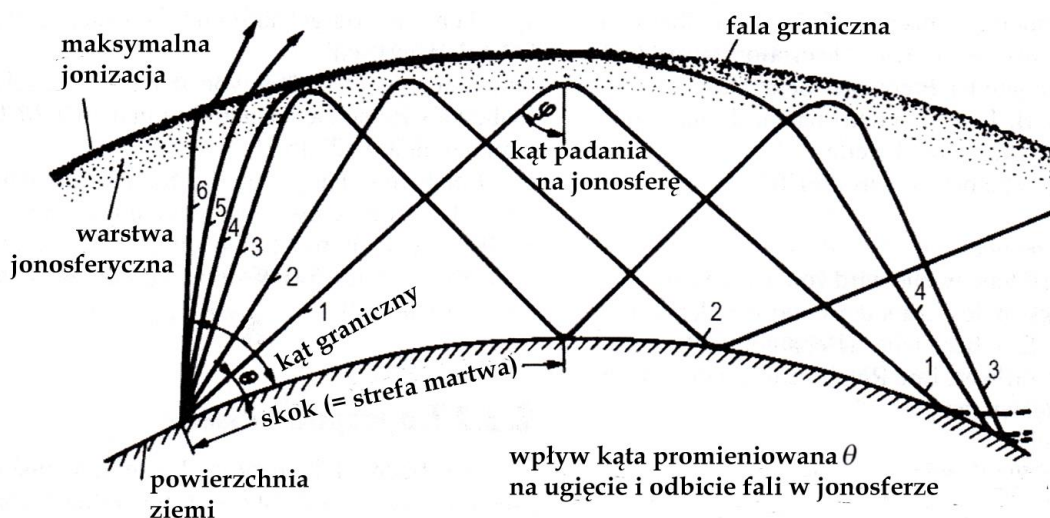
kosmiczne i resztki gazów w pobliżu Ziemi i innych ciał niebieskich powodują rozpraszanie i tłumienie fal.

Fale przyziemne rozchodzą się w pobliżu powierzchni ziemi nie korzystając z pośrednictwa żadnej warstwy atmosferycznej, przy czym należy tutaj rozróżnić dwa przypadki: fali powierzchniowej rozchodzącej się bezpośrednio po powierzchni ziemi i fali przestrzennej występującej wówczas gdy jedna lub obie anteny znajdują się na pewnej wysokości nad ziemią. Efektem charakterystycznym dla fali powierzchniowej jest efekt dyfrakcji, dzięki któremu fale mogą pokonywać nierówności terenu, a także rozchodzić się wzdłuż kulistej powierzchni ziemi. Fale przestrzenne mogą docierać do anteny odbiorczej bezpośrednio lub po odbiciu od powierzchni ziemi, może też dochodzić do interferencji fal docierających tymi różnymi drogami.

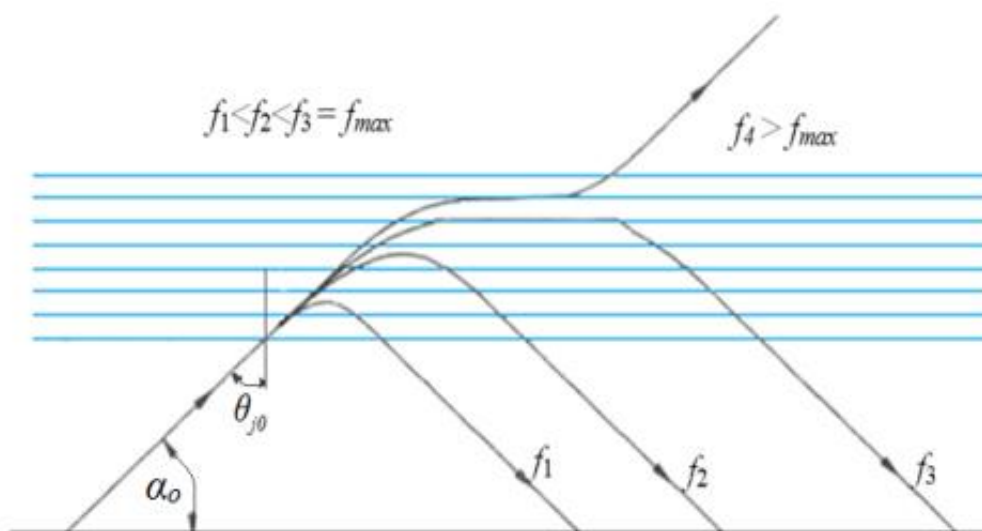
Propagację troposferyczną jako dotyczącą głównie fal ultrakrótkich omówimy w jednym dalszych rozdziałów. Dla fal krótkich istotne są więc dwa pozostałe mechanizmy propagacji – propagacja fal przyziemnych i jonosferycznych. Zasięg fal przyziemnych jest zależny od częstotliwości i wynosi od kilkudziesięciu do około 100 km dla dolnych pasm krótkofalowych i zmniejsza się do kilkunastu km dla górnych – jest on w znacznym stopniu zależny od właściwości elektrycznych wierzchniej warstwy ziemi, dlatego też zasięgi te należy traktować jako orientacyjne. Jedynie na falach długich i średnich zapewniają one zasięgi kontynentalne i dalsze. Łączności na dystansach dłuższych od wymienionych odbywają się więc wyłącznie za pośrednictwem fal odbitych od jonosfery. W zależności od pasma i konkretnej sytuacji pomiędzy granicą zasięgu fal przyziemnych a obszarem naświetlanym przez fale odbite od jonosfery może istnieć obszar, w którym odbiór jest niemożliwy. Jest to tzw. strefa martwa.



Rys. 2.5.1. Przebieg odbicia fali elektromagnetycznej w jonosferze (źródło Rothammel)

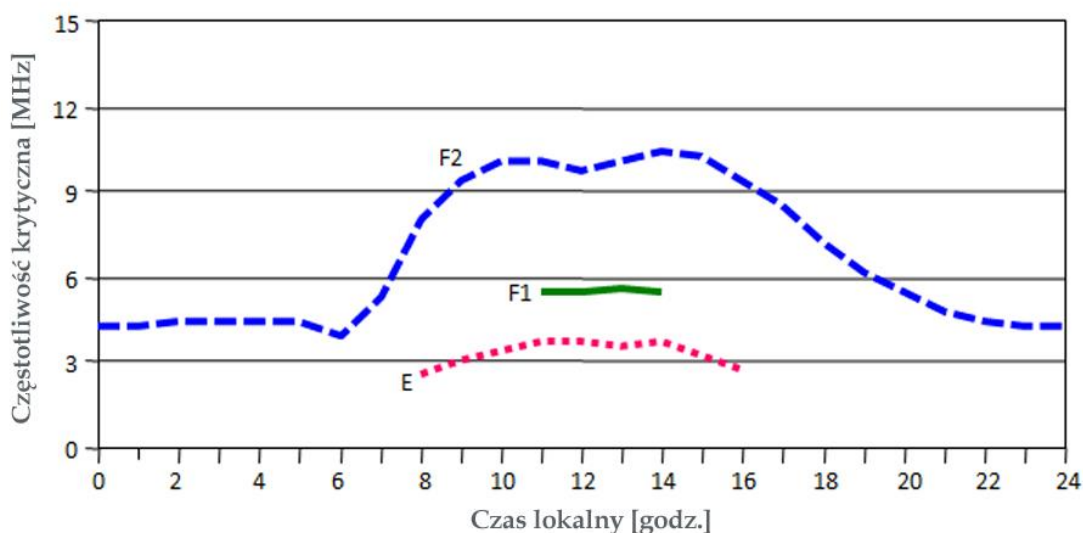


Rys. 2.5.2. Wpływ kąta promieniowania fali na ugięcie i odbicie fali w jonosferze. Powstawanie odbić wielokrotnych. Fala padająca pod kątem granicznym (fala nr 4) rozchodzi się na dłuższym odcinku w obszarze maksymalnej jonizacji po czym jako odbita powraca na ziemię w znacznej odległości od anteny.



Rys 2.5.3. Wpływ częstotliwości fali na jej ugięcie i odbicie w jonosferze,  $f_{max}$  jest częstotliwością MUF dla danego kąta padania fali, czyli dla danego zasięgu i jest obliczana z częstotliwości krytycznej w oparciu o prawo sekansa

Jonosfera rzeczywista nie jest jednorodna, gdyż gęstość elektronowa zmienia się w każdym z jej obszarów osiągając na pewnych wysokościach maksima. Fale radiowe nie odbijają się od niej jak od powierzchni zwierciadła na pewnej ustalonej wysokości, a wnikają w jej głąb przy czym ich tor ulega coraz większemu zakrzywieniu aż do zawrócenia ich kierunku w stronę ziemi (rys. 2.5.1). Głębokość wnikania fali do jonosfery zależy od kąta jej padania i rośnie w miarę wzrostu częstotliwości, co oznacza, że dla pewnej częstotliwości przeniknie ona na poza warstwę i nie zostanie odbita w kierunku ziemi. Częstotliwość dla której nie występuje już odbicie nosi nazwę częstotliwości granicznej. Najwyżej w głąb wnika fala padająca pionowo na jonosferę co oznacza, że częstotliwość graniczna jest w tym przypadku najniższa. Nosi ona nazwę częstotliwości krytycznej i jest regularnie obserwowana przez jonosferyczne stacje pomiarowe.



Rys. 2.5.4. Przykładowy przebieg częstotliwości krytycznej w zimie w okresie maksymalnej aktywności Słońca. MUF (4000) dla warstwy F2 i MUF (2400) dla warstwy E są około 3,2 raza wyższe

Częstotliwości graniczne dla fal padających ukośnie są zależne od kąta padania i rosną w miarę oddalania się tego kąta od pionu. Zależność ta nosi nazwę prawa sekansa. Pozwala ona na obliczanie częstotliwości granicznych dla dowolnych kątów padania na podstawie częstotliwości krytycznej lub



częstotliwości granicznej dla innego znanego kąta padania. Oprócz częstotliwości krytycznej publikowane są wybrane częstotliwości graniczne dla standardowych zasięgów (czyli kątów padania) – przykładowo dla zasięgów rzędu 2000, 3000 lub 4000 km zależnie od warstwy. Częstotliwości te są zwane maksymalnymi częstotliwościami użytkowymi (ang. *Maximum Usable Frequency*) i są oznaczane skrótem MUF. Należy jednak pamiętać, że z powodu dynamicznie zmieniającego się stanu jonosfery jest to swego rodzaju średnia statystyczna, a nie sztywna wartość. Oczywiście wartości MUF są różne dla każdej z warstw.

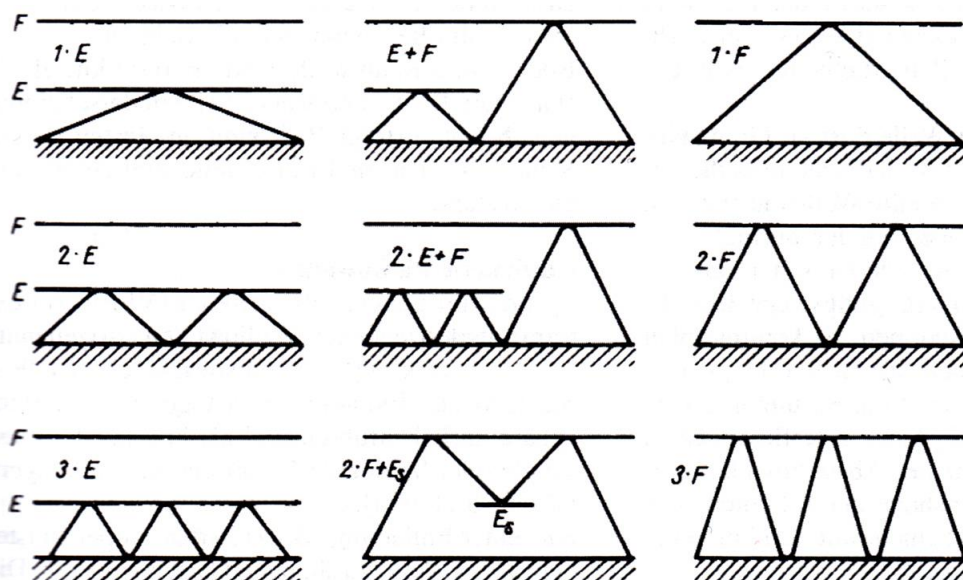
Fale o częstotliwościach zbliżonych do MUF są słabiej tłumione aniżeli dłuższe, ale biorąc pod uwagę zmienność MUF jako optymalną częstotliwość pracy (fr. *Fréquence Optimum de Traffic*) FOT przyjmuje się dla warstwy F2 0,85 wartości MUF, a w praktyce oczywiście leżącą w paśmie najbardziej do niej zbliżonym. Wartość FOT dla warstwy E jest prawie równa jej MUF (0,97 MUF).

Ponieważ w porze dziennej fale dolnego zakresu KF są tłumione przez warstwę D i częściowo również przez warstwę E zakres użyteczny jest w tym czasie ograniczony również od dołu, przy czym dolna częstotliwość graniczna jest oznaczana jako LUF (ang. *Lowest Usable Frequency*). Zwiększenie mocy nadawania pozwala na skompensowanie w pewnym stopniu wpływu tłumienia dlatego też wartość LUF jest zawsze podawana dla określonej mocy. W nocy warstwa D zanika całkowicie, a gęstość elektronowa warstwy E maleje do tego stopnia, że zakres użyteczny KF nie jest ograniczony od dołu. Wpływ stopnia jonizacji warstwy D na wartość LUF oznacza także jej zależność od szerokości geograficznej. Wartość ta rośnie więc w miarę zbliżania się do rejonów zwrotnikowych i równikowych, a maleje w regionach bliższych biegunom.

Przypadkiem najczęściej występującym jest jednorazowe odbicie fali od odpowiedniej warstwy jonosfery i jej powrót na ziemię ale istnieje również propagacja wieloskokowa, kiedy fala padająca na powierzchnię ziemi po pierwszym odbiciu odbija się od niej i trafia ponownie do jonosfery, gdzie ulega dalszemu odbiciu (rys. 2.5.5). Zasadniczo możliwe jest wystąpienie większej liczby takich odbić ale każde odbicie od powierzchni ziemi wiąże się ze znacznymi stratami energii, a poza tym jonosfera musi mieć w miejscu drugiego odbicia odpowiedni stopień jonizacji więc przypadki łączności z wykorzystaniem odbić wielokrotnych są z natury rzeczy rzadsze aniżeli łączności przez odbicia pojedyncze.

Oprócz odbić wielokrotnych od tej samej warstwy (najczęściej F2) możliwe są także odbicia od dwóch warstw (najczęściej E i F2) w różnych kolejnościach.

Propagacja przez rozproszenie w jonosferze jest podobna do analogicznej propagacji w troposferze, ale zachodzi tylko w dość ograniczonym zakresie częstotliwości fal metrowych.



Rys. 2.5.5. Odbicia wielokrotne od tej samej lub różnych warstw dają wyraźnie zwiększenie zasięgów, ale niektóre konstelacje warstw zdarzają się stosunkowo rzadko i są krótkotrwałe

Tabela 2.5.1

Zależność MUF od pożądanego zasięgu odbioru (kąta promieniowania fali). Wielokrotność częstotliwości krytycznej

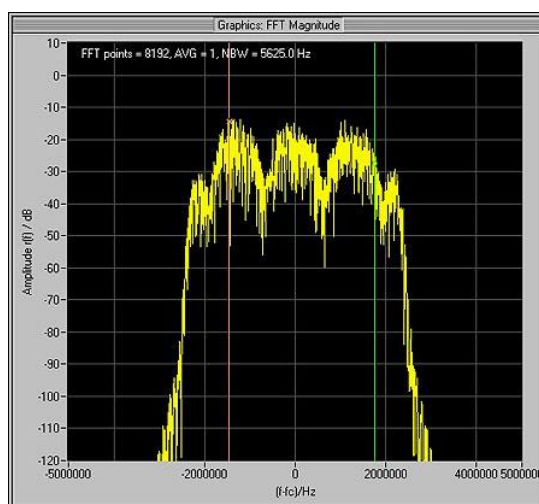
Warstwa	Odległość [km]			
	1000	2000	3000	4000
Sporadyczna E	4,0	5,2	—	—
E	3,2	4,8	—	—
F1	2,0	3,2	3,9	—
F2 zima	1,8	3,2	3,7	4,0
F2 lato	1,5	2,4	3,0	3,3

## 2.6. Zaniki odbioru

Zjawiskiem charakterystycznym dla odbioru radiowego, nie tylko w zakresie fal krótkich są zaniki (szczególnie szkodliwą ich formą są zaniki selektywne). Ich występowanie na KF jest spowodowane interferencją (nakładaniem się na siebie) fal docierających do odbiornika różnymi drogami. Antena nadawcza promieniuje fale w całym wachlarzu kątów zależnym od jej charakterystyki kierunkowej, co oznacza, że padają one na jonosferę również pod różnymi kątami i z tego powodu docierają do odbiornika wieloma drogami o nieco różnej długości. Fale odbierane wielodroźnie sumują się w antenie i w zależności od ich faz suma ta ulega wzmocnieniu bądź osłabieniu. Dynamiczne zmiany stanu jonosfery powodują, że sytuacja nie jest stabilna i ulega dość częstym zmianom – pojawianiu się i zanikaniu sygnału odbieranej stacji. Dla przeciwdziałania skutkom zaników odbiorniki długo-, średnio- i krótkofalowe są wyposażone w automatyczną regulację wzmocnienia – ARW (ang. *Automatic Gain Control, AGC*, niem. *Automatische Verstärkungsregelung, AVR*).

Drugim rodzajem zaników są zaniki polaryzacyjne spowodowane zmianami polaryzacji fali odbitej przez jonosferę. Powoduje to mniejszą lub większą niezgodność polaryzacji odbieranej fali z polaryzacją anteny i w związku z tym wahania napięcia sygnału na jej zaciskach.

Trzecim istotnym powodem zaników jest zmieniająca się jonizacja niższych warstw jonosfery. Powoduje to zmiany tłumienia przechodzących przez nie fal co w konsekwencji wywołuje zaniki absorbcyjne.



Fot. 2.6.1. W efekcie zaniku selektywnego niektóre składowe sygnału są wyraźnie osłabione

W czasie silniejszych wybuchów słonecznych do ziemi docierają silne strumienie wyrzucanych przez nie cząstek powodujące silny wzrost stopnia jonizacji dolnych warstw atmosfery (i równoczesne zmniejszenie stopnia jonizacji warstwy F2 i wzrost jej pozornej wysokości). Tłumienie warstw dolnych D i E może wzrosnąć nawet do tego stopnia, że uniemożliwi odbicia fali od warstwy F2 i w efekcie prowadzenie łączności w przeważającej części lub nawet w całym zakresie fal krótkich. Zjawisko to

nosi nazwę wygaszenia radiowego, a jego szczególnym przypadkiem (spowodowanym nagłym wzrostem jonizacji warstwy D) jest zanik powszechny noszący również nazwę efektu Møgel-Dallingera. O ile wygaszenie radiowe może trwać od kilku godzin do kilku dni o tyle efekt Møgel-Dallingera trwa przeważnie od kilku minut do kilku godzin.

## 2.7. Burze jonosferyczne i geomagnetyczne

Burze jonosferyczne rozpoczynają się zwykle dość gwałtownymi turbulencjami powodującymi częściowe rozwarstwienie jonosfery, powstanie zjonizowanych obłoków przemieszczających się w sposób nieregularny oraz tworzenie się krótkotrwałych warstw przejściowych.

Burze trwają zazwyczaj od kilku godzin do kilku dni. Powrót jonosfery do stanu normalnego odbywa się stosunkowo wolno i może trwać nawet przez kilka dni. Ich częstotliwość występowania jest związana z jedenastoletnim cyklem aktywności słonecznej. Najwięcej zaburzeń występuje w okresie maksimum plam słonecznych.

Burzom jonosferycznym towarzyszą z reguły burze geomagnetyczne polegające na silnych wahaniami natężenia pola magnetycznego. Wahania te dochodzą do kilku procent i zachodzą w sposób nieregularny. Burze magnetyczne rozpoczynają się zazwyczaj nagle, prawie jednocześnie na całym obszarze kuli ziemskiej. Rozróżniane są dwie fazy burzy: pozytywna i negatywna. Podczas fazy pozytywnej pozioma składowa pola jest większa niż normalnie, a w czasie fazy negatywnej jest ona mniejsza. Przejście z fazy pozytywnej do negatywnej odznacza się gwałtownymi i nieregularnymi wahaniami poziomu natężenia pola. Najbardziej nieregularne i najsilniejsze wahania zachodzą na dużych szerokościach geograficznych.

Z burzami magnetycznymi związane jest zjawisko występowania zorzy polarnej. Objawia się świeceniem górnych warstw rozrzedzonego powietrza. Normalnie jest ona widoczna w promieniu 2 – 3 tysięcy kilometrów wokół biegunów magnetycznych. W czasie silnych burz magnetycznych i jonosferycznych jest ona widoczna nawet w strefie umarkowanej.

### 3. Fale długie i średnie

Fale myriametrowe (3 – 30 kHz) i kilometrowe (30 – 300 kHz) rozchodzą się wokół ziemi sposobem falowodowym. Polega on na tym, że dolną granicę falowodu-duktu stanowi powierzchnia ziemi, a górną – wewnętrzna powierzchnia warstwy jonosferycznej. Obie powierzchnie tworzą jak gdyby falowód kulisty, wewnątrz którego fale długie rozchodzą się z małymi stratami na duże odległości. Na antypodach (w stosunku do stacji nadawczej), gdzie zbiegają się fale dochodzące ze wszystkich kierunków obserwuje się nawet pewien wzrost natężenia pola w porównaniu z obszarami przylegającymi.

Anteny nadawczą i odbiorczą można (zwłaszcza w stosunku do długości fali) traktować jako anteny umieszczone na powierzchni ziemi. Do anteny odbiorczej dociera więc fala powierzchniowa. Ponieważ ziemia rzeczywista jest półprzewodnikiem o skończonej przewodności właściwej i pewnej przenikalności dielektrycznej pole elektromagnetyczne jest wytwarzane zarówno nad ziemią, jak i pod jej powierzchnią. Pole elektromagnetyczne wewnątrz ziemi powoduje powstanie w niej prądu wydzielającego na jej oporności rzeczywistej pewną moc. Moc ta jest pobierana z fali powierzchniowej i powoduje jej tłumienie, większe niż to wynika z rozprzestrzeniania się mocy.

Ponieważ moc tracona w ziemi jest czerpana z fali powierzchniowej to wektor Poyntinga (wektor przepływu mocy) musi być skierowany nie równoległe do powierzchni ziemi, a nieco skośnie w dół.

W zakresach większych częstotliwości właściwości ziemi coraz bardziej zbliżają się do dielektryka. Woda słodka wykazuje właściwości dielektryka już w zakresie dużo mniejszych częstotliwości, natomiast woda słona posiada cechy przewodnika w szerokim zakresie częstotliwości.

Fala wnika do ziemskiego półprzewodnika ulega tłumieniu – wykładniczemu w funkcji głębokości. Jako głębokość wnikania fali do ziemi przyjęto głębokość, na której energia fali jest stłumiona  $e$ -krotnie.

Orientacyjnie głębokość wnikania w głąb ziemi o przeciętnej przewodności dla fal myriametrowych jest rzędu kilkudziesięciu do kilkuset metrów, dla fal kilometrowych – od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów, a dla fal hektometrowych (300 kHz – 3 MHz) – rzędu kilku do kilkunastu metrów. Fale o częstotliwościach powyżej 30 MHz wnikają na głębokości rzędu centymetrów. Głębokość wnikania decyduje o tym, które warstwy ziemi biorą udział w rozchodzeniu się fal nad ziemią niejednorodną.

Fala powierzchniowa rozchodzi się po zakrzywionej powierzchni ziemi dzięki zjawisku dyfrakcji.

Polega ona na uginaniu się fali napotykającej przeszkodę w taki sposób, że fala niejako opływa tą przeszkodę i biegnie dalej. Przeszkoda powoduje jedynie zwiększone tłumienie fali. Rozpatrując kulistą ziemię jako idealnie gładką możemy traktować wypukłość ziemi na pewnym odcinku trasy fali również jako przeszkodę o wysokości  $h$ . Dopóki wysokość przeszkody jest co najwyżej współmierna z długością fali tłumienie jej energii jest jeszcze stosunkowo małe. Natężenie pola w obszarze dyfrakcji jest tym większe czym większa jest długość fali, czyli inaczej rzecz biorąc czym dłuższa fala tym jest słabiej tłumiona wskutek dyfrakcji. Największy wpływ na tłumienie fali mają odcinki trasy bezpośrednio przyległe do anteny nadawczej i odbiorczej.

#### 3.1. Fale myriametrowe

Fale myriametrowe obejmujące zakres 3 – 30 kHz są też nazywane falami bardzo długimi (ang. VLF). Tylko część tego zakresu znajduje zastosowanie w radiokomunikacji, a tym bardziej w radiokomunikacji amatorskiej, chociaż krótkofalowcy przeprowadzali już eksperymenty na nieregulowanych częstotliwościach tuż poniżej 9 kHz.

Zgodnie z podstawowymi prawami tłumienia fali powierzchniowej jest tym mniejsze im mniejsza jest jej częstotliwość. Fale bardzo długie odznaczają się więc stosunkowo bardzo małym tłumieniem fali powierzchniowej. Dużą rolę wspomagającą odgrywa w tym zakresie jonosfera i to zarówno w dzień jak i w nocy. Fala jonosferyczna rozchodzi się również z bardzo małymi stratami, a w dużych odległościach od stacji nadawczej wyraźnie góruje nad falą powierzchniową. Fale bardzo długie uzyskują duże zasięgi właśnie dzięki fali jonosferycznej. Rola fali powierzchniowej jest prawie stała w dzień i w nocy, i w zasięgu do 500 – 1000 km ma wyraźną przewagę nad falą jonosferyczną.

Słabą stroną pracy w tym zakresie jest bardzo mała sprawność anten nadawczych i wysoki poziom szumów atmosferycznych. Oporność promieniowania zwykłych anten, przykładowo typu T, jest w tym zakresie rzędu małego ułamka oma. Konstrukcje specjalne jak antena wielokrotnie uziemiona (stosowa-

na m.in. w transatlantyckiej stacji nadawczej w Boernerowie i w szwedzkiej stacji Grimeton) pozwalają wprawdzie na uzyskanie znacznie większych sprawności, ale są ona poza zasięgiem możliwości krótkofalowców. Wysoki poziom szumów atmosferycznych stawia wymagania uzyskania odpowiednio dużego natężenia pola, co też leży poza zasięgiem możliwości krótkofalarskich. Wymienione powyżej stacje nadawcze pracowały z mocami kilkuset kW. Eksperymenty w tym zakresie krótkofalowcy mogą prowadzić jedynie przy użyciu możliwie najskuteczniejszych emisji cyfrowych i cyfrowej obróbki sygnałów.

Oprócz małego tłumienia zakres ten posiada jeszcze jedną zaletę, a mianowicie bardzo dobrą stabilność warunków propagacji co zapewnia wysoką niezawodność łączności. Zakres ten jest zawsze odpowiedni do pracy niezależnie od pory doby, roku i fazy aktywności słonecznej.

Na falach myriametrowych zaobserwowno także świstowy sposób rozchodzenia się fal. Rozchodzą się one wzdłuż linii ziemskiego pola magnetycznego. Trasy wybiegają daleko w przestrzeń, na odległości rzędu 5 – 10 średnic kuli ziemskiej. Warunki propagacji fal zależą od stanu górnych warstw jonosfery. Źródłem występujących tutaj świstów są zakłócenia atmosferyczne. Charakterystyczną cechą propagacji świstowej jest położenie obu punktów końcowych tras na szerokościach geograficznych symetrycznych wobec równika geomagnetycznego (na sprzężonych szerokościach geomagnetycznych).

### 3.2. Fale kilometrowe

Zakres od 30 do 300 kHz nosi nazwę fal długich lub kilometrowych (ang. LF). Potocznie falami długimi bywa też nazywany wspólny zakres fal bardzo długich i długich.

Pod względem właściwości propagacji fale kilometrowe można podzielić na dwa podzakresy. Pierwszy z nich od 30 do 100 kHz charakteryzuje się właściwościami propagacyjnymi zbliżonymi do fal myriametrowych. Drugi – od 100 do 300 kHz – stanowi przejście do fal średnich i propagacja w nim traci właściwości propagacji fal długich w miarę wzrostu częstotliwości.

Wraz ze wzrostem częstotliwości rośnie tłumienie fali powierzchniowej, zwiększa się także wrażliwość na wpływy pory doby, roku i aktywności słonecznej. Rola jonosfery rośnie też w miarę zbliżania się do górnej granicy zakresu. Występuje tam już wyraźne rozgraniczenie między warunkami propagacji dziennej i nocnej. W porze dziennej fala powierzchniowa posiada decydujące znaczenie na dystansach do 1000 – 2000 km. W porze nocnej zasięg jej decydującego wpływu jest ograniczony do około 200 – 300 km. W dzień fale długie odbijają się od warstwy D, a w nocy – od warstwy E. W obu przypadkach wnikają do nich bardzo płytko, a więc zachodzi prawie pełne odbicie bez strat, zwłaszcza w zakresie fal myriametrowych i dłuższych fal kilometrowych. Warstwa D również nie wprowadza strat w sytuacji odbicia od warstwy E, ponieważ w nocy praktycznie nie istnieje. Krótsze fale kilometrowe (powyżej 100 kHz) są silnie absorbowane w dzień przechodząc przez warstwę D do warstwy E i z powrotem. Pewne straty energii zachodzą dla nich także i w warstwie E. Na pograniczu fal hektometrowych absorpcja jest tak duża, że propagacja jonosferyczna w dzień, przynajmniej w lecie, staje się niemożliwa.

Wzrost tłumienia energii fal kilometrowych w stosunku do myriametrowych jest częściowo skompensowane przez większe sprawności anten i średnio kilkakrotnie niższy poziom szumów atmosferycznych. Zakres ten jest też znacznie pojemniejszy w stosunku do fal myriametrowych. Leżą w nim m.in. amatorski podzakres 135,70 – 137,80 kHz oraz coraz słabiej wykorzystywany zakres radiofoniczny 150 – 285 kHz. Pracuje w nim na częstotliwości 225 kHz stacja nadawcza I Programu Polskiego Radia w Solcu Kujawskim. Również i ten zakres charakteryzuje się stabilnością propagacyjną, chociaż nie w takim stopniu jak fale myriametrowe.

W amatorskich łącznościach w paśmie 135 kHz dominują emisje cyfrowe i wolna telegrafia QRSS. W większości krajów obowiązuje ograniczenie promieniowanej mocy ERP do 1 W. Przy przeciętnych sprawnościach anten amatorskich w tym zakresie moce doprowadzone do anteny są rzędu kilowatów. Wpływ nierówności terenu i jego naturalnego i sztucznego pokrycia jest mało istotny w zakresie fal kilometrowych, a jeszcze mniej – myriametrowych. Wyjątek stanowią tylko góry o wysokościach współmiernych z długością (krótszych) fal kilometrowych. Dzięki dużej zdolności dyfrakcyjnej nie stanowią one jednak poważnej przeszkody dla propagacji fal powierzchniowych.

Warunki propagacyjne dla fal bardzo długich i długich zależą też częściowo od wyboru kierunku trasy. O różnicy tej decydują nasświetlenie trasy i pole geomagnetyczne.

Trasa biegnąca w kierunku południkowym ma zbliżone warunki naświetlenia słonecznego na całej długości. Trasy równoleżnikowe, zwłaszcza bardzo długie, przebiegają zarówno przez obszar dnia jak i nocy. Wpływ naświetlenia i pola geomagnetycznego jest korzystniejszy dla tras południkowych.

### 3.3. Fale hektometrowe

Fale hektometrowe (ang. MF) obejmują zakres częstotliwości 300 – 3000 kHz. Z punktu widzenia właściwości propagacyjnych można podzielić go na dwa podzakresy: poniżej i powyżej 1500 kHz. Podział ten pokrywa się z podziałem na fale średnie i pośrednie. W pierwszym z podzakresów leży amatorskie pasmo 600 m – 472 kHz, a w drugim pasmo 160 m – 1800 kHz. Zakres 525 – 1605 kHz jest przeznaczony dla radiofonii, ale stacje nadawczych ciągle w nim ubywa.

Fale średnie charakteryzują się odmiennymi warunkami rozchodzenia się fal w dzień i w nocy. W ciągu dnia w punkcie odbioru występuje tylko fala przyziemna, ponieważ fale wypromieniowane w przesłone ulegają praktycznie pełnemu tłumieniu w jonosferze. W porze nocnej fala przyziemna i jonosferyczna występują równocześnie, z czym wiąże się występowanie zaników (w tym szczególnego zjawiska zaniku selektywnego) i zniekształceń odbioru. Zanik selektywny polega na niejednakowym tłumieniu częstotliwości składających się na widmo sygnału. Niejednakowe tłumienie wynika stąd, że już niewielka różnica częstotliwości wytarcza często aby refrakcja przebiegała nieco inaczej i żeby wynikała z tego różnica dróg powodujących różne przesunięcia fazy składowych odbitych w stosunku do składowych fali przyziemnej, aż do różnic zbliżonych do 180 stopni. Różnice te mogą spowodować poważne zniekształcenia wypadkowego sygnału odbieranego, przykładowo dla sygnałów z modulacją amplitudy może wynikać z tego przemodulowanie fali nośnej. Do zaników selektywnych może dojść także w wyniku odbioru wielodrogowego (wielodrogowego), kiedy nakładają się na siebie fale odbite docierające trochę innymi drogami.

Tłumienie fali powierzchniowej wzrasta z częstotliwością i zależy w znacznym stopniu od przewodności właściwej ziemi; nad powierzchnią mórz zasięg jest znacznie większy. Nierówności, pofalowanie terenu i pagórki, a także poroście powierzchni roślinnością, lasami i zabudowaniami odgrywają coraz większą rolę w propagacji fali powierzchniowej. Fale średnie doznają szczególnie silnego tłumienia w dużych miastach i na terenach gęsto zabudowanych.

Jeszcze większe tłumienie fali przyziemnej występuje na falach pośrednich, ale fala jonosferyczna nie podlega tak silnej absorpcji jak na falach średnich. Łączność na większe odległości również i w porze dziennej, zwłaszcza na wyższych częstotliwościach zakresu. Fale pośrednie są więc podzakresem przejściowym od fal średnich, gdzie główną rolę odgrywa fala przyziemna, do fal krótkich, gdzie łączność odbywa się prawie wyłącznie na fali jonosferycznej. Podczas dnia naogół w warstwie E istnieją warunki zapewniające odbicie fali, natomiast w nocy część fal może przejść przez osłabioną warstwę E i odbić się dopiero od warstwy F2. Zasięgi fali odbitej w tym podzakresie są na ogół ograniczone do kilku tysięcy kilometrów.

W związku z oddziaływaniem jonosfery na falach średnich można wyróżnić trzy strefy odbioru: strefę o przewodzie fali przyziemnej i stabilnym natężeniu pola, strefę zaników selektywnych (interferencji fali przyziemnej i odbitej) oraz strefę, w której przeważa fala odbita. W wyniku fluktuacji jonosfery i wielodrogowości występują tu zaniki, ale są one słabsze niż w strefie przejściowej.

Podobnie jak na falach, na których podstawową rolę odgrywa fala przyziemna również i na falach średnich stosowana jest polaryzacja pionowa. W górnym zakresie fal pośrednich dla łączności na dalsze odległości używana jest polaryzacja pozioma.

Przy odbiorze silnych stacji radiofonicznych w porze nocnej daje się czasami zaobserwować występowanie przesłuchu modulacji innej stacji pracującej na zupełnie innej częstotliwości. Zjawisko to jest znane jako zjawisko luksemburskie względnie luksembursko-gorkowskie od stacji, przy odbiorze których zostało ono zaobserwowane po raz pierwszy. Jest ono spowodowane modulacją skrośną występującą w jonosferze pod wpływem sygnału silnej stacji nadawczej. Powoduje on wahania średniej szybkości ruchu elektronów w takt jego modulacji – czyli mocy chwilowej – a co za tym idzie zmianę chwilowej liczby zderzeń wolnych elektronów ze zjonizowanymi cząsteczkami gazu. Oznacza to zmianę warunków odbicia fali drugiej stacji. Zjawisko luksemburskie słabnie jeszcze przed wschodem słońca i praktycznie zanika w porze dziennej.

Tabela 3.3.1

Właściwości pasm amatorskich z zakresie fal długich i średnich

Pasma	Właściwości
<b>Pasma 135 kHz – 2100 m (135,7 – 137,8 kHz):</b>	Jest to najniższe pasmo amatorskie, przyznane na konferencji WRC w 2007 roku. W większości krajów moc promieniowana jest ograniczona do 1 W ERP lub EIRP. Z powodu niskiej sprawności anten moce nadajników są przybliżeniu około tysiąca razy większe. Wymagane są anteny o możliwie dużych wymiarach i dobre systemy uziemień lub przeciwwag. Dopuszczalne są jedynie emisje o szerokości zajmowanego pasma nie przekraczającej 200 Hz jak telegrafia, telegrafia wolna i wąskopasmowe emisje cyfrowe. Zasięgi stacji amatorskich przeważnie sięgają kilkuset kilometrów, ale możliwe bywają też łączności transatlantyckie. W dzień główną rolę odgrywają fala przyziemna i odbicie od warstwy D, a w nocy rośnie znaczenie fali jonosferycznej odbijanej od warstwy E.
<b>Pasma 472 kHz – 600 m (472 – 479 kHz):</b>	Pasma zostało przyznane krótkofalowcom na konferencji WRC w 2012 roku. W jego dolnej części stosowana jest telegrafia, a w górnej emisje cyfrowe. Propagacja jest zbliżona do występującej w paśmie 135 kHz ale anteny mają mniejsze wymiary. Problem ich sprawności pozostaje podobny.



## 4. Fale krótkie

Fale hektometrowe, dekametrowe i niekiedy dłuższe metrowe rozchodzą się na duże odległości dzięki refrakcji jonosferycznej. Załamywanie się fal w jonosferze może następować wielokrotnie, jak również fale powracające na ziemię mogą wielokrotnie odbijać się od jej powierzchni. Dzięki temu, zwłaszcza na falach dekametrowych uzyskiwane są bardzo duże zasięgi. Możliwe są liczne warianty sposobu propagacji przez refrakcję jonosferyczną, jak odbicia pojedyncze i wielokrotne od różnych warstw jonosferycznych, kilkakrotna refrakcja w jonosferze itd.

### 4.1. Fale dekametrowe

Zakres fal dekametrowych obejmuje częstotliwości od 3 do 30 MHz. W znacznej części zakresu fale te wykazują typowe cechy propagacji krótkofalowej, zależnej od pory doby, roku i aktywności słonecznej. W pobliżu granicy fal hektometrowych propagacja fal dekametrowych jest zbliżona do właściwości fal pośrednich. Natomiast w pobliżu granicy fal metrowych propagacja ma właściwości fal krótkich bądź ultrakrótkich.

Najistotniejszą cechą propagacji fal dekametrowych jest ich zdolność do rozchodzenia się na wielkie odległości za pośrednictwem jonosfery. Zasięg fali przyziemnej jest bardzo mały ze względu na silne tłumienie, i praktycznie poza nielicznymi wyjątkami jest ona nieprzydatna w łączności radiowej. Takim wyjątkiem jest przykładowo pasmo obywatelskie – CB. W radiofonicznym paśmie 11 m prowadzone są też próby lokalnych transmisji radiowych w cyfrowym systemie Digital Radio Mondiale – DRM.

Ujemną właściwością propagacji jonosferycznej fal dekametrowych jest niestabilność propagacyjna będąca skutkiem różnorodnych, wcześniej omówionych, wpływów geo- i heliofizycznych. Warunki propagacji fal dekametrowych zmieniają się nieustannie w sposób nie zawsze dający się przewidzieć z dostateczną dokładnością. Niestabilność propagacji fal dekametrowych oznacza, że w tym zakresie istnieje tylko większe lub mniejsze prawdopodobieństwo łączności na danej trasie, a nie pewność jak w przypadku fal długich lub średnich.

Zmienność warunków propagacyjnych w szerokich granicach wymaga odpowiedniego przystosowania się do nich, polegającego między innymi na doborze częstotliwości odpowiednich dla danych warunków.

Ze względu na dalekie zasięgi na falach krótkich zastosowano zasadę wyłączności podzakresów częstotliwości dla poszczególnych służb lub wspólnego ich użytkowania przez kilka służb. Podział został dokonany w taki sposób, że każda ze służb rozporządza pewną liczbą podzakresów częstotliwości rozrzuconych po całym zakresie. Pozwala to na elastyczne dostosowanie się do warunków propagacji. Część podzakresów służby amatorskiej pozostaje względem siebie w stosunku harmonicznym, dzięki czemu zakłócenia wynikające z niepożądanego promieniowania na częstotliwościach harmonicznym nie stanowią przeszkód w pracy innych służb. Zależność ta dotyczy klasycznych pasm krótkofalowych 160, 80, 40, 20, 15 i 10 m. W 1979 roku krótkofalowcy otrzymali przydział tzw. pasm WARC 30, 17 i 12 m, które nie spełniają tego warunku ani w stosunku do siebie ani w stosunku do pozostałych pasm krótkofalowych. Związek ten jest słuszny również dla części pasm ultrakrótkofalowych. Harmoniczny układ pasm amatorskich ułatwia również korzystanie z tych samych anten na więcej niż jednym paśmie. Silne tłumienie fal powierzchniowych i stosunkowo wysoki poziom szumów atmosferycznych, oraz ciągle wzrastający poziom zakłóceń technicznych dawniej zwanych zakłóceniami przemysłowymi (ang. *man-made noise*) powodują, że fale przyziemne tego zakresu znajdują małe zastosowanie i mają drugorzędne znaczenie. Na ogół użyteczne zasięgi fali przyziemnej na lądzie nie przekraczają kilkunastu kilometrów.

Maksymalne występujące gęstości elektronowe warstw F2 i E zapewniają warunki dla odbicia fal w mniejszej lub większej części zakresu fal dekametrowych – zależnie od aktualnego stanu jonosfery. Absorbencja decydująca o poziomie fali odbitej nie jest tak silna jak na falach średnich, z wyjątkiem jedynie pionowego wyprzemiowania fali o częstotliwości krytycznej.

Fale dekametrowe o mniejszych częstotliwościach na wszystkich trasach oraz fale o średnich częstotliwościach na trasach dłuższych odbijają się w porze dziennej od warstwy E.

Fale o średnich częstotliwościach na trasach krótszych oraz fale o większych częstotliwościach na wszystkich trasach odbijają się w porze dziennej od warstwy F2.



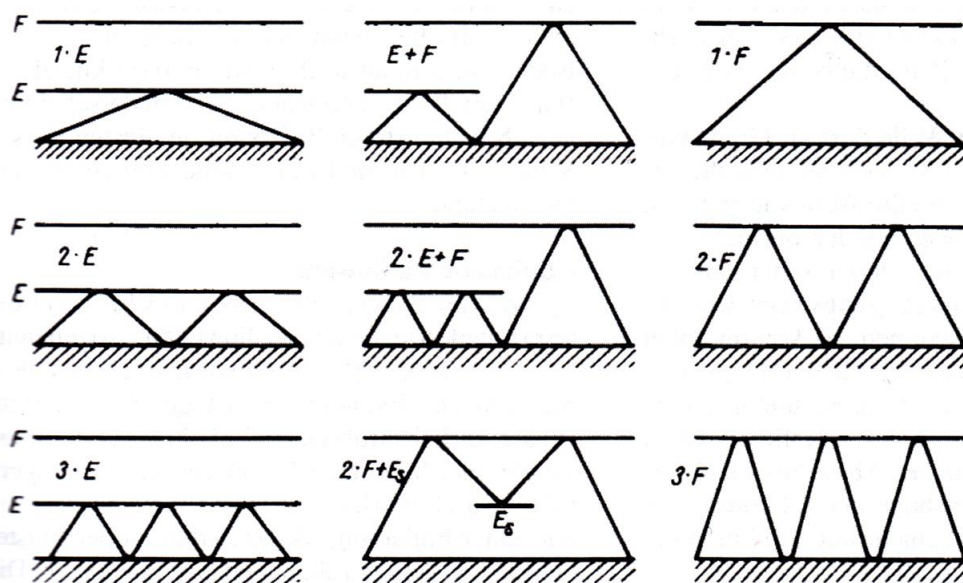
Z wyjątkiem nielicznych przypadków propagacji najdłuższych fal na długich trasach fale o małych i średnich częstotliwościach odbijają się w porze nocnej od warstwy F2, o ile takie odbicie jest możliwe.

Fale o większych częstotliwościach zakresu fal dekametrowych nie mogą w porze nocnej rozchodzić się poprzez jonosferę, zaś fale o średnich częstotliwościach mogą rozchodzić się tylko na długich trasach.

W okresach małej aktywności słonecznej przy obniżonej gęstości elektronowej warstwy F możliwości propagacyjne dla większych i średnich częstotliwości zakresu ulegają ograniczeniu.

Fale dekametrowe doznają dość znacznej absorpcji niedewiacyjnej w warstwach D i E. Ponieważ warstwa D w nocy zanika, a gęstość elektronowa warstwy E maleje absorpcja fal dekametrowych w porze nocnej jest stosunkowo mała i tylko w niewielkim stopniu zależna od częstotliwości. Dobór częstotliwości pracy w nocy nie jest więc tak krytyczny jak w dzień. W dzień częstotliwości pracy należy dobierać tak, aby z jednej strony zapewnić jak najlepsze warunki odbicia, a z drugiej jak najmniejszą absorpcję. W nocy istotny jest natomiast tylko pierwszy warunek. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że trasy dalekosiężne, o ile nie przebiegają one w kierunku południkowym zazwyczaj w części trasy przebiegają przez obszary nocne, a w części przez dzienne.

W zakresie dekametrowym występują liczne warianty propagacji jonosferycznej w zależności od długości trasy i stanu jonosfery. Pojedyncze odbicie może nastąpić od warstwy E, F1 lub F2 albo od jednej z warstw sporadycznych, najczęściej od warstwy Es. Oprócz tego może wystąpić propagacja wieloskokowa polegająca na kolejnych odbiciach od jonosfery i od ziemi. W propagacji wieloskokowej mogą uczestniczyć też różne warstwy jonosferyczne.



Rys. 4.1.1. Odbicia wielokrotne od tej samej lub różnych warstw dają wyraźnie zwiększenie zasięgów, ale niektóre konstelacje warstw zdarzają się stosunkowo rzadko i są krótkotrwałe

Biorąc pod uwagę fakt występowania w jonosferze lokalnych niejednorodności, jej pofalowania, obszarów lokalnie nachylonych, układów soczewkujących itd. w zakresie fal dekametrowych istnieją jeszcze inne od przedstawionych sposoby propagacji jonosferycznej. Przykładowo zauważono na niektórych trasach większy wpływ warunków panujących w odległościach 2000 km od końców trasy, aniżeli warunków panujących w środkowej jej części.

Propagacja wieloskokowa jest połączona ze znacznymi stratami energii przy odbiciach od ziemi i przy wielokrotnych przejściach przez niższe położone warstwy.

Tabela 4.1.1

Właściwości krótkofalowych pasm amatorskich

Pasmo	Właściwości
<b>Pasmo 160 m (1810 – 2000 kHz):</b>	silna zależność od właściwości gruntu, w lecie wysoki poziom zakłóceń atmosferycznych, w dzień silna absorbcja przez warstwę D – możliwe tylko łączności na fali przyziemnej, najlepsze możliwości łączności w zimowe noce, dobre w noce jesienne i wiosenne, zwłaszcza krótko przed wschodem Słońca i w okresie minimum plam słonecznych (minimum aktywności Słońca), zasięgi na fali przestrzennej do kilku tysięcy km, strefa martwa przeważnie nie występuje. W zimie obniża się także poziom zakłóceń atmosferycznych. W niektórych przypadkach i dla niektórych tras otwarcia są bardzo krótkie, nawet tylko rzędu minut
<b>Pasmo 80 m (3500 – 3800 kHz):</b>	potocznie nazywane pasmem krajowym, silne tłumienie w dzień przez warstwę D, szczególnie w lecie, maksimum tłumienia orientacyjnie między godz. 9 i 16, w zimie tłumienie niższe i maksimum ograniczone do godz. 11 – 15, zasięgi na fali przyziemnej do 100 km, w zimie większe, po zmierzchu zasięgi do 1000 km rosnące w ciągu nocy, najniższa absorbcja przed świtem, wówczas możliwe zasięgi światowe, w nocy strefa martwa ok. 500 km lub więcej. Obserwuje się poprawę propagacji dla fali rozchodzącej się w strefie półmroku. Warunki propagacji na długich dystansach są lepsze w okresie minimum aktywności słonecznej
<b>Pasmo 60 m (5351,5 – 5366,5 kHz)</b>	Pasmo pozwala na prowadzenie łączności krajowych lub z bliskimi obszarami krajów sąsiednich przy użyciu fali promieniowanej prawie pionowo. Jest to zwłaszcza przydatne gdy częstotliwość krytyczna leży poniżej 7 MHz, ale tłumienie warstwy D nie pozwala na korzystanie z pasma 3,5 MHz
<b>Pasmo 40 m (7000 – 7200 kHz):</b>	potocznie nazywane pasmem europejskim, sytuacja podobna jak dla pasma 80 m ale dalsze zasięgi, w dzień prawie zawsze zasięgi do 1500 km i strefa martwa ok. 100 km, rankami w zimie zasięgi zamorskie w kierunku zachodnim a wieczorami zamorskie w kierunku wschodnim, łączności dalekie funkcjonują lepiej w okresie minimum aktywności słonecznej, strefa martwa najszersza około północy w zimie eliminuje znaczną część stacji europejskich ułatwiając łączności DX-owe. Obserwuje się wyraźną poprawę propagacji dla fali rozchodzącej się w strefie półmroku.
<b>Pasmo 30 m (10,1 – 10,15 MHz):</b>	pasmo dzienne i nocne, dobre warunki DX-owe o wszystkich porach dnia i roku, dobowy zmienność warunków mniejsza niż w paśmie 40 m, dzięki niższemu tłumieniu przez warstwę D atrakcyjne możliwości DX-owe także z rejonami trudnymi do osiągnięcia, zawody niedozwolone, dozwolone wyłącznie telegrafia i emisje cyfrowe, pasmo popularne wśród miłośników łączności cyfrowych, praca fonią dozwolona tylko w wyjątkowych sytuacjach. W okresach maksimum aktywności słonecznej strefa martwa jest bardzo krótka lub nie występuje w ogóle. Obserwowana jest poprawa warunków propagacji w strefie półcienia, korzystne są też trasy leżące całkowicie w ciemności
<b>Pasmo 20 m (14,0 – 14,35 MHz):</b>	główne pasmo DX-owe zwane królową pasm, tłumienie warstwy D jest pomijalne, w okresie maksimum plam słonecznych stale możliwe łączności światowe, strefa martwa w dzień ok. 400 km, w nocy do 4000 km, z tego powodu mniej przydatne do łączności wewnątrz europejskich, w okresie minimum aktywności słonecznej łączności DX-owe tylko w dzień, strefa martwa ok. 1000 km, warunki korzystne gdy część trasy leży w strefie nocnej, najlepsze warunki w porze równonocy jesiennej i wiosennej, niski poziom zakłóceń atmosferycznych
<b>Pasmo 17 m (18,068 – 18,168 MHz):</b>	warunki zbliżone do pasma 20 m, częściowo także do warunków panujących w paśmie 15 m ale dłużej otwarte, propagacja stabilniejsza (mniej kapryśna) niż w paśmie 15 m, zawody niedozwolone, pasmo DX-owe, zakłócenia atmosferyczne bardzo rzadkie

<b>Pasmo 15 m (21,0 – 21,45 MHz):</b>	silna zależność od cykli aktywności słonecznej, w maksimum otwarte przez znaczną część doby z wyłączeniem kilku godzin nocnych, duże zasięgi przy małych mocach, w okresie minimum bezużyteczne przez całą zimę i w lecie nocami, praktycznie brak zakłóceń atmosferycznych, czasami możliwe odbicia od warstwy sporadycznej Es dające zasięgi ok. 2000 km. Dobrym wskaźnikiem stanu pasma może być odbiór stacji radiofonicznych w sąsiadującym paśmie 13 m
<b>Pasmo 12 m (24,89 – 24,99 MHz):</b>	dzienne pasmo DX-owe, właściwości zbliżone do pasma 10 m, ale trochę dłużej otwarte, silna zależność od aktywności słonecznej, w pobliżu minimum niemożliwe łączności DX-owe, zawody niedozwolone
<b>Pasmo 10 m (28,0 – 29,7 MHz):</b>	bardzo silna zależność od cyklu aktywności słonecznej, w maksimum w dzień możliwe stabilne połączenia międzykontynentalne z małymi mocami (rano w kierunku Pacyfiku, wieczorami w kierunku zachodnim), strefa martwa dochodzi do 4000 km, możliwe łączności także na długich trasach (okrążających ziemię i docierających do korespondenta z przeciwnej strony) rano z kierunku Ameryki Łacińskiej, a wieczorem z kierunku Pacyfiku, w okresie minimum plam słonecznych czynne w dzień tylko przez parę godzin, możliwe są też zawsze dobrze funkcjonujące połączenia lokalne jak łatwo przekonać się obserwując sytuację w sąsiadującym z nim paśmie CB 11 m, do pewnego pobudzenia aktywności przyczyniają się instalowane tu i ówdzie przemienniki FM, czasami możliwe także łączności przez odbicia od warstwy sporadycznej Es. O warunkach propagacji panujących w pasmach 20 – 10 można przekonać się obserwując zsynchronizowaną światową sieć radiolatarni krótkofalarskich pracujących w tych zakresach

Tabela 4.1.2

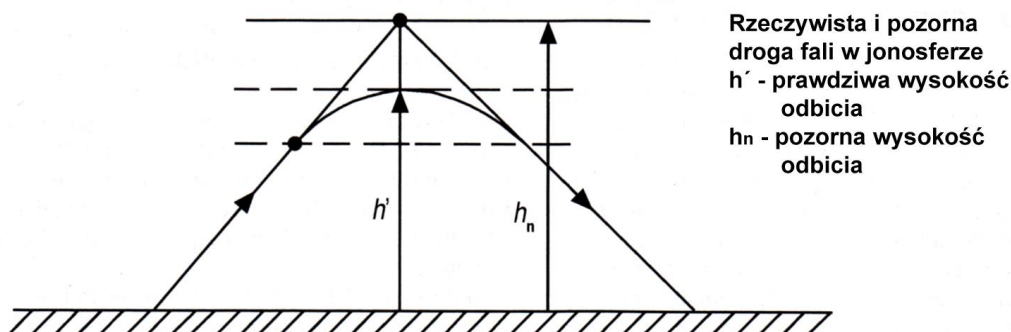
Przydatność pasm amatorskich w zależności od warunków propagacji (N = noc, D = dzień; źródło: „*Funkwellen erfolgreich nutzen*”)

Pasmo [m]	Aktywność słoneczna	Łączności europejskie			Łączności światowe		
		Wiosna i jesień	Lato	Zima	Wiosna i jesień	Lato	Zima
160	maks.	N	N	N			
	min.	N	N	N			
80	maks.	N	N	N			
	min.	N	N	N	N		N
40	maks.	D	D+N	D	N	N	N
	min.	D	D+N	D	D+N	D+N	D+N
30	maks.	D+N	D+N	D+N	D+N	D+N	D+N
	min.	D+N	D+N	D+N	D+N	D+N	D+N
20	maks.	D	D	D	D+N	D+N	D+N
	min.	D	D	D	D	D	D
17	maks.	D	D	D	D+N	D+N	D+N
	min.	D	D	D	D	D	D
15	maks.	D	D	D	D	D+N	D
	min.		D			D	
12	maks.	D	D		D		D
	min.						
10	maks.	D	D		D		D
	min.						

## 4.2. Rozszczenie fali na promień zwyczajny i nadzwyczajny

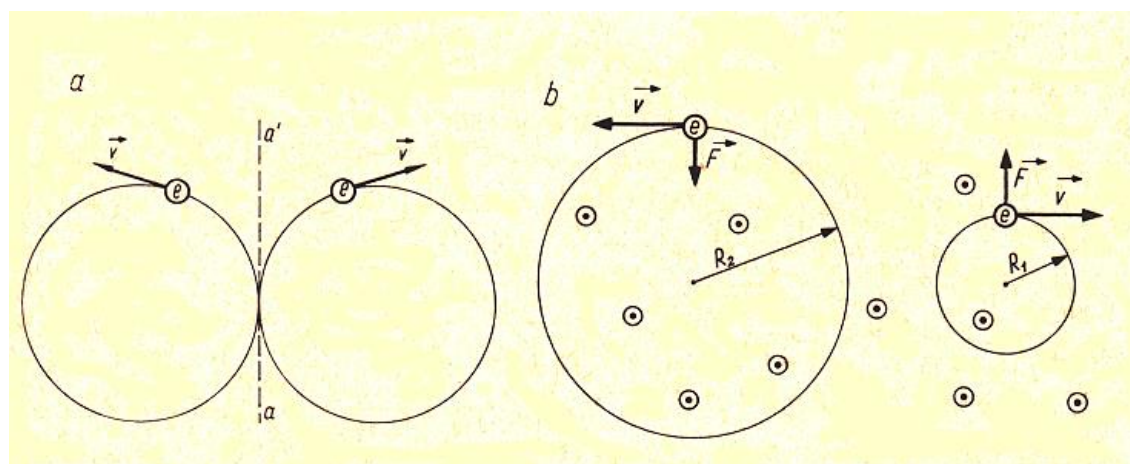
Warstwy jonosferyczne mają zdolność załamania i odbijania fal radiowych. Własności te są zależne od warunków panujących w danej warstwie oraz od długości fali. Fizyczną przyczyną załamania fal w jonosferze jest zmiana gęstości jonizacji z wysokością. Fale radiowe ulegają również tłumieniu w jonosferze.

Fala wnikająca do warstwy ulega ciągłemu (płynnemu) załamaniu, a przy dostatecznej grubości warstwy przebiega w szczytowej części trasy równoległe do powierzchni ziemi, po czym wraca w jej kierunku. Trójkąt zakreślony przez promienie fali padającej i odbitej ma więc wierzchołek spłaszczony i zaokrąglony. Przedłużając w myśli oba promienie aż do ich styku otrzymuje się pozorną wysokość odbicia. Pozorną wysokość odbicia można obliczyć również na podstawie czasu propagacji fali między nadajnikiem i odbiornikiem. Częstotliwość graniczna każdej z warstw jest zależna od stopnia jej jonizacji i od kąta padania fali. W przypadku szczególnym dla kąta prostokątnego nosi ona nazwę częstotliwości krytycznej. Częstotliwości graniczne dla fali promieniowanej w kierunku poziomym są 3 – 4 razy wyższe od częstotliwości krytycznej dla danej warstwy.



Rys. 4.2.1. Tor fali odbijanej w jonosferze

Przedstawiony skrótkowo model propagacji fal elektromagnetycznych w jonosferze dominuje w literaturze krótkofalarskiej i jest z dużym przybliżeniem wystarczająco dobry. Nie uwzględnia on jednak wpływu ziemskiego pola magnetycznego. Powoduje ono rozszczenie promienia biegnącego w jonosferze na dwa: promień zwyczajny i promień nadzwyczajny. Bez jego wpływu jonosfera byłaby ośrodkiem izotropowym. Izotropowość materiału oznacza brak różnic w jego właściwościach fizycznych niezależnie od kierunku, w jakim są mierzone.



Rys. 4.2.2. a – rozkład ruchu harmonicznego liniowego (wzdłuż kierunku  $aa'$ ) na dwa ruchy kołowe o przeciwnych kierunkach obiegów po kole; b – tory elektronów pobudzonych do drgań przez składowe kołowe w obecności pola magnetycznego (pole prostopadłe do płaszczyzny rysunku)

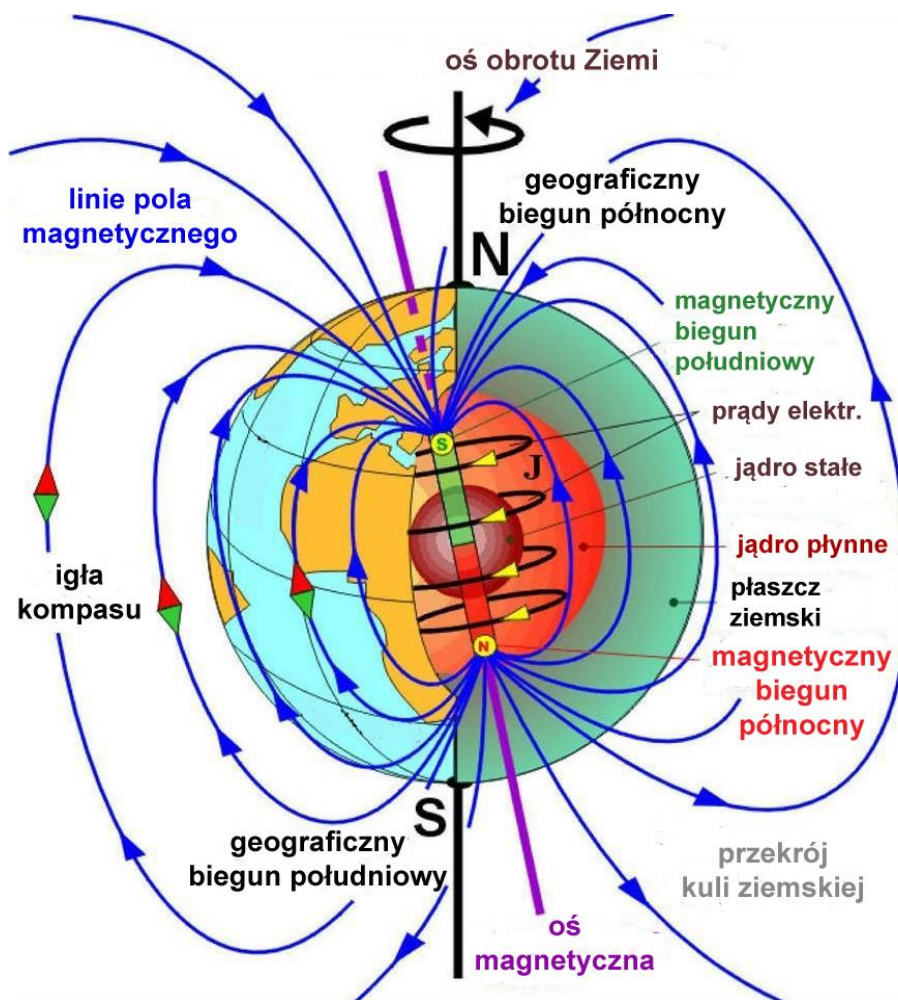
Przy rozchodzeniu się fali w zjonizowanym gazie wolne elektrony gazu są pobudzane do drgań synchronicznych z częstotliwością fali. Gdyby nie było pola ziemskiego tor tych elektronów byłyby liniami prostymi o kierunku wektora pola elektrycznego fali. Ziemskie pole magnetyczne powoduje jednak odchylenie torów elektronów od linii prostej, tak że przyjmuje on ostatecznie kształt spiralny wokół linii sił pola magnetycznego. Oddziaływanie pola geomagnetycznego powoduje, że jonosfera jest ośrodkiem anizotropowym, co oznacza, że jego właściwości, w tym także prędkość rozchodzenia się fali zależą od kierunku. W ośrodkach izotropowych są one od niego niezależne.

Rozchodzącą się w jonosferze falę o polaryzacji liniowej można uważać za złożoną z dwóch składowych o polaryzacji kołowej i o przeciwnym kierunku obrotu chwilowej płaszczyzny polaryzacji. Również wymuszone przez pole elektryczne fali prostolinijne drgania harmoniczne elektronów można uważać za wypadkową dwóch ruchów kołowych, po kołach o równej średnicy i z jednostajną prędkością liniową. Oddziaływanie pola geomagnetycznego powoduje zwiększenie promienia jednego z tych ruchów kołowych i zmniejszenie drugiego.

Na rysunku 4.2.2 widoczne są kierunki sił pola magnetycznego skierowanego prostopadle do kierunku ruchu elektronów (na rys. 4.2.2 b są one zaznaczone kółkami z kropkami czyli wychodzą z płaszczyzny rysunku do patrzącego). W przykładzie tym dla ruchu lewoskrętnego siła oddziaływania pola magnetycznego jest skierowana promieniowo w kierunku dośrodkowym, a dla ruchu prawoskrętnego – w kierunku odśrodkowym. W razie odwrócenia kierunku pola magnetycznego również i kierunki sił byłyby odwrotne. W przedstawionym przypadku dla ruchu prawoskrętnego siła dośrodkowa ruchu kołowego ulega zmniejszeniu wskutek oddziaływania pola, czyli równowaga ustala się dla obiegu elektronu po kole o mniejszym promieniu ( $R_1$  na rys. 4.2.2 b), a dla ruchu lewoskrętnego siła dośrodkowa ulega zwiększeniu, a więc stan równowagi istnieje gdy elektron porusza się po torze o większym promieniu ( $R_2$  na rysunku).

Ponieważ ruch kołowy lewoskrętny elektronów wywołany przez lewoskrętną składową pola elektrycznego fali, więc zwiększenie promienia, po którym krążą elektrony prowadzi do zwiększonego oddziaływania drgań elektronów na tę składową. Odwrotnie w przykładzie z rysunku 4.2.2 dla składowej prawoskrętnej oddziaływanie pola jest zmniejszone. Oznacza to, że własności jonosfery są odmienne dla składowych lewoskrętnej i prawoskrętnej. Wartość zastępcza stałej dielektrycznej dla składowej, dla której promień ruchu elektronów ulega zmniejszeniu jest mniejsza niż dla drugiej z nich (mówimy więc o dwójłomności jonosfery; ang. *birefringence*). Oznacza to, że obie składowe rozchodzą się z różnymi prędkościami, są załamywane pod różnymi kątami i mają odmienne częstotliwości krytyczne. Promień, dla którego średnica kół, po których krążą elektrony ulega zmniejszeniu nosi nazwę promienia zwyczajnego (ang. *o-wave*, niem. *ordentlicher Strahl*), a drugi – promienia nadzwyczajnego (ang. *x-wave*, niem. *ausserordentlicher Strahl*). Prędkość grupowa promienia zwyczajnego jest większa od prędkości grupowej promienia nadzwyczajnego. Promień nadzwyczajny podlega w jonosferze zwiększonemu tłumieniu. W naszych szerokościach geograficznych można przyjąć, że linie pola geomagnetycznego są w przybliżeniu prostopadłe do powierzchni ziemi (rys. 4.2.3) dzięki stosunkowej bliskości bieguna magnetycznego i są skierowane do wnętrza ziemi. Wobec tego dla promienia wysłanego prostopadle do powierzchni Ziemi promień zwyczajny jest spolaryzowany lewoskrętnie, a nadzwyczajny prawoskrętnie. Na półkuli południowej jest odwrotnie, co wynika z przeciwnego kierunku linii sił pola geomagnetycznego w stosunku do powierzchni Ziemi.





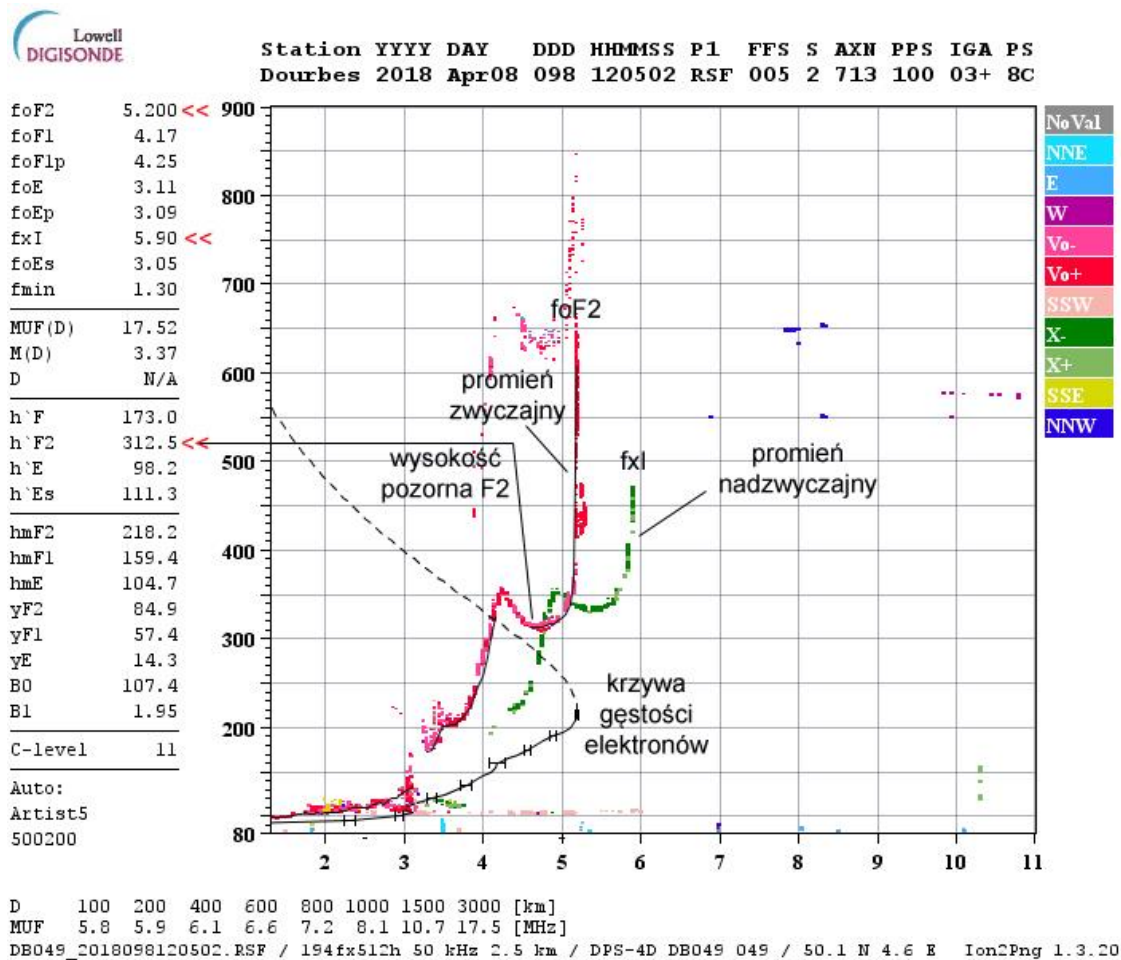
Rys. 4.2.3. Ziemskie pole magnetyczne

Promień zwyczajny odbija się od jonosfery na większej wysokości aniżeli promień nadzwyczajny, gdyż zastępcza stała dielektryczna jest mniejsza dla promienia zwyczajnego. Istnieje więc pewien zakres częstotliwości, dla których jonosfera odbija jeszcze promień nadzwyczajny, a promień zwyczajny już przez nią przenika (rys. 4.2.4 i 4.2.5). Inaczej mówiąc wartość MUF jest wyższa dla promienia nadzwyczajnego.

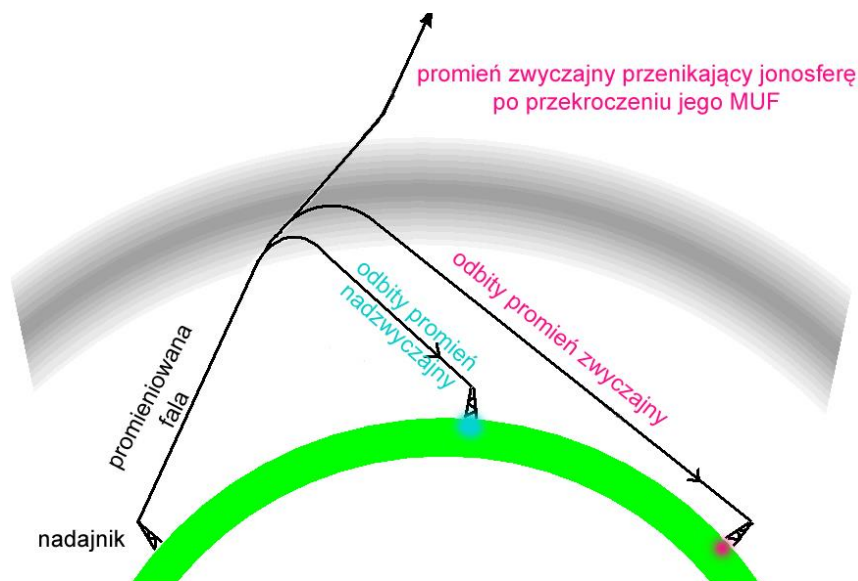
Gdy odbiciu od jonosfery podlegają oba promienie, fala powracająca ku powierzchni Ziemi jest spolaryzowana eliptycznie ponieważ stopnie tłumienia, a co za tym idzie amplitudy obu promieni są różne. Dla fali nadawanej pionowo na półkuli północnej fala odbita jest spolaryzowana lewoskrętnie, a na półkuli południowej – prawoskrętnie.

Przy interferencji promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego w miejscu odbioru mogą powstawać zaniki polaryzacyjne. Jest to efekt występujący dodatkowo do zaników interferencyjnych spowodowanych odbiorem wielodrożnym i zaników absorbcyjnych spowodowanych wahaniami tłumienia fali w jonosferze.

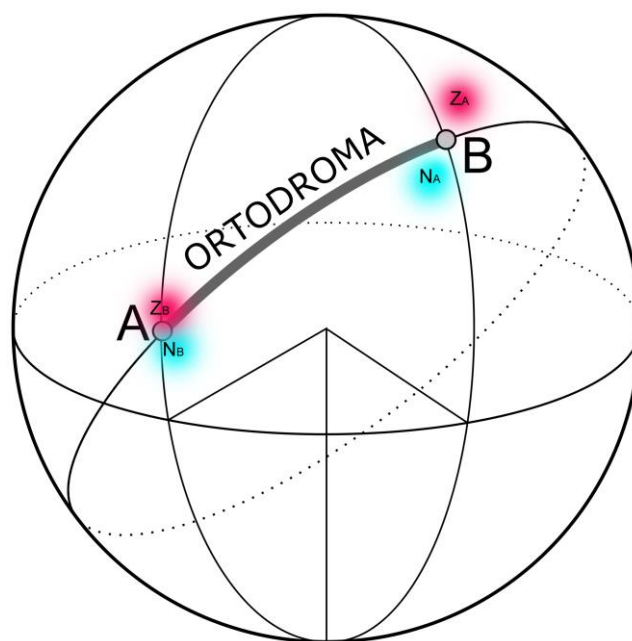
Konsekwencjami rozszczepienia fali na oba promienie są utrata odwracalności trasy jonosferycznej, odchyłka trasy propagacji fali od wielkiego koła (ortodromy) w szczególności w rejonach bliskich biegunowi magnetycznemu, różnice tras rozchodzenia obu promieni co daje w efekcie różne (pokrywające się w mniejszym lub większym stopniu) obszary odbioru fali i zmianę polaryzacji odbieranej fali z liniowej na eliptyczną. Na półkuli północnej trasa promienia zwyczajnego odchyła się od ortodromy w kierunku bieguna magnetycznego, a promienia nadzwyczajnego – w kierunku równika magnetycznego Ziemi (rys. 4.2.6). Różnice tras obu promieni są szczególnie wyraźne w rejonach podbiegunowych, ale w rzeczywistości występują wszędzie, tylko w coraz słabszym stopniu w miarę oddalania się od biegunów. Są one zerowe tylko dla fal rozchodzących się wzdłuż równika magnetycznego.



Rys. 4.2.4. Jonogram. W zakresie 5,2 – 5,9 MHz odbijany jest tylko promień nadzwyczajny. Częstotliwość krytyczna dla promienia zwyczajnego jest podawana w linii foF2, a dla promienia nadzwyczajnego – w linii fxI. W liniach foF1, foE, foEs podane są częstotliwości krytyczne promienia zwyczajnego dla pozostałych warstw, a w liniach rozpoczynających się od h' – ich wysokości pozorne



Rys. 4.2.5. Różnica zasięgów promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego. Po przekroczeniu wartości MUF dla promienia zwyczajnego przenika on przez jonosferę podczas gdy promień nadzwyczajny może być jeszcze odbijany

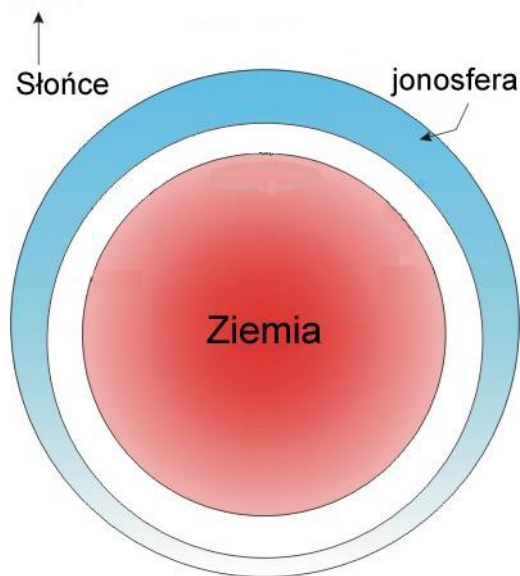


Rys. 4.2.6. Zasada występowania odbioru jednokierunkowego. Kolorem zielonym zaznaczone są, bez zachowania skali, obszary odbioru promienia zwyczajnego, a czerwonym – nadzwyczajnego, odpowiednio pochodzących od stacji A i B. Odchyłki tras propagacji od ortodromy są większe w rejonie stacji B i dodatkowo różnica wysokości odbicia powoduje rozsuniecie się tych obszarów. Jeżeli w rejonie stacji A zjawisko to jest słabsze to stacja A odbiera stację B, ale nie odwrotnie

Różnice tras przebywanych przez każdy z promieni powodują, że rejony ich odbioru mogą się pokrywać ze sobą tylko częściowo lub nie pokrywać wogóle. Podobnie ma się sprawa z promieniami fali nadawanej przez odległą stację. Jak sobie łatwo wyobrazić sytuacja kiedy jedna ze stacji znajduje się w obszarze odbioru któregoś z promieni fali stacji drugiej, ale do tej drugiej nie dociera żaden z promieni, na które jest rozszczepiona fala stacji pierwszej – czyli, że oba promienie omijają ją w jakimś stopniu – jest zjawiskiem powszechnym, a nie wyjątkowym. Różnice tras propagacji obydwu promieni oznaczają również, że ustawianie anteny kierunkowej na najlepszy odbiór odległej stacji w oczekiwaniu, że i u niej poprawi się siła odbioru naszej stacji może w niektórych warunkach dać skutki odwrotne od spodziewanych. Najlepsze efekty możnaby uzyskać wówczas stosując niezależnie ustawiane anteny odbiorczą i nadawczą, ale jest to w przeważającej części przypadków niemożliwe ze względów praktycznych. Korzystne mogłoby być również zastosowanie anten o polaryzacji kołowej i przelączanym kierunku polaryzacji (lewo- i prawostronnej) przynajmniej jako anteny odbiorcze. Pozwoliłoby to na świadome skorzystanie z fali dającej lepszy odbiór w konkretnej sytuacji, jak również na prowadzenie obserwacji i porównań propagacji obu promieni. Przy doborze pasującej polaryzacji kołowej możliwy zysk w stosunku do liniowej wynosi 3 dB. W praktyce, ze względu na wymiary anten jest to jednak możliwe tylko dla niewielkiej części operatorów i tylko w wyższych pasmach. Zdecydowana większość, jeżeli nie nawet wszyscy operatorzy stacji korzystają na falach krótkich z anten o polaryzacji liniowej, co przy odbiorze fali spolaryzowanej w sumie w sposób przypadkowy daje zawsze pewne straty polaryzacyjne, a nie dając możliwości odróżnienia odbioru promienia zwyczajnego od nadzwyczajnego w jakiś sposób maskuje całą związaną z tym problematykę i utrudnia przyjęcie do wiadomości również faktu występowania propagacji jednokierunkowej. Oczywiście anteny takie (i klasyczne podejście twierdzące, że polaryzacja fali jest w tym zakresie nieistotna) są w pełni wystarczające i autor nie namawia nikogo do ich zmiany na spolaryzowane kołowo, o ile nie wiąże się to ze szczególnym zainteresowaniem omawianymi zjawiskami i związanymi z nimi eksperymentami. Rzucane niejednokrotnie oskarżenia stacji XX o świadome zakłócanie łączności stacji YY opierają się najczęściej na niezrozumieniu istoty tego zjawiska propagacji jednokierunkowej. Jeżeli stacje YY odbierają wprawdzie stacje XX, ale nie odwrotnie, nie można w żadnym wypadku mówić o świadomym zakłócaniu, a jedynie o zjawisku fizycznym, którego nie można oceniać w kategoriach winy. Pozostałe



przyczyny jednostronnej słyszalności takie jak różnice mocy stacji, zysków antenowych, kierunków promieniowania anten są natury prozaicznej i nie będziemy ich tutaj omawiać.



Rys. 4.2.7. Jonosfera nie jest kulą

Różnice w propagacji obydwu promieni są minimalne w pobliżu górnej granicy fal krótkich, a znacznie bardziej zauważalne w dolnych pasmach, gdzie też częściej występuje propagacja jednokierunkowa.

W większości prognoz propagacyjnych uwzględniany jest tylko promień zwyczajny.

Jedyną sytuacją, w której można na pewno oczekiwać odbioru obu promieni w tym samym rejonie jest odbiór fali promieniowanej prawie pionowo do jonosfery (ang. NVIS). Różnica wysokości ich odbicia powoduje występowanie echa, które jednak może być zauważalne lub też nie.

Fale o polaryzacji kołowej, niezależnie od tego czy będzie się ona pokrywała z polaryzacją promienia zwyczajnego czy nadzwyczajnego nie ulegają dalszemu rozszczepieniu w jonosferze i docierają do odbiornika również jako spolaryzowane kołowo.

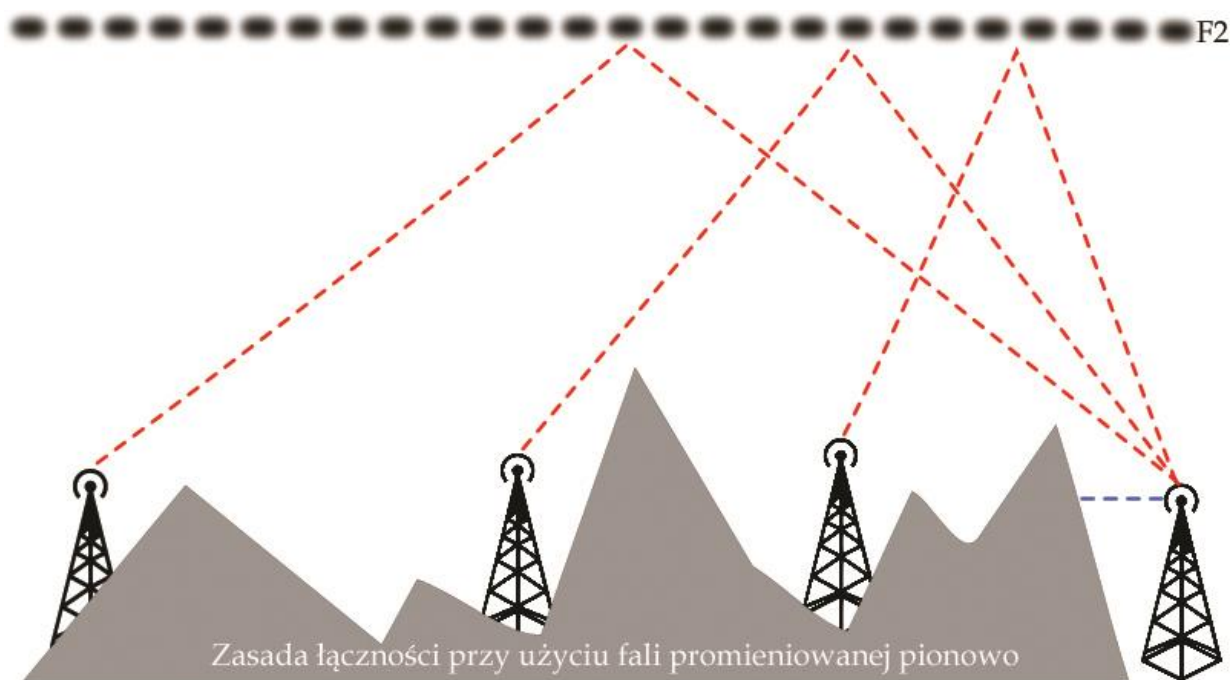
### 4.3. Fala promieniowana prawie pionowo

W niektórych sytuacjach potrzebne jest zapewnienie niezawodnych połączeń na stosunkowo ograniczonym obszarze np. o promieniach od stu do kilkuset kilometrów. W zależności od ukształtowania terenu i lokalnych przeszkód użycie do tego celu łączności ultrakrótkofalowej może okazać się nieefektywne lub wiązać się z koniecznością instalacji nieproporcjonalnie dużej – w stosunku do potrzeb – liczby przemienników. W takich sytuacjach wojsko i inne instytucje korzystają od dawna z łączności krótkofalowej opartej na fali promieniowanej pionowo (a dokładniej rzecz biorąc w przybliżeniu pionowo – pod kątem 70-90° w stronę jonosfery. Pod warunkiem, że częstotliwość fali nie przekracza wartości MUF zostanie ona odbita od jonosfery (warstwy F2) w kierunku ziemi i może być odbierana na całym pożądanym obszarze łącznie z kotlinami zasłoniętymi przez góry od stacji nadawczej. Zasadę tą (znaną też pod angielskim skrótem NVIS – *Near Vertical Incidence Skywave*) stosują także niektóre stacje radiofoniczne – zwłaszcza pracujące w zakresach tropikalnych, a od pewnego czasu także krótkofalowcy w łącznościach kryzysowych. Zastosowania krótkofalarskie nie muszą się ograniczać wyłącznie do łączności kryzysowych lub odpowiednich ćwiczeń – w ten sposób można przykładowo zapewnić dobrą słyszalność komunikatów krótkofalarskich na całym obszarze kraju.

Dzięki temu, że fala odbita jest odbieralna w bezpośrednim sąsiedztwie stacji nadawczej, i że unika się w miarę możliwości promieniowania fali przyziemnej w systemie tym nie występuje strefa martwa, a niebezpieczeństwo zaników spowodowanych interferencją fal przyziemnej i odbitej zmniejsza się w znacznym stopniu. Dodatkową korzyścią jest także obniżenie poziomu odbieranych zakłóceń lokalnych. Dzięki krótszej trasie rozchodzenia się fali jej tłumienie jest znacząco niższe aniżeli dla fal promieniowanych pod możliwie niskimi kątami w stosunku do powierzchni ziemi. Siła sygnału w całym obszarze odbioru jest w przybliżeniu jednakowa.

Prognozy wartości MUF dla fali promieniowanej pionowo (częstotliwości krytycznej) są wprawdzie dostępne w Internecie, ale nawet bez korzystania z nich można przyjąć następujące orientacyjne zasady wyboru częstotliwości pracy: 2-4 MHz w porze nocnej i 4-8 MHz w porze dziennej.

Pewną wadą tego rozwiązania jest konieczność korzystania w ciągu doby z dwóch lub trzech pasm amatorskich: 160, 80 i 40 m. Tam gdzie dozwolona jest praca w paśmie 60 m może ono stanowić cenne uzupełnienie wymienionych pasm. W okresach wysokiej aktywności Słońca (wysokiej częstotliwości MUF) możliwe staje się też czasami korzystanie z pasma 30 m.



Rys. 4.3.1.

W przypadku gdy znana jest (z prognoz propagacji) dokładna wartość MUF jako optymalną częstotliwość pracy (FOT) przyjmuje się częstotliwość o 20–25% niższą od niej (dla porównania w łącznościach DX-owych przyjmuje się zwykle odstęp 15%).

W warunkach amatorskich jest to oczywiście pasmo najbliższe wartości ustalonej w powyższy sposób. Najniższa częstotliwość użyteczna (LUF) zależy, jak w każdym innym przypadku, od tłumienia warstwy D, przy czym droga przebywana w niej przez falę rozchodzącą się pionowo jest krótsza aniżeli dla fali ukośnej, a więc i to tłumienie jest trochę słabsze – co oznacza w praktyce pewne obniżenie wartości LUF.

Najczęściej stosowanymi rodzajami anten są zwykle poziome dipole półfalowe albo skrócone lub anteny o ukośnie umieszczonych ramionach np. typu odwrócone V (ang. inverted V). Kąt pomiędzy skośnie umieszczonymi ramionami powinien być większy od 120 stopni, w przeciwnym razie zysk w kierunku pionowym maleje i w charakterystyce promieniowania pojawiają się listki boczne.

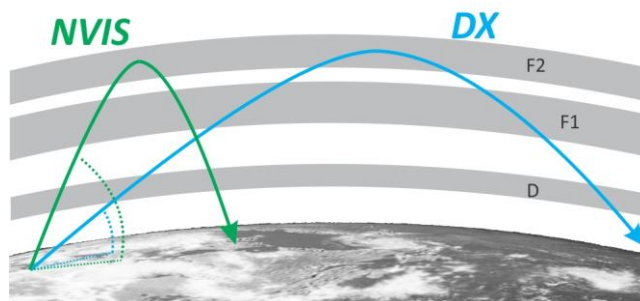
Dla uzyskania charakterystyki promieniowania należy antenę (w przeciwieństwie do DX-owej) umieścić na niewielkiej wysokości nad ziemią: 0,1 – 0,25 długości fali. W literaturze często podawana jest orientacyjna wysokość 0,15  $\lambda$ . Prowadzone były także z dobrymi wynikami eksperymenty z antenami zawieszonymi na wysokościach 1/20  $\lambda$  nad ziemią – ich zaletą było dodatkowe obniżenie poziomu odbieranych zakłóceń lokalnych.

Charakterystyka kierunkowa dipoli umieszczonych na tak niewielkich wysokościach zbliża się praktycznie do dookólnej dlatego też kierunek rozpięcia dipola staje się nieistotny.

Dla uzyskania najlepszych rezultatów wszystkie uczestniczące stacje muszą być wyposażone w anteny promieniujące pionowo. Wyposażenie mieszane, w którym część stacji korzysta z anten o płaskiej DX-owej charakterystyce promieniowania, a część o skierowanej pionowo daje wyraźnie gorsze efekty.

Zysk kierunkowy anteny jest zależny od właściwości gruntu ale różnice pomiędzy gruntem suchym (o małej przewodności) i wilgotnym nie przekraczają na ogół kilku dB – jest to zależne też od wysokości zawieszenia anteny (przykładowo zysk kierunkowy dla dipola zawieszzonego na wysokości 0,2  $\lambda$  wynosił 5–8 dBi dla różnych rodzajów gruntu). Dla anteny umieszczonej na wysokości 0,15  $\lambda$  jest on o około 2 dB niższy, a dla wysokości 0,1  $\lambda$  – o około 5 dB. Wysokość umieszczenia anteny nad powierzchnią ziemi wywiera także wpływ na jej impedancję wejściową (oporność promieniowania anten poziomych maleje w miarę obniżania ich wysokości zawieszenia), a co za tym idzie również na współczynnik fali stojącej (WFS). Skuteczność anteny i jej zysk kierunkowy można znacząco poprawić umieszczając na powierzchni ziemi lub tuż nad nią na dowolnej wysokości reflektor o długości o ok. 5% większej od dipola. Innym stosowanym nieraz przez krótkofalowców rozwiązaniem są poziomo

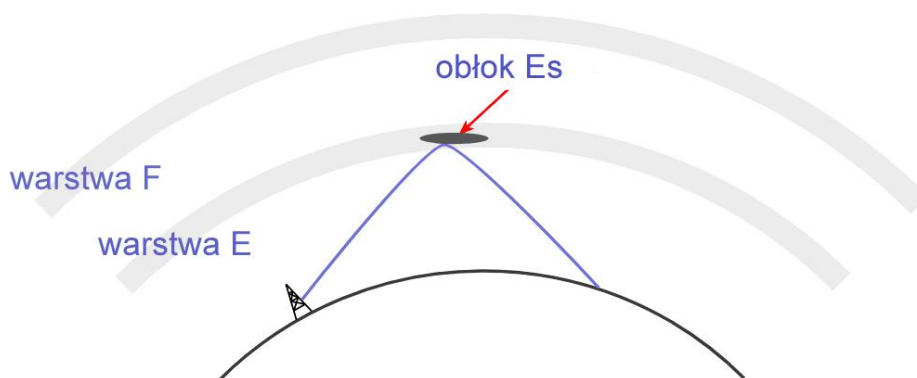
ułożone – na takich samych wysokościach jak dipoli – całofalowe pętle. W pojazdach najlepiej sprawują się anteny prętowe umieszczone w miarę możliwości ukośnie lub podwiązane linką plastikową tak aby chociaż jego część była zbliżona do poziomu. Korzystniejszą charakterystykę daje wygięcie anteny do tyłu niż nad karoserię, chociaż w ruchu drogowym praktyczniejsze jest to drugie rozwiązanie.



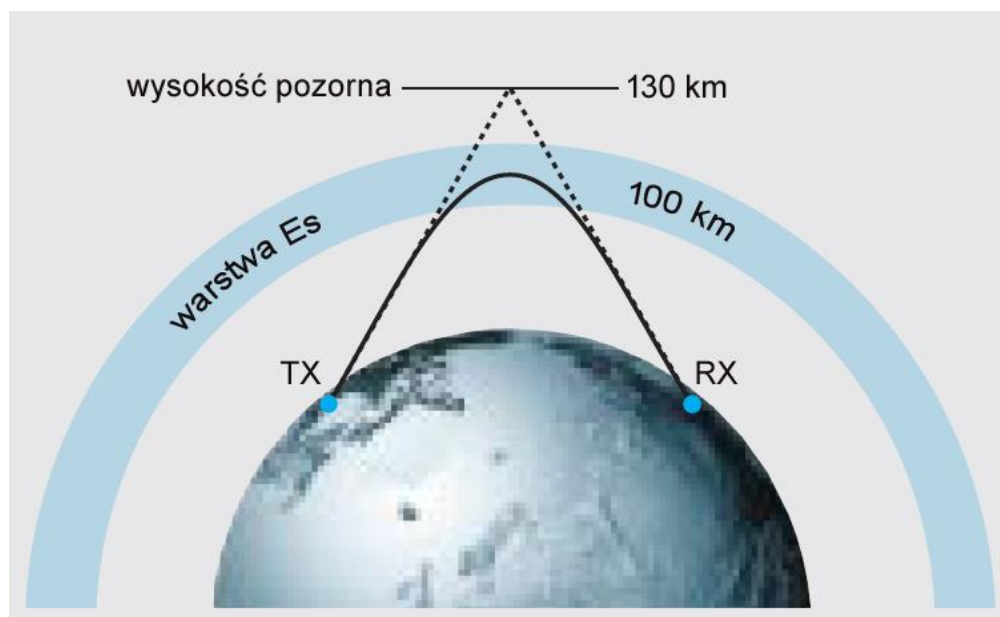
Rys. 4.3.2. Porównanie kątów promieniowania dla łączności DX-owej i z wykorzystaniem fali promieniowanej prawie pionowo

## 5. Pasma 6 m

Pasma 6 m bywa często nazywane pasmem magicznym (ang. *magic band*), najprawdopodobniej z powodu szybko zmieniających się warunków propagacji i niespodziewanego pojawiania się na nim licznych stacji, które równie szybko mogą zniknąć w szumach. Oznacza to konieczność ograniczenia QSO do wymiany niezbędnego minimum informacji. W Europie pasmo 6 m rozciąga się od 50 do 52 MHz, z tym, że w niektórych krajach dopuszczone są jego węższe wycinki, a oprócz tego nieraz obowiązują ograniczenia mocy nadawania, polaryzacji anten i rodzajów emisji różne aniżeli dla fal krótkich czy UKF. Pasma 6 m jest przyznane krótkofalowcom na zasadach drugorzędności. W Polsce dostępny jest pełny zakres 50–52 MHz, przy ograniczeniu mocy do 100 W EIRP i dozwolone są wszystkie emisje poza FM (F3E): SSB, CW, RTTY, PSK31, JT65A, FT8 i inne emisje cyfrowe. Łączności cyfrowe opisano dokładniej w tomach poświęconych technice słabych sygnałów. W krajach, w których dozwolona jest praca emisją F3E (np. w Austrii) czynne są też stacje przemiennikowe pracujące z odstępem częstotliwości -600 kHz. Na częstotliwości 50,293 MHz prowadzone są obserwacje WSPR.



Rys. 5.1. Odbicie fali od zjonizowanych obłoków warstwy sporadycznej Es, w korzystnych konstelacjach mogą wystąpić odbicia wielokrotne od obłoków Es, a także odbicia kombinowane z odbiciami TEP lub odbiciami od warstwy F2



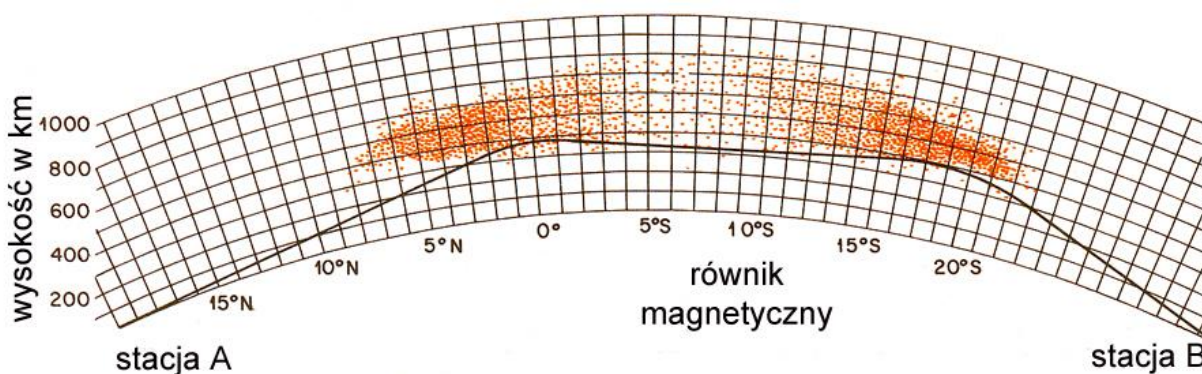
Rys. 5.2. Pozorna wysokość odbicia fal od warstwy Es

Podobnie jak w innych pasmach ultrakrótkofalowych istotną rolę odgrywa rozproszenie troposferyczne, zapewniające zasięgi 150 – 300 km. Oprócz propagacji troposferycznej operatorzy mogą w niektórych przypadkach korzystać z innych sposobów propagacji: odbić od sporadycznej warstwy Es (w lecie), odbić od zorzy polarnej (w rejonach położonych na północ od Polski), odbić transrównikowych TEP



(dla stacji zlokalizowanych symetrycznie w stosunku do równika magnetycznego) oraz trwających dłużej i częściej występujących odbić od smug meteorytów. W okresach maksimum aktywności słonecznej (przez dwa lub trzy lata wokół maksimum) zdarzają się również przypadki osiągnięcia przez MUF warstwy F2 wartości pozwalających na prowadzenie międzykontynentalnych łączności przez odbicia od niej – naogół trochę częściej w kierunku północ-południe niż wschód-zachód. Zasięg fali przyziemnej jest natomiast ograniczony do 30–50 km.

W okresie letnim (przeważnie od maja do sierpnia) na wysokości około 100 km mogą występować silnie zjonizowane obłoki odbijające fale w pasmach 6 i 4 m, a przy rzadziej występującym silniejszym stopniu jonizacji także w paśmie 2 m. Grubość chmur Es dochodzi do 5 km, a wymiary poziome wynoszą 10 – 100 km. Mechanizmy ich powstawania nie są jeszcze dostatecznie zbadane i dlatego też niemożliwe jest skuteczne prognozowanie ich występowania. Zaobserwowano wprawdzie pewne zależności między powstawaniem warstwy chmur Es, a aktywnością słoneczną (zwłaszcza w okresach zgodności polaryzacji pól magnetycznych Ziemi i Słońca), ale najlepszym sposobem na skorzystanie z nich jest obserwowanie sytuacji na paśmie (bez dłuższych i możliwie dokładnych nasłuchów trudno jest liczyć na sukces), doniesień w skrzynkach DX-Cluster i publikowanych w Internecie informacji o warunkach propagacji. Chmury Es przemieszczają się stosunkowo szybko w jonosferze i dlatego też dogodnie warunki odbić dla danej trasy mogą trwać bardzo krótko. Osiągane są zasięgi do 2000 km, a zakres odbijanych częstotliwości leży pomiędzy 20 – 200 MHz. W korzystnych momentach na odbierane są nawet dalekie stacje o mocach poniżej 1 W wyposażone tylko w anteny dipolowe lub niewiele lepsze. W dogodnych konstelacjach chmur Es dochodzi również do odbić wielokrotnych. Nie są one rzadkością, a stanowią wręcz specjalność pasma 6 m. W łącznościach za pośrednictwem warstwy Es przeważają łączności foniczne. Uzyskiwane zasięgi dochodzą do 2200 km dla odbić pojedynczych, a do 4500 km przy wielokrotnych.



Rys. 5.3. Łączność transrównikowa TEP. W przybliżeniu symetrycznie wokół równika magnetycznego znajdują się silnie zjonizowane i pochylone obszary warstwy F2. Fala nadawana po odbiciu od pierwszego obszaru rozchodzi się po cięciwie i następnie po odbiciu od drugiego wraca na ziemię

Powodowana przez docierające do Ziemi wysokoenergetyczne cząstki pochodzące z wybuchów słonecznych powodują powstanie w regionach podbiegunowych zorzy polarnej. Wysokozjonizowane i świecące wstęgi i chmury i przeróżnych często zmieniających się kształtach powstające na wysokościach około 100 km dobrze odbijają fale radiowe, ale praktyczne możliwości skorzystania z tej propagacji istnieją dopiero w krajach skandynawskich i na północ od nich, czasami występują także w północnej Polsce. Niejednorodność i ruchliwość warstw zorzowych powoduje charakterystyczne zniekształcenia i rozmycie widm odbijanych sygnałów. Utrudnia to łączności SSB w większym stopniu aniżeli łączności telegraficzne. Odbicia fal w paśmie 6 m trwają dłużej i zdarzają się częściej aniżeli w paśmie 2 m. Zorze polarne odbijają wprawdzie również fale krótkie, ale praktycznie łączności takie mają małe znaczenie. Mogą one w niewielkim stopniu przyczynić się do ożywienia górnych pasm krótkofalowych – 10 – 17 m.

Łączności za pośrednictwem odbić od zorzy polarnej odgrywają rolę głównie w rejonach na północ od Polski, ale czasami przy silnej zorzy mogą występować także w północnej Polsce. Jednocześnie z silnymi zorzami mogą występować również zjonizowane obłoki Es zwane zorzowymi (ang. *Aurora Es*). Sygnały telegraficzne mają charakterystyczny syczący dźwięk, a fonia SSB jest praktycznie niezrozumiała.

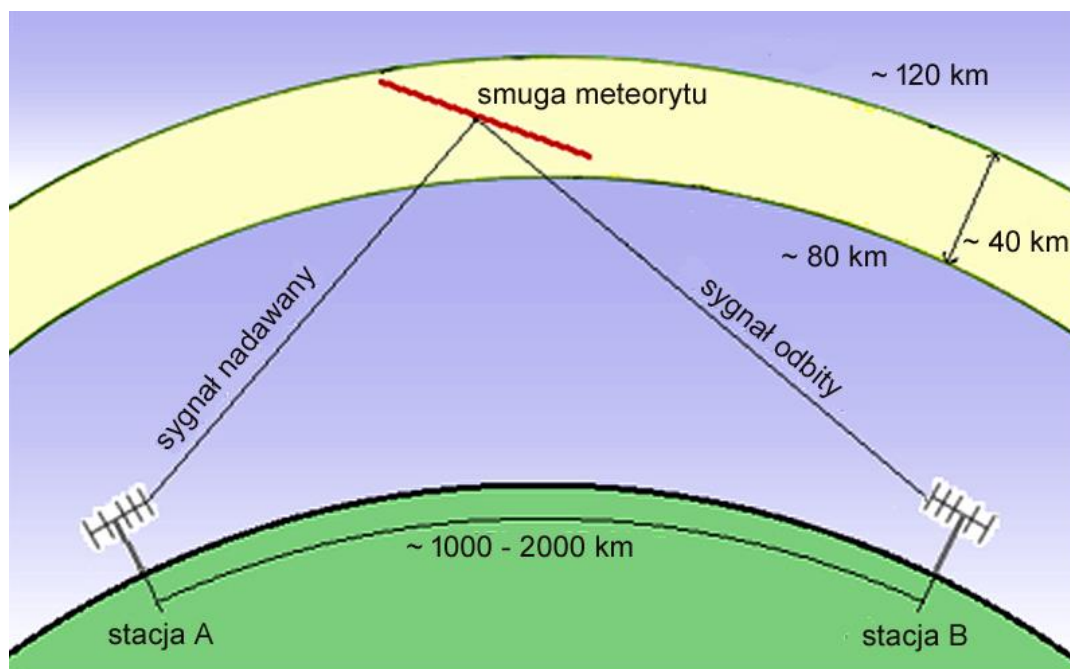
Podobny dźwięk mają sygnały rozpraszane na nieregularnościach warstwy Es. Propagacja typu FAI (ang. *Field Aligned Irregularities*) umożliwia łączności między stacjami leżącymi na południowy wschód i stacjami znajdującymi się na południowy zachód od ośrodka rozproszenia. Przykładowo dla ośrodka umiejscowionego nad Niemcami albo Szwajcarią możliwe byłyby łączności między Bałkanami o południową Francją. Anteny stacji muszą być zwrócone w kierunku ośrodka rozproszenia. Ich skierowanie bezpośrednio w kierunku korespondenta powoduje przerwanie odbioru. Zjawisko to, występujące równoległe do propagacji Es lub zaraz po niej, można też zaobserwować w paśmie 2 m. W okresach wiosennym i jesiennym występuje tzw. anomalia równikowa. Części warstwy F2 na północ i na południe od równika magnetycznego opadają ukośnie na mniejszą wysokość i w związku z tym powstają warunki do dwukrotnego odbicia fali przed jej powrotem na Ziemię (odbicia cięciwowego; ang. *chordal hop*). Możliwe stają się dzięki temu łączności w pasmach 30 – 70 MHz, a w okresach maksymalnej aktywności słonecznej do 144 MHz włącznie na trasach północ-południe dla stacji zlokalizowanych w przybliżeniu równych odległościach od równika i nie dalej od niego jak 3000 – 4000 km, a więc na dystansach ok. 5000 – 7000 km. Ten rodzaj łączności nosi nazwę łączności transrównikowych (ponadrównikowych), w skrócie TEP. Zjawisko występuje na kilka godzin przez zachodem Słońca i trwa do kilku godzin po nim. Sygnały są odbierane z silnymi zanikami i w skrajnych przypadkach na przeprowadzenie łączności pozostaje nawet tylko kilka minut. W korzystnych konstelacjach odbicia od warstwy Es mogą umożliwić korzystanie z propagacji TEP stacjom położonym w większych niż podane powyżej odległościom od równika, w tym również stacjom polskim. Czym bardziej złożona jest trasa propagacji tym bardziej należy liczyć się z tym, że dogodne warunki mogą trwać bardzo krótko i tym bardziej należy spieszyć się z wymianą informacji niezbędnych do zaliczenia łączności. Wiele zjawisk propagacyjnych występujących w paśmie 50 MHz nie zostało jeszcze do teraz wystarczająco wyjaśnionych. Początkowo po zaobserwowaniu zjawiska propagacji ponadrównikowej przypuszczano, że dochodzi do niej dzięki odbiciom od sporadycznej warstwy F (obłoków Fs), co się jednak po dokładniejszych obserwacjach nie potwierdziło.



Rys. 5.4. Równik magnetyczny nie pokrywa się z równikiem geograficznym i przebiega po linii falistej. Na ilustracji zaznaczono najczęstsze trasy łączności. Falisty przebieg równika magnetycznego powoduje, że mogą one być odchyłone od kierunku północ-południe nawet o 45 stopni. Stacje położone na większych szerokościach geograficznych mogą korzystać z łączności TEP jeśli pomiędzy nimi, a rejonem wokół równika znajdują się chmury Es dające dodatkowe odbicia (źródło „*Funkamateur*”)

Wpadające do atmosfery ziemskiej meteory ulegając silnemu rozgrzaniu i spalaniu w wyniku tarcia pozostawiają po sobie silnie zjonizowane smugi dobrze odbijające fale radiowe. Energia uwalniana w trakcie spalania jest wypromieniowywana w 99,895% w postaci ciepła, 0,1% – jako światło, a tylko 0,005% powoduje jonizację powietrza. Te zjonizowane smugi meteorytów o długościach dochodzących nawet do 100 km i średnicach rzędu metrów – występujące przeważnie na wysokościach 80 – 120 km odbijają fale radiowe w zakresie 6 – 2 m, a wyjątkowo również w paśmie 70 cm. Siła odbić i czas ich

trwania maleją wraz ze wzrostem częstotliwości, dlatego też prawdopodobieństwo nawiązania łączności w pasmach 6 i 4 m jest większe aniżeli w wyższych. Uzyskiwane są zasięgi dochodzące do 2300 km. Stopień jonizacji smugi zależy m.in. od szybkości lotu meteorytu jak i od zawartości metali w nim. Natężenie pola fali odbitej maleje z potęgą  $3/2$  ze wzrostem częstotliwości, a czas trwania odbicia – z jej kwadratem. Oznacza to przykładowo, że natężenie pola fali odbitej będzie w paśmie 2 m w przybliżeniu 5-krotnie niższe niż w paśmie 6 m dla tej samej smugi, a czas trwania odbicia – około 9-krotnie krótszy, dla pasma 432 MHz są to odpowiednio – 22-krotny spadek natężenia pola i 64-krotnie krótszy czas trwania odbicia. W pasmach mikrofalowych łączności MS (ang. *meteor scatter*) nie są już wogóle możliwe. W zakresie fal krótkich wyraźnie wyższy poziom zakłóceń i odbicia lub tłumienie fali przez jonosferę skutecznie uniemożliwiają łączności tego typu chociaż fakt występowania odbić daje się zaobserwować.



Rys. 5.5. Łączność za pośrednictwem odbić od zjonizowanych smug meteorytów (MS)

Jonizacja smugi zanika przeważnie przed upływem sekundy, dlatego też dawniej w łącznościach MS stosowana była szybka telegrafia, a w trakcie maksimumów najsilniejszych rojów nawet i fonia SSB. Od początku obecnego wieku zdecydowaną przewagę na tym polu zdobyły emisje cyfrowe z rodziny WSJT. Nazwa pochodzi od programu komunikacyjnego WSJT opracowanego przez K1JT. Sam program i udostępniane w nim emisje podlegają ciągłej ewolucji. Stosowana przez dłuższy czas emisja FSK441 została w najnowszych wersjach zastąpiona przez MSK144. Znikł też przeznaczony specjalnie do łączności meteorytowych w paśmie 6 m wariant JT6M. W WSJT-X dodana została natomiast emisja FT8 – zasadniczo podobna do znanych JT65 i JT9, ale o czterokrotnie krótszym cyklu, przeznaczona do łączności przez odbicia od warstwy Es i w innych szybko zmieniających się warunkach. Stosowana jest ona także i w wielu innych zakresach fal i zyskała sobie znaczną popularność.

Do najintensywniejszych i przez to najbardziej znanych krótkofalowcom rojów meteorytów należą Quarantydy (maksimum 3 – 4 stycznia), Perseidy (maksimum 11 – 12 sierpnia), Orionydy (maksimum 21.10), Leonidy (maksimum 18 – 19 listopada) i Geminidy (maksimum 12 – 13 grudnia). Dogodne warunki dla łączności MS występują w okresie co najmniej tygodnia lub dwóch wokół podanych maksimumów. Trasy rojów dających mniejszą liczbę zderzeń Ziemia przecina praktycznie przez większość dni w roku. Nazwy rojów pochodzą od gwiazdozbiorów z których kierunku pozornie nadciąga dany rój. Oprócz wymienionych rojów Ziemia przecina trasy wielu słabszych, tak że praktycznie warunki do łączności MS istnieją prawie zawsze.

Warunki propagacji w paśmie 4 m (70 – 70,5 MHz) są zasadniczo podobne, także w nim występują odbicia od warstwy Es i smug meteorów oraz rozproszenie troposferyczne.

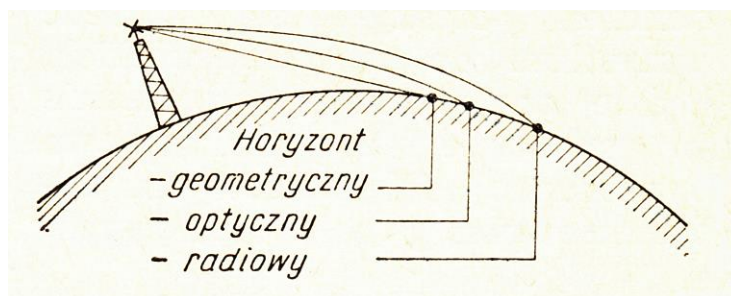


## 6. Pasma UKF

Zakresy fal metrowych, decymetrowych i centymetrowych obejmują łącznie częstotliwości od 30 MHz do 30 GHz. Właściwości propagacyjne nie są oczywiście jednakowe w tak szerokim zakresie częstotliwości, ale wykazują szereg cech wspólnych.

W pierwszym przybliżeniu przyjmuje się, że fale ultrakrótkie rozchodzą się prostoliniowo. W rzeczywistości w otoczeniu ziemskim sprawa jest bardziej skomplikowana, a założenie prostoliniowości jest słuszne w łącznościach kosmicznych.

Fale przyziemne zapewniające łączność w tym zakresie rozchodzą się na granicy dwóch środowisk – ziemi i troposfery, a więc oba te środowiska wywierają wpływ na ich propagację. Wpływ troposfery rośnie przy tym wraz ze wzrostem częstotliwości fali. Jest on też większy w przypadku gdy anteny są umieszczone ponad powierzchnią ziemi (co w zakresie UKF można praktycznie zawsze uznać za spełnione) i dotyczy przede wszystkim składowej bezpośredniej fali – składowej docierającej do anteny odbiorczej bezpośrednio bez odbicia od powierzchni ziemi. Oprócz fali bezpośredniej do anteny odbiorczej mogą docierać jednak także fale odbite od powierzchni ziemi i znajdujących się na niej obiektów – zabudowań, ukształtowania i pokrycia terenu itp. Fale te interferują ze sobą, co może powodować utrudnienia w prowadzeniu łączności. Na krawędziach większych (w stosunku do długości fali) obiektów dochodzi dodatkowo do ugięcia (dyfrakcji) fali dzięki czemu odbiór możliwy jest również w strefie, która na pierwszy rzut oka wydawałaby się zacieniona.



Rys. 6.1. Horyzont geometryczny, optyczny i radiowy

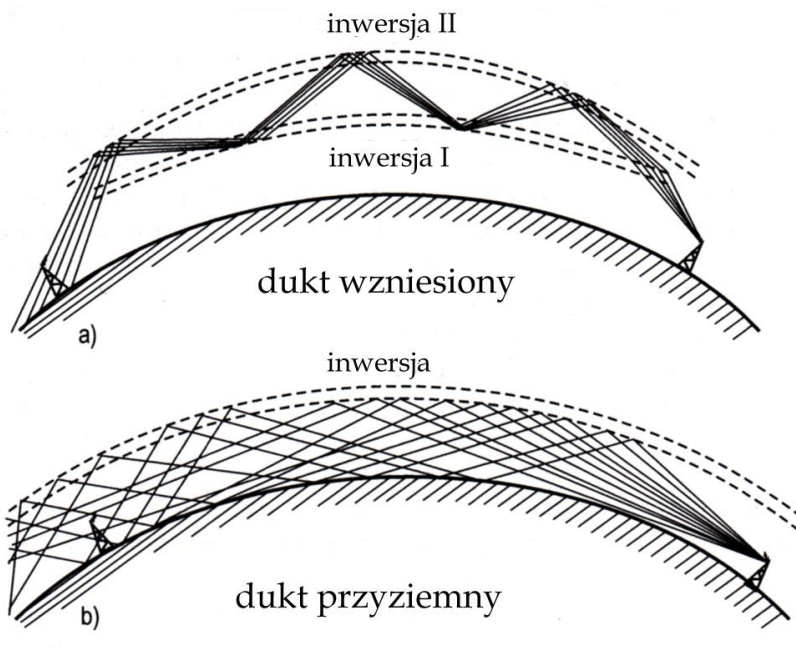
Odziaływanie troposfery przejawia się w zakrzywieniu drogi fali wskutek refrakcji w taki sposób, że bezpośredni zasięg ulega zwiększeniu – fala radiowa dociera do punktów odbiorczych położonych poza horyzontem. W tym momencie ważne staje się wyjaśnienie pojęcia horyzontu. Rozróżnia się horyzont geometryczny, optyczny oraz radiowy. Horyzont geometryczny jest miejscem geometrycznym (czyli zbiorem) punktów, w których do powierzchni ziemi docierają proste poprowadzone z punktu położonego ponad powierzchnią ziemi i przebiegające stycznie do ziemi. Promienie świetlne podobnie jak fale radiowe ulegają niewielkiej refrakcji w atmosferze ziemskiej. Horyzont optyczny jest więc przesunięty nieco poza horyzont geometryczny. Ze względu na niewielką różnicę oba horyzonty bywają potocznie określane wspólną nazwą – zasięgu optycznego. Fale radiowe są silniej uginane dlatego też w przybliżeniu jako horyzont radiowy na falach ultrakrótkich można przyjąć 1,15 zasięgu optycznego. W związku z tym, że współczynnik refrakcji (ugięcia) w atmosferze zależy od warunków meteorologicznych – temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza – zasięg radiowy ulega ciągłym wahaniom i to w dość szerokich granicach. Warto też zauważyć tutaj, że współczynnik refrakcji jest ściśle powiązany z przenikalnością dielektryczną powietrza. Oczywiście zmienia się on także wraz z wysokością.

Odległość horyzontu od obserwatora lub anteny nadawczej zależy od ich wysokości nad powierzchnią ziemi, dlatego też dla zwiększenia zasięgu korzystnie jest umieścić anteny możliwie jak najwyżej. Zjawiskiem rzadziej występującym ale zapewniającym znacznie większe zasięgi jest rozchodzenie się fal w duktach troposferycznych. Dukty te są swego rodzaju kanały falowodowe powstające wówczas, gdy tworzy się odpowiedni układ warstw atmosferycznych o różnych temperaturach i wilgotnościach. Współczynnik refrakcji zmienia się wówczas z wysokością w sposób dający przedłużenie zasięgu fali. Rozróżniane są dwa typy duktów: dukty przyziemne i dukty wzniesione.

Dukty przyziemne występują na wysokościach rzędu setek metrów lub poniżej. Tworzy się on na przykład w takich warunkach gdy ciepłe i suche powietrze napływa z lądu nad obszar chłodnej wody. Powstaje w ten sposób inwersja temperatury – sytuacja gdy temperatura w troposferze nie maleje



w funkcji wysokości, a na pewnych wysokościach wzrasta. Powoduje to nagły wzrost współczynnika refrakcji i załamanie się w kierunku ziemi fal promieniowanych ukośnie w górę. Zjawisko to nosi również nazwę superrefrakcji. Dukty przyziemne powstają również w wyniku oziębienia powierzchni ziemi w nocy, a zwłaszcza w pogodnej nocy.



Rys. 6.2. Dukty troposferyczne: wzniesiony i przyziemny

W tak powstałym dukcie następuje wielokrotne odbicie fali od granicy warstw i od powierzchni ziemi dzięki czemu uzyskiwane zasięgi przekraczają wielokrotnie odległość horyzontu radiowego. Dukt wzniesiony tworzy się naogół wtedy, gdy następuje przemieszczanie się w dół mas powietrza połączone z równoczesnym przesuwaniem się powietrza w wyższych warstwach troposfery. Górna warstwa jest bardziej wilgotna niż dolna i dodatkowo zachodzi tu także inwersja temperatury. W dukcie wzniesionym odbicia następują nie tylko na górnej granicy warstw ale również i na dolnej. Dukty wzniesione tworzą się niekiedy na wysokościach rzędu kilku km. Uzyskiwane w ten sposób zasięgi przekraczają często 1000 km.

Trzecim z mechanizmów jest tzw. rozproszenie troposferyczne – wielokierunkowe odbicie fal od ośrodków o właściwościach fizycznych różnych od otaczającej je troposfery. Mogą to być ośrodki występowania turbulencji albo miejsca o lokalnie różniących się współczynnikach refrakcji. Typową wysokością występowania tego rodzaju „reflektorów” w naszych szerokościach geograficznych jest około 10–11 km co zapewnia zasięgi rzędu 700–800 km. Fale rozchodzące się na dłuższych trasach dzięki rozproszeniu troposferycznemu podlegają często głębokim i powolnym zanikom. Przyczynami są zmiany położenia obszaru odbijającego i odbiór wielodrożny.

Przyczynami zakłóceń naturalnych w troposferze są wyładowania burzowe, szum jonizacyjny i szумы termiczne. W naszej strefie klimatycznej wyładowania burzowe są zjawiskami na tyle rzadkimi, że praktycznie dają słabe zakłócenia w pasmach UKF, a przy odbiorze FM są niemal niedostrzegalne. Fronty burzowe mogą być przyczyną chwilowych zaników propagacji lecz mogą być także korzystne dla propagacji przez rozproszenie troposferyczne.

Bardziej dokuczliwe są szумы jonizacyjne. Szумы pierwszego rodzaju występują powszechnie i są wywołane przez naładowane krople deszczu lub płatki śniegu opadające na ziemię. Każda z kropli przekazuje antenie pewien ładunek elektryczny, który wzbudza w jej elementach impulsy odbierane w odbiorniku jako trzaski. Zjawisko to występuje najsilniej w pierwszych chwilach ulewnego deszczu najpierw jako pojedyncze trzaski, a następnie jako coraz gęstszy szum. Uziemienie anteny z nim jej elementów i nośnika praktycznie nie zmniejsza poziomu szumów.

Drugi rodzaj szumu jonizacyjnego występuje szczególnie często w górach. Silnie zjonizowane chmury nad szczytami, a nawet silny suchy wiatr wywołują indukcyjne ładowanie się wszystkich przewodzących przedmiotów do bardzo wysokich napięć. Z końców anteny, piorunochronów oraz innych

pobliskich ostro zakończonych przedmiotów pod wpływem pola o dużym natężeniu są emitowane elektrony pobudzające powietrze wokół do świecenia (ogni św. Elma). Zjawisko to jest źródłem bardzo silnych szumów. W przypadku anten uziemionych efekt ten występuje dopiero przy dużych natężeniach pola, jeżeli natomiast jej elementy są izolowane wystarczą już pola znacznie słabsze. Jeżeli konstrukcja anten wymaga izolowania pewnych jej części dla prądów w.cz. można zastosować dławiki uziemiające je dla prądu stałego lub oporniki o wartości kilku kiloomów.

Do zjawisk sporadycznych, ale odgrywających mimo to znaczącą rolę w łącznościach amatorskich należą odbicia od sporadycznej warstwy Es i od zjonizowanych smug meteorytów. Do odbić od warstwy Es dochodzi w pierwszym rzędzie w niższych pasmach UKF czyli głównie w pasmach 6 i 4 m, a czasem także w paśmie 2 m (statystycznie około 4 razy rzadziej). Sama warstwa występuje głównie w miesiącach letnich a najlepszą porą dnia jest popołudnie około godz. 16–18. O występowaniu warstwy Es można przekonać się obserwując amatorskie radiolatarnie w pasmach 6 i 2 m albo dalekosiężny odbiór radiowy w paśmie UKF.

Smugi czyli kolumny zjonizowane przez meteoryty powstają zazwyczaj na wysokości około 80 do 120 km, ich długość dochodzi średnio do około 25 km a średnice początkowe wynoszą około 1 m. Na skutek wichrów jonosferycznych i turbulencji proste początkowo smugi przybierają po pewnym czasie kształt serpentyny. Do atmosfery ziemskiej wpada codziennie duża liczba meteorytów, ale największe ich ilości docierają w terminach przecinania przez Ziemię orbit ich rojów.

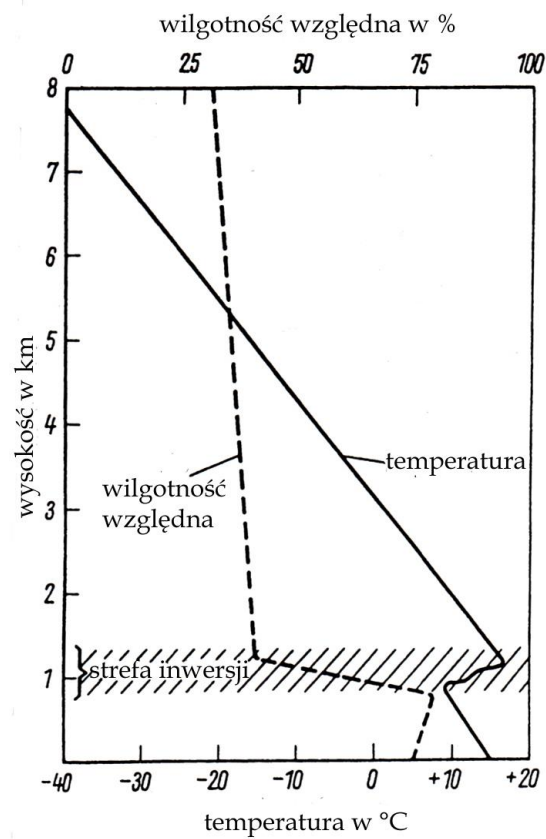
Odbicia od smug meteorytów występują również najczęściej w paśmie 6 m ale możliwe są też łączności w pasmach 2 m i 70 cm. O ile dawniej dominowała w nich telegrafia nadawana z dużymi szybkościami o tyle obecnie przeważają emisje z grupy WSJT.

Odbicia od zjonizowanych kolumn zorzowych (zaliczane do propagacji jonosferycznej) mają znaczenie dla stacji położonych w rejonach na północ od Polski.

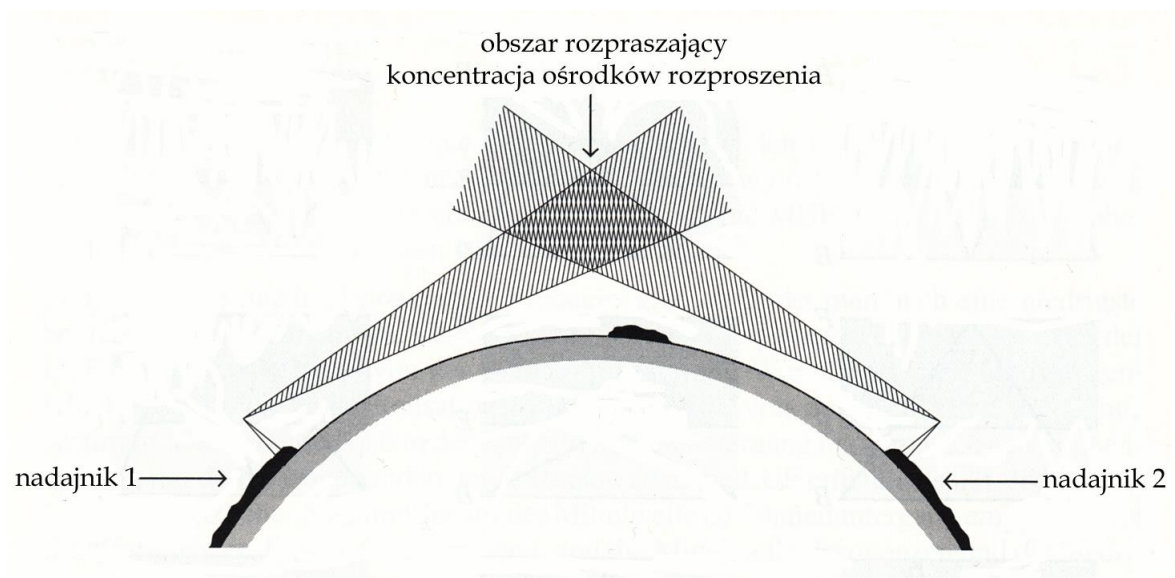
W odróżnieniu od fal krótkich, gdzie jako łączności DX-owe liczą się przeważnie łączności międzykontynentalne o tyle w paśmie 2 m za DX-y uważa się łączności na dystansach przekraczających 500 km, a w paśmie 70 cm – na dystansach przekraczających 300 km. Informacje o bieżących warunkach propagacji i czynnych radiolatarniach można znaleźć w Internecie m.in. pod adresami [B.8], [B.9] i [B.10].

W bieżącej ocenie warunków propagacji w zakresach UKF pomocne są liczne radiolatarnie pracujące w pasmach 6 m – 23 cm i wyższych. Ich aktualnych spisów najlepiej jest poszukać w Internecie w witrynach krajowych związków krótkofalowców albo klubów zajmujących się dalekosiężnymi łącznościami UKF.

Praktycznym wskaźnikiem panowania szczególnych warunków propagacji może być także odbiór odległych stacji radiofonicznych UKF w zakresie 87,5 – 108 MHz. Autor przeżył taką szczególną sytuację pewnego sierpniowego dnia 1976 roku, kiedy we wczesnych godzinach popołudniowych w środkowej części Turcji na odbiorniku samochodowym możliwy był odbiór stacji radiowych UKF z całego południa Europy (Włoch, Francji itd.), a nawet Warszawy I na falach długich – normalnie możliwy dopiero późnym wieczorem i w nocy. Oczywiście takie szczególne warunki propagacji mogą występować tylko w części pasm.



Rys. 6.3. Powstawanie warstwy inwersyjnej. W obszarach wyżowych zjawisko to może powtarzać się przez kilka dni z rzędu, może występować także przy przejściu frontu chłodnego

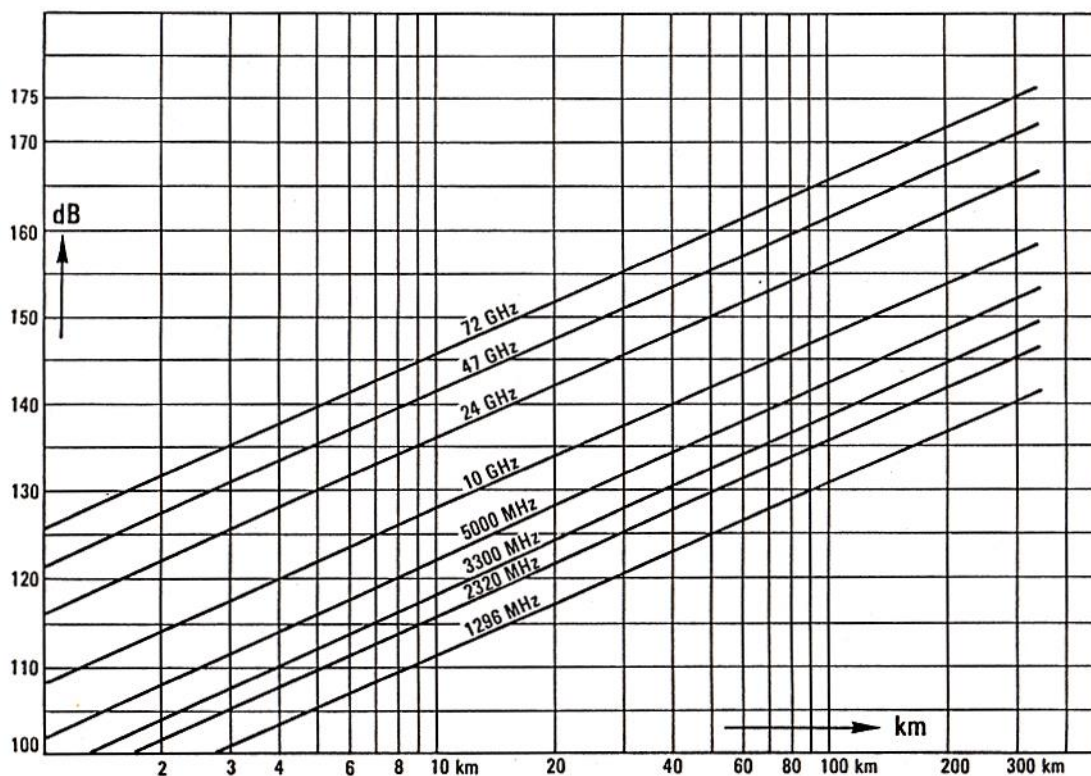


Rys. 6.4. Łączność z użyciem rozpraszania troposferycznego

## 7. Mikrofałe

W propagacji fal w zakresie mikrofalowym występują najczęściej następujące sytuacje i zjawiska:

1. Łączności na fali bezpośredniej, zasięgi quasi-optyczne  $4/3$  horyzontu optycznego
2. Dukty troposferyczne – występowanie uzależnione od sytuacji meteorologicznej – inwersji temperatur; korzystne okresy wiosny i jesieni; użyteczne w zakresie od UKF do mikrofal, zasięgi do ponad 1000 km,
3. Dukty występujące nad powierzchnią morza – do wykorzystania w rejonach nadmorskich w pasmach GHz,
3. Rozproszenie troposferyczne – użyteczne w zakresie od UKF do 5 GHz, występuje prawie zawsze; zasięgi do ponad 1000 km, wymagane stosunkowo duże moce nadajników,
4. Rozproszenie deszczowe – głównie okolice 10 GHz, zasięgi do kilkuset km, występowanie zależne od warunków atmosferycznych i burzowych (korzystna ich obserwacja np. na mapach w Internecie), łączności najczęściej możliwe w okresie letnim,
5. Odbicia od obiektów latających – samolotów – głównie pasma 23 i 13 cm, ale możliwe do wykorzystania także w pozostałych pasmach do 10 GHz,
6. Odbicia od śladów meteoroidów – głównie UKF do pasma 23 cm włącznie, przeważnie stosowane emisje WSJT – FSK441 itp.; terminy przelotów rojów podawane w literaturze i w Internecie, wystarczające nadajniki o średniej mocy i anteny o średnich wymiarach, zależnie od wyposażenia i emisji zasięgi do ponad 2000 km.



Rys. 7.1. Tłumienie wolnej przestrzeni (tłumienie podstawowe) w mikrofalach amatorskich w zależności od odległości i częstotliwości fali (źródło [A.7])

Tłumienie wolnej przestrzeni oblicza się ze wzoru:

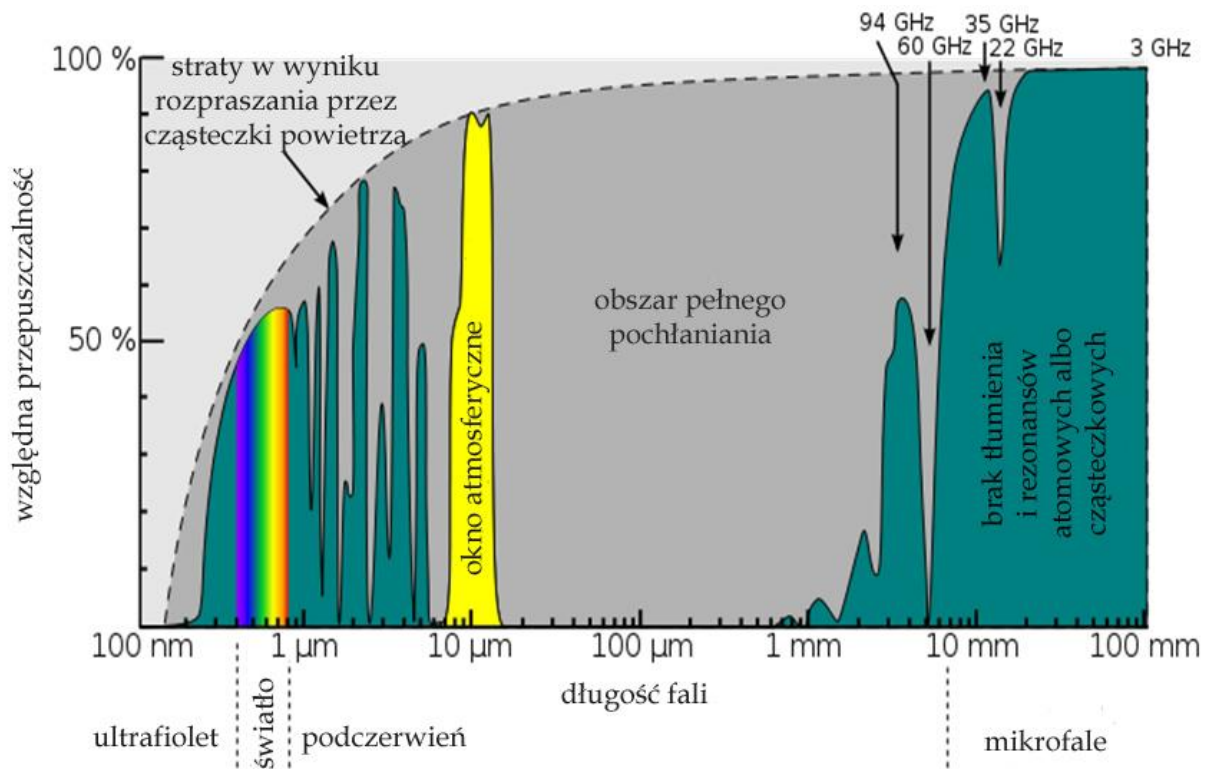
$T \text{ [dB]} = 32,4 + 20 \log l \text{ [km]} + 20 \log f \text{ [MHz]}$ , gdzie  $l$  jest odległością między stacjami w km, a  $f$  – częstotliwością w MHz.

W obliczeniach uwzględniony jest zarówno wpływ rozszerzania się powierzchni oświetlanej przez promieniowaną wiązkę fal (rodział energii na większą powierzchnię) jak i zmniejszanie się powierzchni skutecznej anten w miarę wzrostu częstotliwości (skracanie fali powoduje proporcjonalne zmniejszenie

wymarów fizycznych anteny), a co za tym idzie zmniejszanie się napięcia na zaciskach anteny przy danym natężeniu pola elektromagnetycznego.

W pasmach mikrofalowych dodatkowo do tłumienia wolnej przestrzeni konieczne jest uwzględnienie tłumienia spowodowanego pochłanianiem energii przez cząsteczki pary wodnej i gazów atmosferycznych oraz rozpraszania fali przez cząsteczki powietrza. Zależność tych zjawisk od częstotliwości fali przedstawiono na wykresach poniżej.

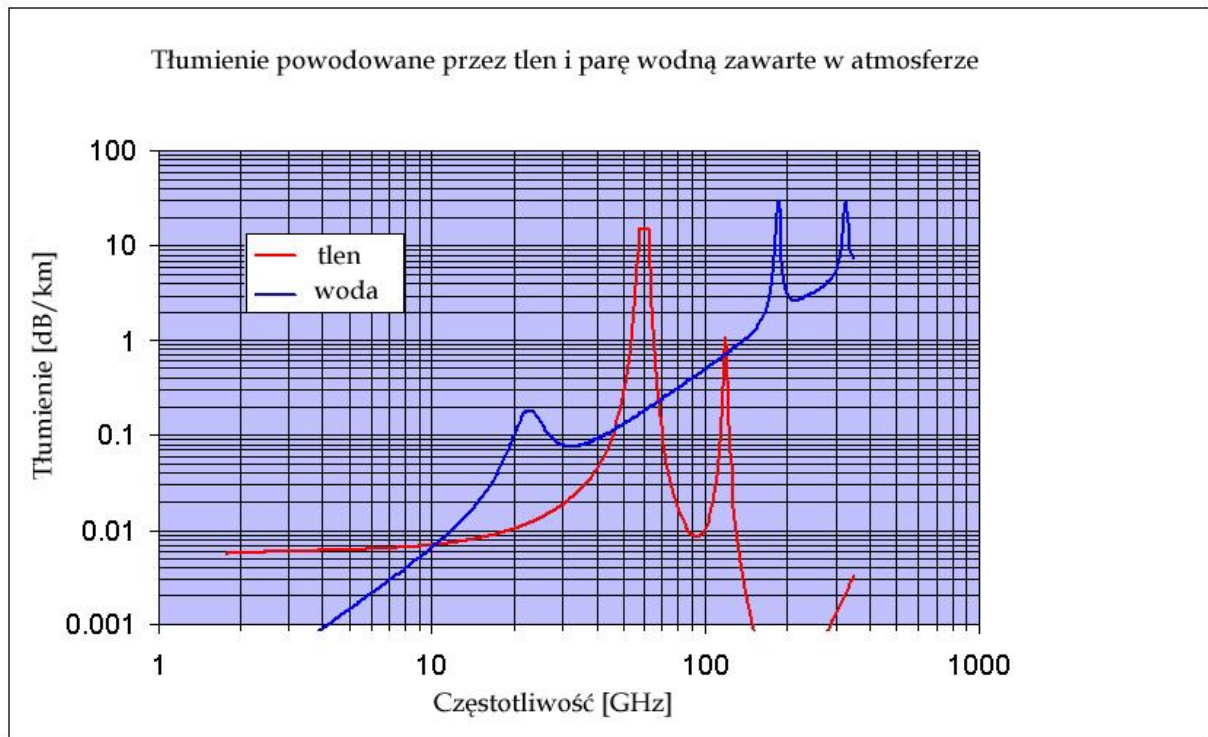
### 7.1. Przepuszczalność atmosfery w funkcji częstotliwości



Rys. 7.2. Pierwsze minimum przepuszczalności atmosfery (licząc w kierunku wzrastającej częstotliwości) leży w pobliżu 22 GHz, a więc niedaleko od amatorskiego pasma 24 GHz. Pasma niższe do 10 GHz włącznie nie są tym dotknięte



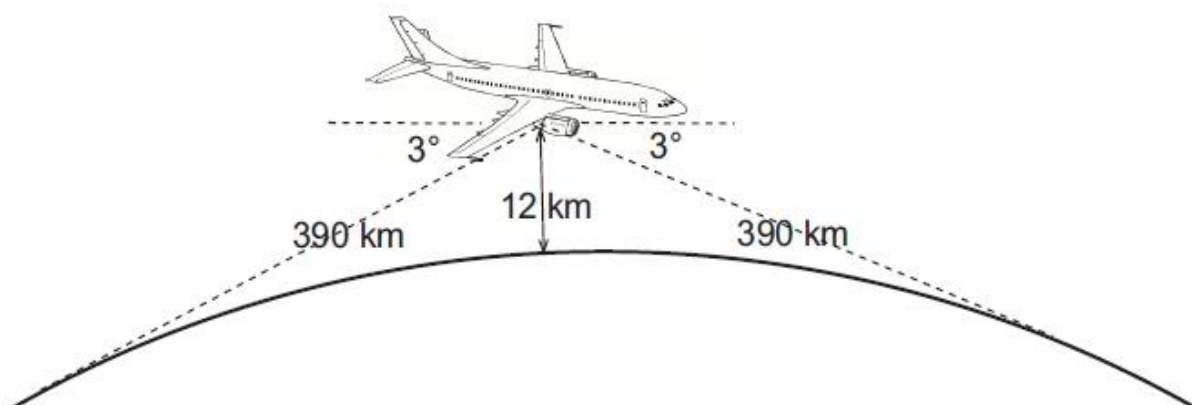
## 7.2. Dodatkowe tłumienie atmosferyczne



Rys. 7.3. Zależność dodatkowego tłumienia fal powodowanego przez parę wodną i tlen atmosferyczny od częstotliwości. Pierwsze maksimum tłumienia przez wilgoć atmosferyczną występuje w pobliżu 22 GHz, a więc niedaleko amatorskiego pasma 24 GHz. Pasma 5 i 10 GHz są wyraźnie słabiej tłumione

## 7.3. Odbicia od samolotów

Powiększenie zasięgu przez wykorzystanie odbić od samolotów (ang. *aircraft scatter*) daje stosunkowo najlepsze rezultaty w pasmach 1296 i 2320 MHz.



Rys. 7.4. Zasada łączności opartych o odbicia od samolotów

Rysunek 7.4. ilustruje zasadę łączności opartych o odbicia od przelatujących nad możliwą trasą łączności samolotów. Przykładowo przy założeniu zasięgi 4/3 zasięgu optycznego samolot znajdujący się na wysokości 12 km powinien zapewnić łączność w promieniu 520 km od niego, ale z niektórych

obserwacji wynika, że praktycznie możliwe do wykorzystania zasięgi nie przekraczają w tym przypadku 800 km dla SSB. Dla innych wysokości zasięgi te są oczywiście odpowiednio mniejsze lub większe. Jak wynika z rysunku fale od bardziej oddalonych stacji padają na powierzchnię samolotu pod coraz mniejszym kątem (na rysunku przykładowo  $3^\circ$  w stosunku do płaszczyzny samolotu, co daje kąt padania  $87^\circ$ ) co oznacza, że skuteczna powierzchnia samolotu odpowiadająca powierzchni rzeczywistej podzielonej przez  $\cos$  kąta padania, są coraz słabiej odbijane. Jednak nawet przy bliższych zasięgach (co odpowiada korzystniejszym kątom padania) wyniki mogą być interesujące.

#### 7.4. Łączności poprzez rozproszenie deszczowe

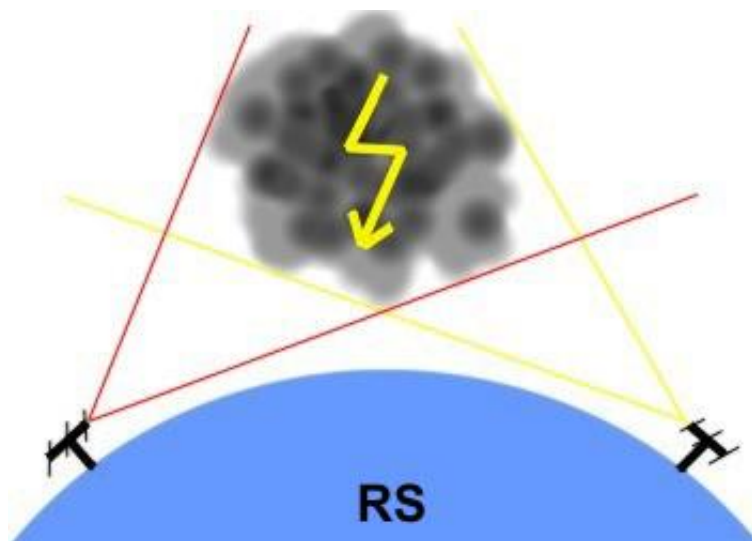
Rozproszenie deszczowe (ang. *rain scatter*; niem. *m. Regenscatter*) czyli fizycznie rzecz biorąc rozproszenie fal radiowych przez krople deszczu pozwala na uzyskanie znacznych zasięgów w pasmach mikrofalowych. Fale rozpraszane są w różnych kierunkach, w tył, na boki i w przód w stosunku do kierunku padającej fali. Skuteczność odbicia fal zależy od stosunku ich długości do rozmiarów kropli i rośnie zasadniczo wraz z częstotliwością. Jednocześnie jednak rośnie również tłumienie fali w atmosferze, a zwłaszcza tłumienie spowodowane przez zawartą w niej wilgoć. Dlatego też w praktyce krótkofalarskiej łączności tego typu są nawiązywane najczęściej w paśmie 10 GHz. W zależności od wysokości ośrodka rozpraszającego (dochodzącej nawet do 10–12 km) osiągane są zasięgi od kilkuset do ponad 1000 km. Obszar rozpraszający powinien znajdować się w pewnej odległości od własnej stacji np. 200 – 500 km ale również odległości kilkudziesięciu do 100 km dają ciekawe wyniki.

Cząsteczki materiałów zawartych w atmosferze ziemskiej (pyłów, pary wodnej, wody) powodują rozproszenie rozchodzącego się w niej światła i fal radiowych. Dokładniej rzecz biorąc występuje tutaj zjawisko pochłaniania i powtórnego wypromieniowania fal powodujące zmianę ich kierunku rozchodzenia. Duża liczba przypadkowo rozmieszczonych cząsteczek powoduje, że fale te rozchodzą się praktycznie we wszystkich kierunkach. Skuteczność rozproszenia fal rośnie z czwartą potęgą częstotliwości aż do wystąpienia sytuacji, w której długość fali staje się porównywalna z rozmiarami cząsteczek. Dla cząsteczek o rozmiarach równych  $1/10$  długości fali wykładnik potęgi zaczyna maleć, a począwszy od przybliżonej równości z długością fali skuteczność rozpraszania nie ulega dalszym zmianom.

W zakresie światła widzialnego rozproszenie fali powodują nawet cząsteczki gazów zawartych w atmosferze, a ponieważ światłu niebieskiemu odpowiada wyższa częstotliwość fali, a co za tym idzie większa skuteczność rozpraszania aniżeli np. dla koloru czerwonego, nieboskłon ma kolor niebieski.

Woda w atmosferze ziemskiej występuje w kilku postaciach różniących się rozmiarami cząsteczek. Pierwszą z nich jest para wodna o cząsteczkach zbliżonych rozmiarami i własnościami do cząsteczek gazów atmosferycznych. Rozmiary jej cząsteczek ( $0,001 \mu\text{m}$  do  $0,01 \text{ mm}$ ; w chmurach  $0,001 \text{ mm}$  –  $0,1 \text{ mm}$ ) są zbyt małe aby mogło dojść do rozproszenia fali o częstotliwości 10 GHz. Radary meteorologiczne wykrywające obecność chmur pracują w znacznie wyższych zakresach fal 35 – 95 GHz. Krople deszczu mają (w zależności od jego charakteru i intensywności) wymiary  $0,5$  –  $3 \text{ mm}$  a więc w porównaniu z falą 10 GHz ok.  $1/60$  –  $1/10$  jej długości. Silne opady o dużych kroplach np. powiązane z burzami dają więc lepsze wyniki aniżeli drobny deszcz lub mżawka.

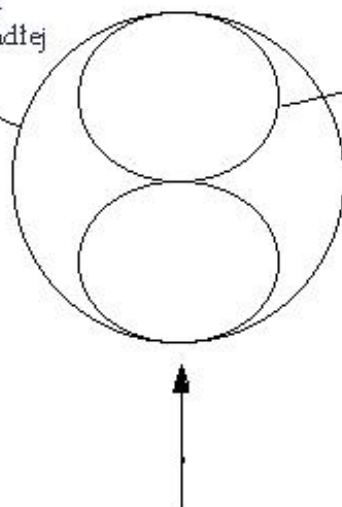
Poziomy sygnałów rozproszonych maleją szybko w miarę obniżania się częstotliwości a więc przykładowo dla pasma 5,7 GHz (ok. 1/2 częstotliwości pasma 10 GHz) wynoszą średnio ok. 1/16 w porównaniu z nim, co odpowiada różnicy ok. -12 dB. Zjawisko rozproszenia daje się wprawdzie zaobserwować



również i w paśmie 3,4 GHz (w przybliżeniu 1/3 częstotliwości 10 GHz), ale ze spadkiem siły sygnałów ok. -19 dB (1/81). W paśmie 24 GHz teoretycznie należałoby więc spodziewać się znacznie lepszych wyników, ale z kolei wilgoć atmosferyczna znacznie silniej tłumii fale w tym zakresie dlatego (lokalne, w funkcji częstotliwości, maksimum tłumienia leży w pobliżu 22 GHz) też w praktyce wyniki są zbliżone do osiągniętych w paśmie 10 GHz, a dodatkowo liczba czynnych stacji jest znacznie niższa.

Rys. 7.5. Zasada łączności przez rozproszenie deszczowe

Charakterystyka rozpraszania sygnału o polaryzacji prostopadłej do płaszczyzny obszaru - polaryzacji pionowej. Jest ona identyczna z charakterystyką pionowego dipola umieszczonego w środku obszaru.



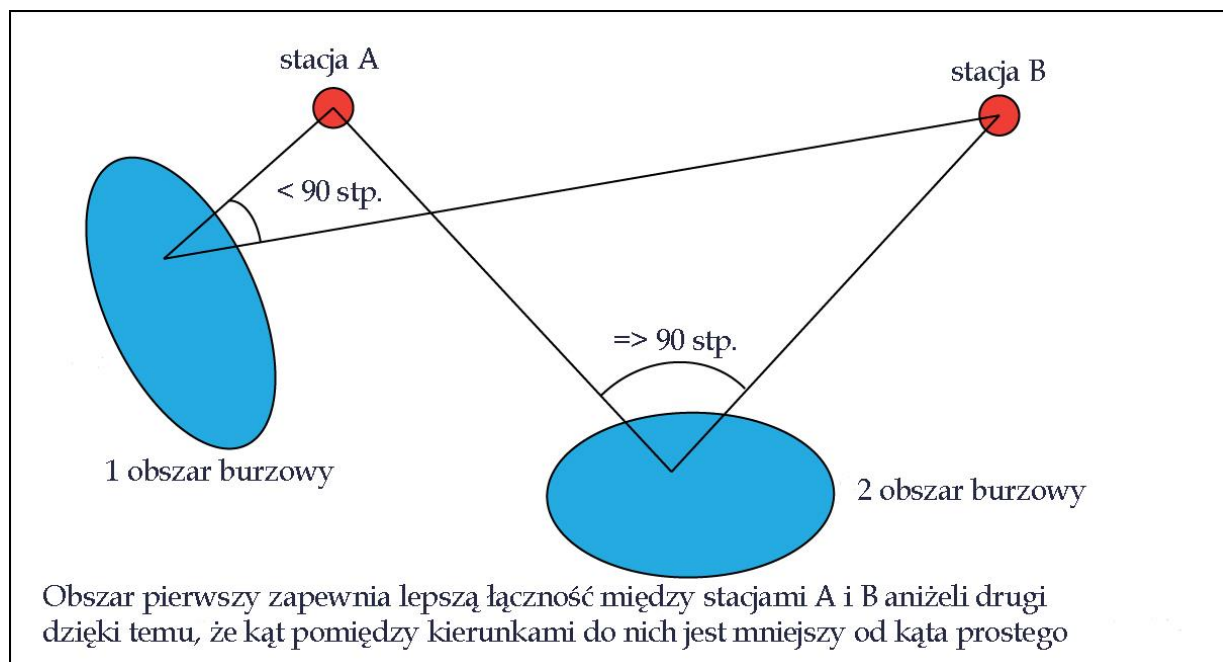
Charakterystyka rozpraszania sygnału o polaryzacji równoległej do płaszczyzny obszaru - polaryzacji poziomej. Jest ona identyczna z charakterystyką poziomego dipola umieszczonego w środku obszaru.

WA1MBA

Rys. 2. Kierunkowe charakterystyki obszaru rozpraszania w zależności od polaryzacji padającej fali

Rys. 7.6

Fala rozproszona zachowuje polaryzację fali padającej. Fala o polaryzacji prostopadłej do płaszczyzny obszaru rozpraszającego, a więc fala o polaryzacji pionowej jest rozpraszana równomiernie we wszystkich kierunkach – obszar rozpraszający ma więc dookólną charakterystykę promieniowania odpowiadającą charakterystyce anteny pionowej. Dla fali o polaryzacji równoległej (a więc poziomej) charakterystyka ma kształt ósemki podobnej do charakterystyki promieniowania dipola poziomego (rys. 7.6). Najgorsze warunki łączności panują więc na kierunkach prostopadłych do linii łączącej stację z obszarem rozpraszającym. Łączności na kierunkach pod kątemi ostrymi lub rozwartymi są możliwe bez trudnień (rys. 7.7).



Rys. 7.7. Kątowa zależność prawdopodobieństwa nawiązania połączenia

Wskutek efektu Dopplera wywołanego przez ruch kropli sygnały odbierane za pośrednictwem rozproszenia deszczowego są dodatkowo zmodulowane częstotliwościowo w sposób przypadkowy. Powoduje to, że mają one charakter kluczonego szumu w przypadku telegrafii bądź szumu ulegającego zmianom w takt mowy dla sygnałów SSB – podobnie jak przy propagacji zorzowej w paśmie 2 m (najmniej zniekształcone są sygnały promieniowane w przód). Dewiacja tej modulacji częstotliwości jest jednak na tyle wąska, że nie wywiera praktycznie wpływu na wąskopasmową modulację FM (NB-FM) i sygnały takie są przeważnie odbierane czysto i bez dodatkowych szumów – równie dobrze jak w propagacji naziemnej. Jej użycie jest więc jak najbardziej uzasadnione, zaleca się jedynie aby nie nadawać modulacją FM zbyt blisko częstotliwości wywoławczej 10368,1 MHz.

Najczęściej używanym zakresem pracy jest 10368,050 – 10,368,500 MHz. Niektóre źródła podają także zalecany dokładniejszy podział tego zakresu: 10368,050–10368,150 MHz – CW, 10368,150 – 10368,200 MHz – CW+SSB, 10368,200 – 10368,300 MHz – SSB i 10368,350 – 10368,450 MHz – FM. W praktyce może mieć on znaczenie tylko w warunkach większego tłoku na paśmie, a w razie obecności tylko nielicznych stacji mogą one pracować znacznie bliżej częstotliwości wywoławczej. Dla zwykłych łączności FM przewidziany jest wprawdzie w planie podzakres powyżej 10369 MHz, ale mamy tutaj do czynienia z propagacją szczególną, a liczba stacji jest znacznie niższa niż np. w paśmie 2 m więc nie ma potrzeby zbyt rygorystycznego przestrzegania podziału kosztem ograniczenia szans na nawiązanie ciekawych łączności.

Przyjęła się praktyka nadawania niedługich wywołań telegraficznych lub ciągów kresek na częstotliwości ok. 10368,1 MHz. W raportach telegraficznych w miejsce trzeciej cyfry nadawana jest litera S – od słowa *scatter*. Szybkość telegrafowania nie powinna przekraczać 60 zn./min., a w trudniejszych warunkach – nawet 40 zn./min. W łącznościach SSB należy mówić wolno i wyraźnie, a zamiast literowania międzynarodowego często korzystnie jest stosować krajowe ponieważ składa się ono z dłuższych słów, mających więcej sylab niż międzynarodowe i jest przez to łatwiej rozpoznawalne, np. *Celina* zamiast *Charly*, *Danuta* zamiast *delta* itp.

Silny wiatr w obszarze rozpraszania może dodatkowo spowodować przesunięcie częstotliwości środkowej sygnału w wyniku efektu Dopplera nawet o kilka kHz.

Najlepszy sezon łączności przez rozproszenie deszczowe trwa w naszych szerokościach geograficznych w przybliżeniu od kwietnia do września i zasadniczo pokrywa się z sezonem burzowym. Ze względu na większe prawdopodobieństwo wystąpienia burz korzystną porą dnia jest późne popołudnie i wczesny wieczór.

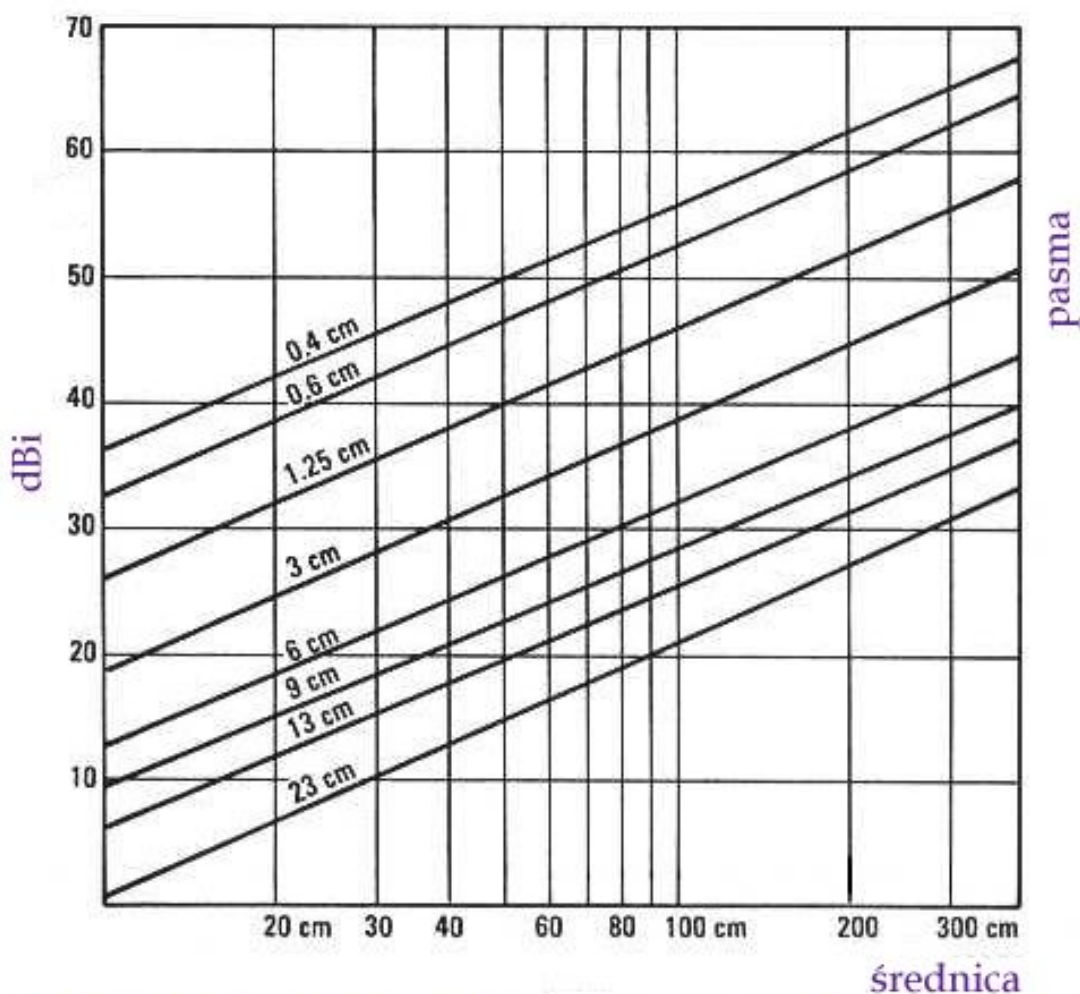
Również opady śniegu umożliwiają prowadzenie łączności przez rozproszenie sygnału analogicznie jak dla opadów deszczu. W praktyce dostateczną siłę sygnałów rozproszonych zapewniają dopiero silne



śnieżyce. Również zawarty w chmurach lub opadach gradu lód powoduje rozproszenie fal ale jego drobne kryształki dają słabsze rozproszenie aniżeli krople wody o porównywalnych rozmiarach. Dopiero kulki lodowe o średnicach ok. 10–15 mm zapewniają dostatecznie dobre wyniki (wymiary zbliżone do połowy długości fali 10 GHz), a przy średnicach rzędu 50 mm suche kulki lodowe dają ok. 20-krotnie lepsze wyniki aniżeli krople tej samej wielkości. Rozpraszalność dla lodu mokrego jest zbliżona do rozpraszalności przez porównywalne wielkością krople wody.

Sytuację meteorologiczną i burzową można wygodnie obserwować w internecie ([www.pogodynka.pl](http://www.pogodynka.pl), [www.imgw.pl](http://www.imgw.pl), [burze.dzis.net](http://burze.dzis.net), [www.blitzortung.org](http://www.blitzortung.org)). Źródłem informacji o wystąpieniu szczególnych warunków propagacyjnych mogą być także skrzynki elektroniczne „DX Cluster”, dostępne w sieci packet-radio i internetowo, fora dyskusyjne poświęcone temu tematowi no i oczywiście pomocne jest śledzenie sygnałów radiolatarni. Odbiór oddalonych radiolatarni albo odbiór bliskich z nietypowych kierunków sygnalizują wystąpienie rozproszenia deszczowego.

Do przeprowadzenia pierwszych prób na stosunkowo niewielkie odległości wystarczy aby ośrodki rozproszenia znajdowały się w odległości 20–100 km od własnej stacji.



Zysk anten parabolicznych przy sprawności oświetlenia 55%

Rys. 7.8. Zysk anten parabolicznych w zależności od skutecznego stopnia (sprawności) oświetlenia reflektora dla pasm amatorskich. Różnica stopnia oświetlenia od 40% do 70% daje zmiany zysku rzędu 2 – 3 dB

Praca poprzez rozproszenie deszczowe może odbywać się z domowego QTH. Antena nie musi być umieszczona wysoko, ale powinna mieć niczym nie zasłonięty widok w kierunku obszaru rozproszenia czyli w praktyce wszędzie (lub prawie wszędzie) naokoło. Może ona być skierowana poziomo lub nieznacznie (np. ok. 5–10 stp.) nachylona w górę. Anteny o wąskich wiązkach i znacznym zysku utrudnia-



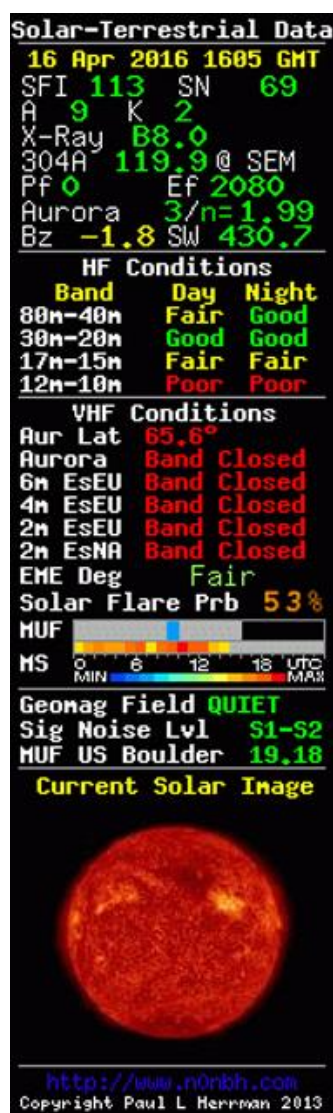
ją raczej skuteczną pracę, ponieważ trudniej jest wycelować w obszar rozproszenia i skutecznie go naświetlić. W zupełności wystarczające są anteny paraboliczne o średnicach rzędu 45–60 cm chociaż często stosowane bywają także anteny tubowe o zyskach rzędu 20 dBi.

Wyposażenie stacji może składać się z przeciętnego transwertera na pasmo 10 GHz i wzmacniacza o mocy wyjściowej 1 W lub więcej (w pasmach 5,6 i 24 GHz znacznie więcej dla skompensowania wpływu opisanych powyżej negatywnych zjawisk). W wielu przypadkach wystarczają wprawdzie nawet mniejsze moce, ale dla większych mocy rośnie oczywiście prawdopodobieństwo powodzenia. Stacje o mocach 100–300 mW i antenach parabolicznych o średnicy 30 cm również wielokrotnie mogły się cieszyć z sukcesów. Współczynnik szumów toru odbiorczego rzędu 2–3 dB jest zupełnie wystarczający.

## 8. Prognozy propagacji

We wcześniejszych rozdziałach omówiliśmy najważniejsze zjawiska związane z propagacją fal długich, średnich, krótkich i ultrakrótkich. W warunkach domowych trudno jednak dokładniej ocenić rzeczywisty stan jonosfery i ogólnie naszego otoczenia. Dużą pomocą, oprócz obserwacji sytuacji panującej na pasmach i odbioru komunikatów stacji „DXCluster” są publikowane w literaturze i w internecie prognozy propagacji. Bardziej wyczerpujące z nich zawierają szereg parametrów, których znaczenie warto poznać dokładniej.

Do bardzo często spotykanych prognoz propagacyjnych należy prognoza przedstawiona na ilustracji 8.1. Jest ona dostępna m.in. w internetowej witrynie Świata Radio [B.1] jako jeden ze wzorów udostępnionych do wyboru w witrynie [B.2], w której podano także sposoby wykorzystania ich na własnych stronach (kody źródłowe html).



Rys. 8.1. Popularne w witrynach o tematyce krótkofalarskiej okienko zawierające informacje o bieżących warunkach propagacji i prognozę na najbliższy czas

Z punktu widzenia użytkownika (czytelnika) strony ważniejsze jest jednak należyte zrozumienie znajdujących się tam danych i ich powiązania z warunkami propagacji w wybranych zakresach fal.

Zacznijmy od stosunkowo najbardziej oczywistych danych. W drugim polu od góry zatytułowanym „HF Conditions” („Warunki propagacji KF”) wymienione są cztery grupy pasm krótkofalowych i dla każdej z nich podana jest orientacyjna prognoza warunków propagacji dziennej („Day”) i nocnej („Night”). Prognoza zaznaczona dodatkowo kolorami znanymi z sygnalizacji ulicznej zawiera jedno z trzech określeń: „Poor” („Złe warunki”), „Fair” („Przeciętne”) i „Good” („Dobre”).

W polu trzecim od góry zatytułowanym „VHF Conditions” („Warunki propagacji UKF”) podana jest szerokość geograficzna występowania zorzy polarnej, sam fakt jej wystąpienia, a następnie informacje o występowaniu odbić od warstwy sporadycznej Es w pasmach 2 – 6 m. W przykładzie pochodzącym z połowy kwietnia odbić tych jeszcze brak.

W polach znajdujących się powyżej i poniżej wymienionych wyświetlane są różne parametry liczbowe, których znaczeniu warto poświęcić trochę uwagi.

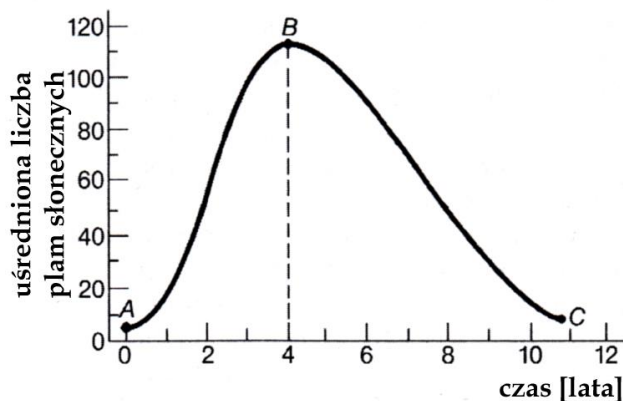
Jak wiadomo z poprzednich odcinków zdolność jonosfery do odbijania fal krótkich zależy od jej naświetlenia przez Słońce, a to ostatnie związane jest nie tylko z tak oczywistymi czynnikami jak pora dnia czy roku ale w istotnym stopniu – z aktywnością słoneczną. Jej widocznym i dającym się łatwo ująć liczbowo objawem są plamy słoneczne. Są one rozmieszczone nieregularnie na powierzchni Słońca, w trakcie zachodzących tam procesów część z nich zanika i pojawiają się nowe, zmianom ulega zarówno położenie ich większych skupisk w stosunku do równika słonecznego jak i ich pozorna długość geograficzna w wyniku obrotu Słońca wokół własnej osi. Niezależnie od tych bieżących fluktuacji ich uśredniona (w krótszym lub dłuższym okresie czasu) liczba ulega cyklicznym zmianom w takt 11-letnich i dłuższych cykli aktywności Słońca.

Początkowo liczba zaobserwowanych plam była wyrażana tzw. liczbą Wolfa obliczaną ze wzoru:

$W = k(f + 10g)$ , gdzie  $f$  oznaczało liczbę zaobserwowanych plam,  $g$  – liczbę ich grup, przy czym pojedyncza plama liczy się również jako grupa, a  $k$  – współczynnik zależny od zdolności rozdzielczej teleskopu używanego do obserwacji. Obecnie jako współczynnik  $k$  przyjmuje się średnio 0,9, a obliczana w ten sposób liczba plam nazywana jest względną liczbą plam słonecznych i jest oznaczana symbolem  $R$  lub  $R_i$ . W prognozach internetowych jest też oznaczana skrótem  $SN$  (ang. *sunspot number*).

W okresie słabych maksimum przyjmuje ona wartości 60 – 70, dla bardzo silnych przekracza 200,

a w trakcie przeciętnych maksimum leży ona pomiędzy 100 a 200. Współczesna numeracja cykli rozpoczyna się od końca tzw. minimum Maundera – od roku 1749 kiedy zakończył się trwający około 70 lat okres zupełnego braku plam słonecznych i ochłodzenia zwanego małą epoką lodowcową. Obecnie znajdujemy się w schyłkowej fazie 24 cyklu rozpoczętego w styczniu 2008 roku i mającego maksimum w lutym 2014 r. Dla R 102 maksimum to zalicza się do słabych. Być może zresztą osiągnęliśmy już początek cyklu 25. Według obecnych prognoz ma to być cykl słaby.



Cykl słoneczny uśredniony od 1749 roku

A - minimum

B - maksimum 112

A - B 4 lata

B - C 6,8 roku

A - C 10,8 roku

Rys. 8.2. Przeciętny przebieg cyklu słonecznego

Większa aktywność Słońca pozwala na (dłuższe) korzystanie z wyższych pasm krótkofalowych, obecnie więc musimy pogodzić się z pogarszającymi się średnio warunkami propagacji w górnej części zakresu KF. Jako początek nowego cyklu przyjęto minimum liczby plam czyli aktywności słonecznej. Względna liczba plam słonecznych w okresie minimum wynosi średnio 5 – 20 chociaż zdarzają się też przypadki zupełnego braku plam.

Drugim, nowszym i bardziej obiektywnym wskaźnikiem aktywności słonecznej jest strumień słoneczny (SF). Słońce jest najsilniejszym z bliskich Ziemi źródeł promieniowania radiowego, a jego natężenie jest powiązane z aktywnością słoneczną i liczbą plam.

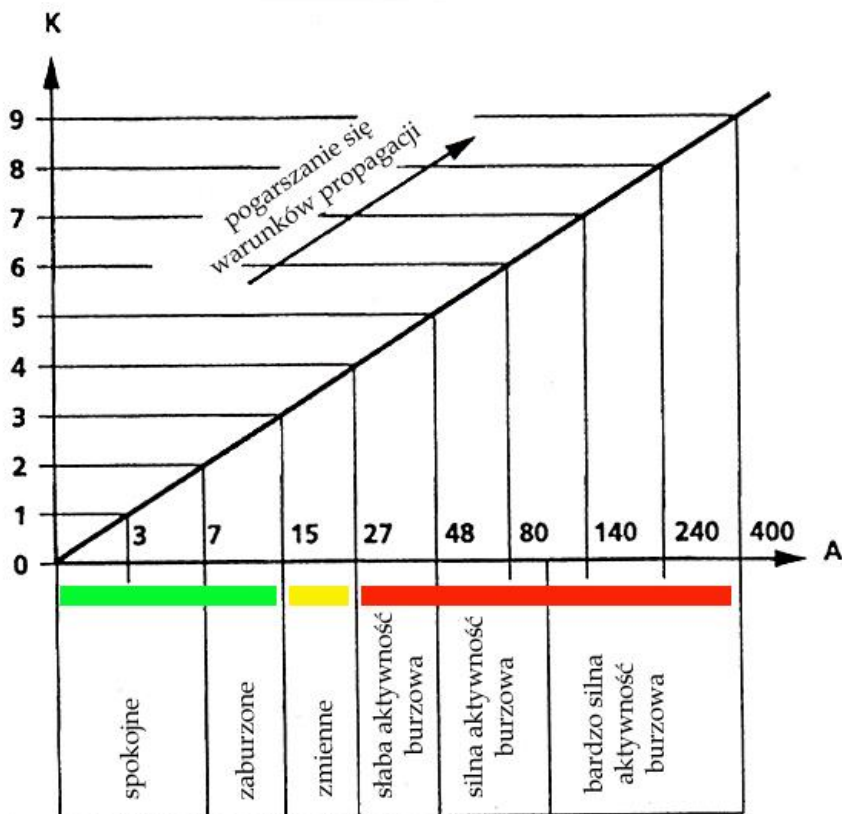
Strumień promieniowania elektromagnetycznego jest standardowo mierzony na częstotliwości 2,8 GHz (na fali 10,7 cm). Jego natężenie wyrażane w jednostkach  $10^{-22}$  W/m<sup>2</sup>/Hz jest powiązane ze względną liczbą plam słonecznych przybliżonym wzorem  $SF = 73,4 + 0,62 R$ . Dokładniejsze wzory można wprowadzić bez trudu znaleźć w literaturze ale nie są one w tym momencie niezbędne. Podany wzór odnosi się do średniej odległości Ziemi od Słońca dlatego też odchyłki wartości zmierzonej mogą dochodzić do 10%. W okresach małej aktywności słonecznej natężenie strumienia wynosi około 70 SF (spotykane jest także oznaczenie SFI), w okresach maksimum przekracza 200, ale już wartości około 100 oznaczają możliwość korzystania z wyższych pasm KF. Jak łatwo zauważyć różnica pomiędzy obydwoimi wartościami wynosi w przybliżeniu 50.

Zasadniczo wystarczyłoby ograniczenie się do pomiarów i publikacji natężenia strumienia słonecznego ale ze względu na zachowanie ciągłości porównań z okresami poprzednimi dokumentowane są zarówno liczba plam jak i natężenie strumienia słonecznego.

Stan jonosfery i jej zdolności do odbijania fal radiowych zależą także od ziemskiego pola magnetycznego. Ziemię otacza stałe pole magnetyczne o natężeniu od 30  $\mu$ T na równiku do 60  $\mu$ T w rejonach podbiegunowych (w Europie środkowej jest to około 48  $\mu$ T, przy czym składowa pozioma ma w przybliżeniu wartość 20  $\mu$ T, a pionowa – 44  $\mu$ T). Pole to nie jest jednak stałe w ścisłym tego słowa znaczeniu ponieważ podlega zmianom chwilowym i okresowym oraz zdarzającym się od czasu do czasu zaburzeniom. Ich główną przyczyną jest docierający do Ziemi strumień cząstek wyrzucanych przez Słońce czyli wiatr słoneczny. Te chwilowe fluktuacje i okresowe zmiany są stosunkowo niewielkie – w okresie spokojnym nie przekraczają ok. 50 nT, a w okresach silnych burz magnetycznych dochodzą do kilkuset nT. Zmienność pola geomagnetycznego opisywana jest za pomocą dwóch powiązanych ze sobą indeksów aktywności: indeksu K i indeksu A. Ich zależności i orientacyjny wpływ na warunki propagacji fal krótkich przedstawia rys. 8.3.

Indeks K jest mierzony za pomocą magnetometrów niezależnie w każdym z obserwatoriów 8 razy na dobę za każdym razem przez trzy godziny. Jego wartość leży w skali logarytmicznej pomiędzy 0 – 9. Wartości poniżej czterech oznaczają pole spokojne, słabo zmienne i zarazem dobre warunki propagacji. Indeksy przekraczające cztery oznaczają słabsze lub silniejsze burze magnetyczne odbijające się negatywnie na warunkach propagacji. Oprócz indeksu K publikowany jest uśredniony w skali światowej

(z wyników pomiarów wszystkich obserwatoriów) indeks Kp. Drugim powiązany z K indeksem jest liniowy indeks A obliczany dobowo na podstawie wszystkich ośmiu wartości K. Jego skala rozciąga się w praktyce od 0 do 400 ale zasadniczo nie jest ograniczona od góry. Analogicznie jak dla K obliczana jest też światowa średnia oznaczana symbolem Ap. Wartości A poniżej 7 oznaczają pole spokojne co odpowiada bardzo dobrym warunkom propagacji, wartości 8 – 15 oznaczają dobre warunki, przy 30 występują zaniki i przerwy w odbiorze, a począwszy od 50 warunki są złe nawet przy silnym natężeniu strumienia słonecznego. Wysokie wartości A sygnalizują także zjawiska specjalne takie jak występowanie zorzy polarnej albo nieoczekiwanych otwarć pasma 1,8 MHz. Wartości indeksów A i K podane są w prognozie z rys. 1 w drugim wierszu poniżej liczby plam słonecznych i dodatkowo tekstowo w czwartym polu od góry (w przykładzie „Geomag Field QUIET”). Poniżej podana jest wartość MUF (w przykładzie ustalona przez obserwatorium w Boulder) – 19,18 MHz.



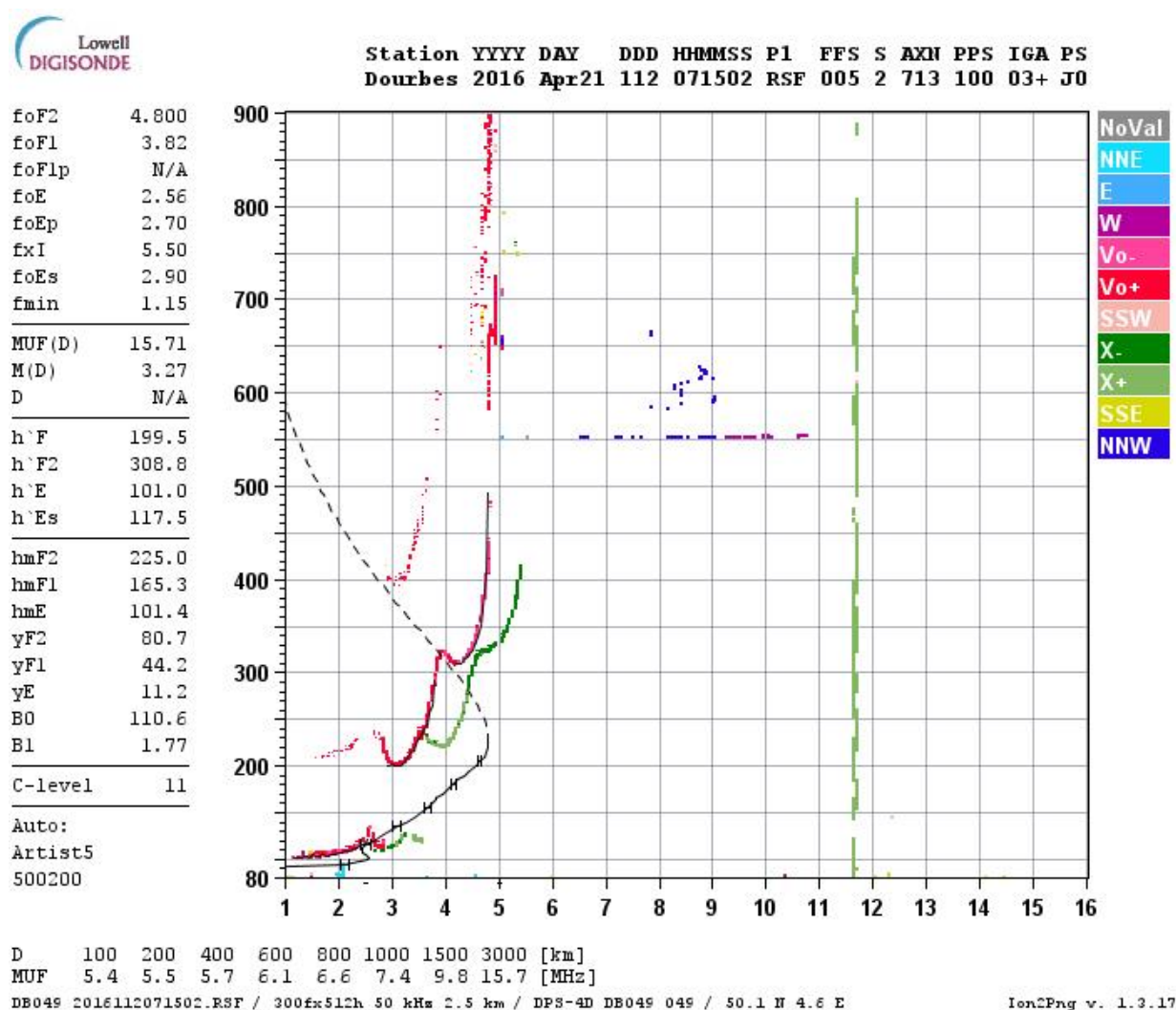
Rys. 8.3. Indeksy aktywności geomagnetycznej A i K oraz ich związek z warunkami propagacji fal krótkich

Aktualne wyniki pomiarów – jonogramy, wartości MUF dla poszczególnych warstw i wiele innych oliczonych na tej podstawie parametrów publikują na bieżąco w internecie stacje sieci „Digisonde”. Ich aktywna mapa ułatwiająca dojście do odpowiednich stron znajduje się w internecie pod adresem [17.3]. Dla użytkowników w Polsce najbardziej interesujące są wyniki pomiarów ośrodków znajdujących się w bliskim sąsiedztwie: stacji w Pruhonicach i Juliusruh, ale również dane pochodzące z innych stacji mogą być pomocne w ocenie warunków propagacji. Przykładowy jonogram pochodzący z belgijskiej stacji Dourbes przedstawia ilustracja 8.4. Jonogramy są mierzone w cyklu 15 minutowym ale strona jest aktualizowana co dwie minuty.

W nagłówku podana jest nazwa stacji (tutaj Dourbes), data (2016 Apr21), dzień roku (112) oraz godzina na UTC (071502), a pozostałe dane dotyczące formatu itp. są mniej potrzebne czytelnikom prognozy. Środkową część ilustracji zajmuje sam jonogram przedstawiający wysokość warstwy odbijającej w funkcji częstotliwości. Stacja sondująca pracuje na zasadzie radaru wysyłając cyklicznie w kierunku jonosfery impulsy o zmieniającej się częstotliwości a wysokość warstwy jest obliczana na podstawie odstępu czasu między impulsem nadanym i odebrany. Jonogram fali nadawanej pionowo jest wykreślony kolorem ciemnoczerwonym (dokładniej rzecz biorąc jest to echo fali zwyczajnej), a pozostałe



kolory oznaczają echa fal nadanych w innych kierunkach zgodnie ze skalą kolorów znajdującą się po prawej stronie jonogramu i echa fali nadzwyczajnej wykreślane w kolorze zielonym. W dolnej lewej części w zakresie do około 2,5 MHz widoczne są echa odbite od warstwy E, a dalej odpowiednio od warstw F1 (do ok. 3,8 MHz) i F2 (do ok. 4,8 MHz). Oprócz ech głównych powyżej widoczne są także nie mające większego znaczenia echa wtórne. Czarna linia o kształcie zbliżonym do paraboli obrazuje obliczoną na podstawie pomiarów gęstość elektronów (stopień jonizacji). W okolicy częstotliwości 2,5 MHz widoczny jest wyraźny uskok przy przejściu z warstwy E do warstw F1 i F2. Jonogram ilustruje wprawdzie już na pierwszy rzut oka stan jonosfery ale w kolumnie po jego lewej stronie podane są wartości liczbowe najważniejszych parametrów. Dla przeciętnego użytkownika istotna jest tylko część z nich. Parametry foF2, foF1 i foE oznaczają częstotliwości krytyczne odpowiednio dla warstw F2, F1 i E. Symbole foF1p i foEp oznaczają wartości prognozowane odpowiednio dla warstw F1 i E o ile możliwe jest sporządzenie prognozy. W miejsce danych niemożliwych do obliczenia w danym momencie podawany jest skrót „N/A”. FxI jest najwyższą częstotliwością odebranych ech.



Rys. 8.4. Jonogram

Poniżej podana jest częstotliwość krytyczna warstwy Es (foEs), i częstotliwość minimalna echa (fmin) a następnie wartość MUF dla maksymalnej odległości D z tabeli widocznej poniżej jonogramu (jeżeli MUF dotyczy innej odległości jest ona podawana poniżej). Współczynnik M jest stosunkiem tej wartości MUF do foF2 ( $M = MUF/foF2$ ). Najwyższy stosunek dla warstwy F2 leży w przedziale 3 – 4. Spis częstotliwości MUF dla różnych odległości podany jest poniżej jonogramu. Na dystansach przekraczających 4000 km łączność możliwa jest tylko poprzez odbicia wielokrotne.



Parametry  $h'F$ ,  $h'F_2$ ,  $h'E$  i  $h'Es$  oznaczają pozorne dolne wysokości warstw, a  $hmF_2$ ,  $hmF_1$  i  $hmE$  – rzeczywiste wysokości ich maksimum jonizacji. Dolny wiersz zawiera m.in. współrzędne stacji (50,1 N 4,6 E), jej symbol (tutaj DB) i typ sprzętu (DPS-4D). Spośród tych wszystkich danych dla krótkofalowców najważniejsze są wartości MUF. Jonogramy nie zawierają indeksów aktywności geomagnetycznej A i K.

Krótkiego wyjaśnienia wymagają pojęcia fali zwyczajnej i nadzwyczajnej. Otóż spolaryzowana liniowo fala radiowa po wejściu do jonosfery ulega rozszczepieniu na dwie fale o polaryzacji kołowej: lewoskrętnej (fala zwyczajna) i prawoskrętnej (fala nadzwyczajna) – na półkuli południowej występuje sytuacja odwrotna. Fala nadzwyczajna jest silniej tłumiona i rozchodzi się z mniejszą prędkością. Po odbiciu i opuszczeniu jonosfery obie fale tworzą falę o przypadkowej polaryzacji. Częstotliwości krytyczne fali zwyczajnej i nadzwyczajnej również różnią się między sobą przy czym dla fali nadzwyczajnej jest ona wyższa.

Komunikaty dotyczące warunków propagacji są nadawane również na falach krótkich. Radiolatarnia DK0WCY nadaje je naprzemian telegrafią, RTTY i PSK31 na częstotliwości 10144 kHz przez całą dobę a w godzinach 7.20 – 9.00 i 16.00 – 19.00 czasu lokalnego także na fali 3579 kHz, ale wyłącznie telegrafią. Ich rozszyfrowanie nie powinno po przeczytaniu obecnego rozdziału sprawić poważniejszych trudności.

Do obserwacji bieżących warunków propagacji służy światowa sieć zsynchronizowanych radiolatarni pracujących w pasmach 20 – 10 m na częstotliwościach 14,100, 18,110, 21,150, 24,930 i 28,200 MHz. Nadają one w cyklach trzyminutowych kolejno na każdej z częstotliwości sygnały o mocach 100 W, 10 W, 1 W i 0,1 W. Szczegóły znajdują się w witrynie [www.ncdx.org](http://www.ncdx.org).

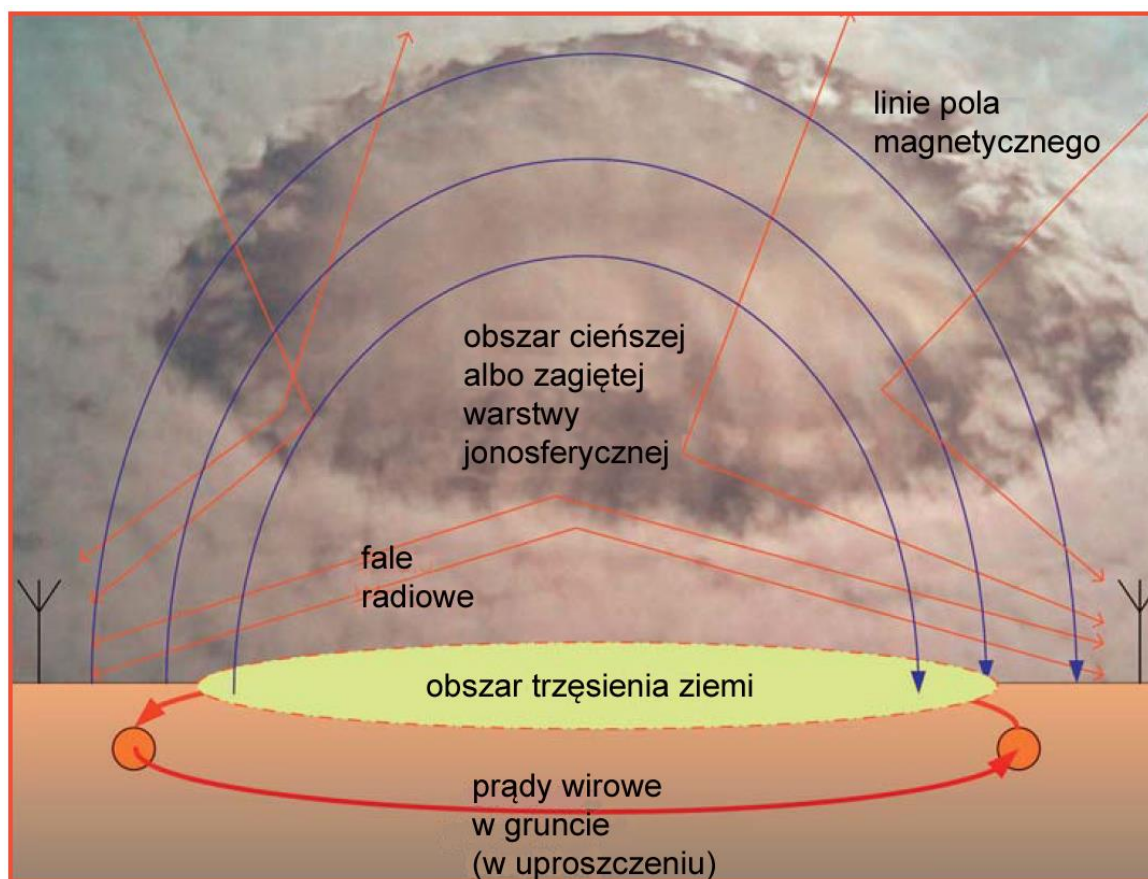
Pomocne są też informacje dotyczące odbioru stacji pracujących emisjami cyfrowymi zawarte w witrynie [www.pskreporter.info](http://www.pskreporter.info), a także informacje z witryny [www.wsprnet.org](http://www.wsprnet.org) pochodzące od stacji pracujących emisją WSPR, albo obserwacje internetowych odbiorników szerokopasmowych wymienionych m.in. w witrynie [www.websdr.org](http://www.websdr.org).

## Dodatek A

### Wykrywanie trzęsień ziemi przez odbiór sygnałów KF

Przeprowadzone w Kanadzie badania siły sygnałów i poziomu szumów obejmowały trzęsienia o sile przekraczającej 6 stopni w ciągu ostatnich 4 lat. Zastosowano w nich odbiornik krótkofalowy o niskiej częstotliwości pośredniej 12 kHz, co umożliwiło dalszą obróbkę i obserwację sygnałów na komputerze. Schemat i dalsze informacje o odbiorniku i stosowanym oprogramowaniu są dostępne pod adresem [D.4].

Leżące u podłoża zjawiska fizyczne zostały szczegółowo opisane w artykule w czasopiśmie „Scientific American” [D.5]. W dużym skrócie rzecz polega na zjawiskach piezoelektrycznych występujących w skałach w trakcie wibracji i ich wzajemnego przesuwania się. Powstające wówczas mikropęknięcia powodują uwalnianie się dużych ilości elektronów przemieszczających się w kierunku wierzchu skały (lub powierzchni mórz). Elektrony te krążą wokół obszaru trzęsienia ziemi. Przepływ prądu jest źródłem fali elektromagnetycznej rozchodzącej się z powierzchni ziemi w kierunku jonosfery. Wskutek oddziaływania pola magnetycznego naładowane cząstki jonosferyczne rozmieszczają się nieregularnie tworząc obszary o ich większej lub mniejszej gęstości. Powoduje to zmiany w propagacji fal elektromagnetycznych odbijanych przez jonosferę (rys. A.1). Pole magnetyczne pochodzące z obszaru trzęsienia powoduje też zmiany położenia warstw odbijających i ich zagięcie w wyniku czego dochodzi do przerwania tras propagacji fal i do występowania zaników.



Rys. A.1. Zasada wpływu trzęsienia ziemi na jonosferę

Na rys. A.2 przedstawiono równoważnik wpływu pól magnetycznych występujący na powierzchni Słońca. Dzięki wybuchom gorącej plazmy wyraźnie widoczne są linie pola magnetycznego. Zjawiska te są oczywiście znacznie silniejsze niż ziemskie ale ich mechanizm fizyczny jest taki sam.

Na ilustracji A.3 widoczne są poszczególne fazy trzęsienia ziemi o sile 5 stopni, obserwowane na sejsmografii radiowym oddalonym o 256 km od epicentrum.

Początkowym zjawiskiem jest gromadzenie się energii zauważalne m.in. jako wzrost poziomu szumów w paśmie 80 m od godz. 00 UTC, krótko po nim obserwujemy kompletne zaniki w pasmach 40, 30 i 20 m. Do trzęsienia ziemi doszło o godz. 4.23 UTC, co zaznaczono na ilustracji za pomocą linii przerywanej. Zwiększona gęstość energii i zaniki trwały po trzęsieniu mniej więcej tyle samo czasu, co przed (po 2 – 3 godziny), cały czas trwania zaburzeń wynosił więc 4 – 6 godzin. Po rozładowaniu się energii rozpoczął się powolny powrót jonosfery i komunikacji radiowej do stanu normalnego. Na wykresach widoczny jest wzrost poziomu sygnałów.



Rys. A.2. Zdjęcie powierzchni Słońca z widocznymi liniami pola magnetycznego nad plamą. Linie pola widoczne są dzięki obecności gorącej plazmy (źródło: TRACE-NASA)

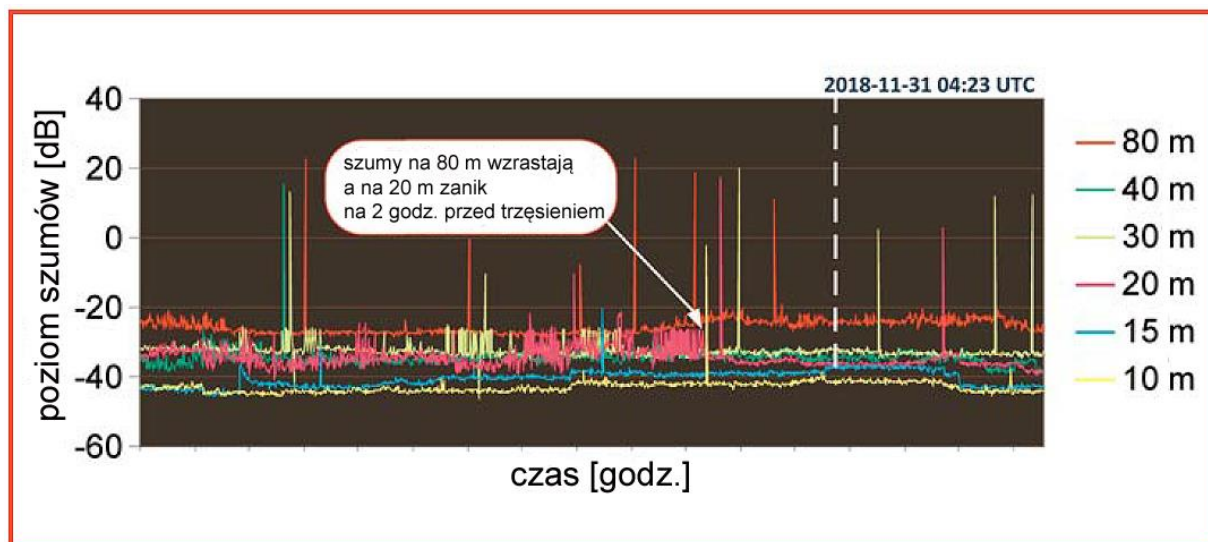
Badania tych zjawisk są trudne ponieważ stacja obserwacyjna musi znajdować się w odległości co najmniej 500 km od epicentrum aby dokonywać pomiarów siły fal odbitych od zaburzonej jonosfery, a nie docierających do niej bezpośrednio. Poza tym fale pochodzące od nadajników znajdujących się zbyt blisko zaburzeń docierają do jonosfery za bardzo pionowo aby mogły zostać odbite.

W opisanych badaniach dzięki zwróceniu uwagi na chaotyczny charakter trzęsień ziemi i związanych z nimi zjawisk skoncentrowano uwagę na występowaniu szerokopasmowych szumów. Dzięki nim możliwa jest obserwacja dowolnie zlokalizowanych trzęsień z jednego miejsca. Źródła szumów mają duże moce rzędu megawatów lub więcej, dzięki czemu szумы są łatwiejsze do wykrycia. Jedyną ważną sprawą pozostaje porównanie czasów ich występowania z czasem trzęsienia.

W trakcie trwania projektu badawczego od sierpnia 2016 roku do początków roku 2019 przeanalizowano 171 trzęsień ziemi o sile przekraczającej 6 stopni (dane pochodziły z amerykańskiego urzędu geologicznego [D.6]). W sumie zarejestrowane zostały dane z 961 dni. Średnio więc do poważniejszych trzęsień dochodziło co 5,6 dnia. Były one źródłem ok. 17,3% występujących szumów, a dodatkowo poważna część pozostałych mogła pochodzić od słabszych trzęsień. Trzęsienia o sile nie przekraczającej 3 stopni występują prawie ciągle i są głównym źródłem szumów odbieranych na pasmach 160 i 80 m. W 122 z przebadanych przypadków (72%) zaobserwowano wzrost poziomu szumów w paśmie 80 m przed lub po trzęsieniu albo i przed i po nim. Ta ostatnia sytuacja zdarza się najczęściej.

Jak wynika z dotychczasowych badań trzęsienia ziemi są poprzedzone zjawiskami elektromagnetycznymi, które mogą być wykorzystane do ich prognozowania i ostrzegania ludności. Jest to oczywiście tylko dodatkowa możliwość do wszystkich pozostałych.

Dobre wprowadzenie w problematykę dla początkujących zawiera dokument [D.7]. Do prowadzenia własnych obserwacji konieczny jest opisany w witrynie [D.4] konwerter z 455 kHz na 12 kHz, dostępne tam oprogramowanie odbiorcze oraz dowolny odbiornik lub radiostacja z ostatnią częstotliwością pośrednią 455 kHz, j.np. FT-817, FT-818, FT-857, IC-718, IC-706 itd. Bieżące wyniki obserwacji można śledzić natomiast w witrynie [D.8]. Sprawa wymaga jeszcze dalszych obszernych badań.



Rys. A.3. Warunki propagacji zarejestrowane sejsmografem radiowym 30 listopada 2018 roku. Wykres obrazuje zaburzenia występujące przed, w trakcie i po trzęsieniu ziemi



## Dodatek B

### Tłumienie wolnej przestrzeni

W literaturze poświęconej antenom i propagacji fal spotykamy się z terminem „tłumienie wolnej przestrzeni”. Wzór stosowany do jego obliczenia nie obejmuje strat energii w środowisku rozchodzenia się fali, w otoczeniu anten i samych antenach ani strat wywołanych przez odbicia od jonosfery czy powierzchni ziemi. Z jakimi zjawiskami mamy więc tutaj do czynienia i skąd biorą się wynikające z niego straty.

Wielkość zwaną potocznie tłumieniem wolnej przestrzeni, oznaczoną poniżej literą  $a$ , oblicza się z, dostosowanych do praktycznego użytku, wzorów:

$$a \text{ [dB]} = 32,44 + 20 \log (f \text{ [MHz]}) + 20 \log (r \text{ [km]}) \quad (\text{B.1})$$

lub

$$a \text{ [dB]} = 92,44 + 20 \log (f \text{ [GHz]}) + 20 \log (r \text{ [km]}) \quad (\text{B.1a})$$

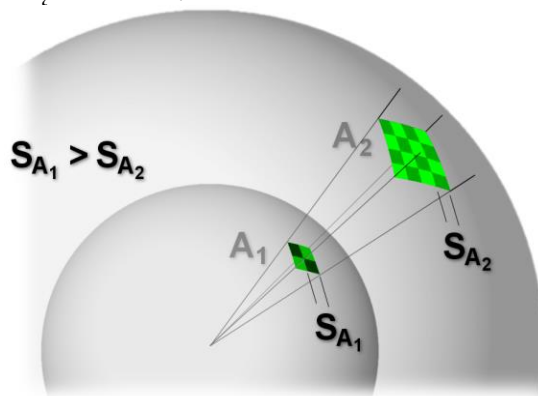
gdzie  $f$  jest częstotliwością fali w podanych w nawiasie kwadratowym jednostkach, a  $r$  – odległością anteny odbiorczej od nadawczej. Dla uproszczenia zrezygnowano z wyprowadzenia tego wzoru.

Wzór obowiązuje dla anten izotropowych (teoretycznych anten o kulistej charakterystyce promieniowania). Jak wynika z niego, nie chodzi tutaj o jakiegokolwiek efekty związane z tłumieniem fali w atmosferze, wpływy wilgoci, przewodności ziemi, strat przy odbiciach od jonosfery, strat w obiektach otaczających anteny, o wpływ rozpraszania lub ugięcia fali, nie uwzględnione są też straty w samych antenach i liniach zasilających itd. Nie występują w nim żadne składowe związane z tego rodzaju zjawiskami i właściwościami fizycznymi jakiegokolwiek obiektów. Wzór obowiązuje ogólnie – a więc nie tylko w pobliżu ziemi, ale również w przestrzeni kosmicznej gdzie straty energii w próżni są minimalne. O ile w przypadku strat nie uwzględnionych we wzorze chodzi o rzeczywiste straty energii polegające na zamianie jej w przeważającej części na ciepło, o tyle obliczana z powyższych wzorów wielkość  $a$  zależy monotonicznie tylko od częstotliwości i odległości anten nadawczej i odbiorczej.

Przykładowo dla fali o częstotliwości 7 MHz przy odległości 500 km otrzymujemy wartość 53,4 dB dodatkowo do tłumienia wnoszonego przez odbicia od jonosfery, które można orientacyjnie przyjąć na ok. 30 dB na skok, co daje prawie trzykrotną różnicę i to wyrażoną w dB.

Przy uwzględnieniu wpływu atmosfery, zawartej w niej pary wodnej itd. otrzymujemy przykładowo dla częstotliwości 10 GHz tłumienie około 0,01 dB/km, co przy odległości 10 km daje tłumienie 0,1 dB, natomiast ze wzoru (1) na tłumienie wolnej przestrzeni otrzymuje się w przybliżeniu 128 dB, co jest różnicą gigantyczną. Porównując wyniki dla dowolnych odległości i częstotliwości otrzymujemy zawsze taką istotną różnicę. Wyobrażając sobie antenę w kształcie kuli otaczającą antenę nadawczą można oczekiwać, że odbierze ona prawie całą wypromieniowaną energię po odjęciu jedynie jej rzeczywistych strat na trasie i to niezależnie od częstotliwości i przy stosunkowo słabym wpływie odległości.

Wyjaśnienie zjawiska wymaga uwzględnienia dwóch czynników. Jednym z nich jest zmniejszanie się gęstości energii na jednostkę powierzchni w funkcji odległości, a drugim wpływ powierzchni skutecznej anteny i jej zależności od częstotliwości.



Rys. B.1. Powierzchnia kwadratu  $A$  wyznaczona przez promień różnie z kwadratem jego odległości od źródła promieniowania. Źródło: Wikipedia



Jeśli wyobrazimy sobie kwadrat o rogach wyznaczonych przez promienie mające swój początek w źródle promieniowania (rys. B.1) – w tym przypadku w antenie – zauważamy, że jego boki rosną proporcjonalnie do odległości od źródła, co oznacza, że jego powierzchnia rośnie z kwadratem tej odległości. Zakładając pomijalne rzeczywiste straty energii na trasie oznacza to, że wypromieniowana energia rozdziela się na coraz to większą powierzchnię czyli jej gęstość (na jednostkę powierzchni) maleje z kwadratem odległości wg wzoru:

$$S = P/A = P/4\pi r^2$$

gdzie  $S$  jest gęstością energii,  $P$  – mocą promieniowaną, a  $r$  – odległością.

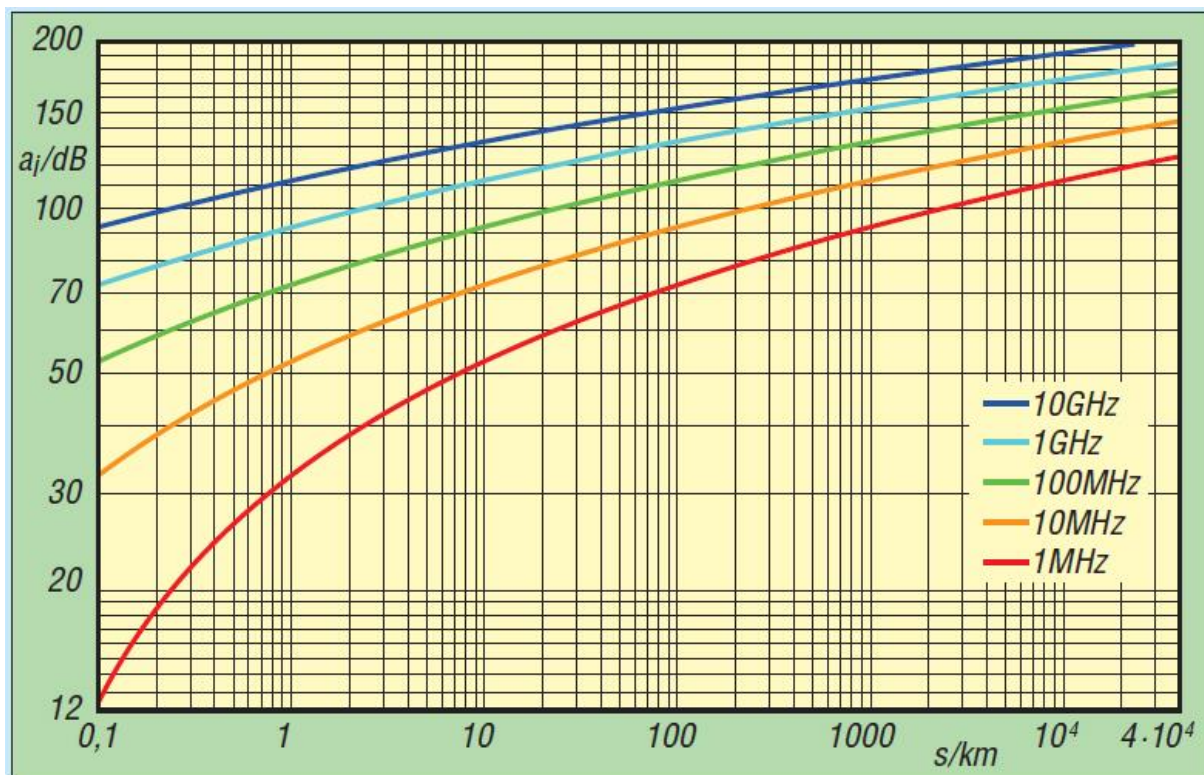
Przy zachowaniu stałych i ograniczonych wymiarów anteny odbiera ona coraz mniejszą część energii w miarę jej oddalania (w myśli) od anteny nadawczej – dla dwukrotnie większej odległości oznacza to spadek natężenia pola o 6 dB. Wyjaśnia to człon  $20 \log(s)$  występujący we wzorze (B.1). Zjawisko to jest niezależne od częstotliwości.

Drugi człon wzoru wiąże się z powierzchnią skuteczną anteny. Oblicza się ją ze wzoru:

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_i$$

gdzie  $\lambda$  jest długością fali, a  $G_i$  – zyskiem w stosunku do anteny izotropowej, dla dipola półfalowego jest to 2,14 dBi (1,637 raza).

Powierzchnia skuteczna anteny jest dla wielu typów anten zależna od częstotliwości i przykładowo dla dipola półfalowego dla fali 2 m wynosi 0,52 m<sup>2</sup>, a dla fali 20 m – 52 m<sup>2</sup>. Wiąże się to oczywiście ze zmianą długości dipola w zależności od częstotliwości rezonansowej. Zmniejszanie się wymiarów anteny w funkcji częstotliwości powoduje, że odbiera ona coraz mniej energii. Wyjaśnia to pochodzenie członu zależnego od częstotliwości:  $20 \log(f_2/f_1)$ , a przy założeniu, że  $f_1 = 1$  MHz lub GHz członu  $20 \log(f_2) = 20 \log(f)$ .



Rys. 2. Wykres zależności ze wzorów (B.1) i (B.1a) dla różnych częstotliwości i odległości do 40000 km. Dla fal krótkich należy dodać tłumienie w wyniku odbić od jonosfery – po około 30 dB na skok fali. Różnica tłumienia pomiędzy poszczególnymi krzywymi wynosi dla każdej częstotliwości 20 dB

Dla pełnego skompensowania wpływu częstotliwości antena musiałaby mieć stałą i niezależną od niej powierzchnię skuteczną, co oznacza rosnący w funkcji częstotliwości zysk antenowy. Przykładem anten

o takich właściwościach są anteny paraboliczne. Ich powierzchnia skuteczna w szerokim zakresie częstotliwości pozostaje niezmienna, a więc ich zysk rośnie w miarę zwiększania częstotliwości pracy. Wpływ powierzchni skutecznej anteny jest z kolei niezależny od odległości między antenami nadawczą i odbiorczą.

Podsumowując należy stwierdzić, że zjawisko zwane tłumieniem wolnej przestrzeni oparte jest na zmniejszaniu się gęstości energii na jednostkę powierzchni co przy niezmiennych i ograniczonych wymiarach anten skutkuje spadkiem napięcia na jej zaciskach i dodatkowo zmniejszaniem się powierzchni skutecznej anten w miarę wzrostu częstotliwości pracy dającym taki sam wynik. Nie jest to więc rzeczywiste tłumienie fali, a jedynie pogorszenie się efektywności wykorzystania promieniowanej energii przez antenę odbiorczą. Efekt ten musi być oczywiście uwzględniony przy obliczaniu bilansu energetycznego trasy połączenia, a przeciwdziała mu się przez zwiększanie zysku antenowego.

Co do terminologii to może lepiej byłoby zamiast o tłumieniu wolnej przestrzeni mówić o stratach na trasie propagacji lub o stratach w wolnej przestrzeni.

Na wyższych częstotliwościach, zwłaszcza mikrofalowych konieczne jest dokładne uwzględnienie tłumienia atmosferycznego, wpływu pary wodnej itp.

## Literatura i adresy internetowe

### Literatura książkowa

- [A.1] „CQDL Spezial. The magic band”, Wydawnictwo DARC, Baunatal 2002
- [A.2] „Fale i anteny”, Jarosław Szostka, WKŁ, wyd. 2, Warszawa 2001
- [A.3] „Funkwellen erfolgreich nutzen”, Sichla/Schiffhauer/Wetzel, wyd. VTH, Baden-Baden 1999
- [A.4] „Ionosphäre und Wellenausbreitung“, Gerd Klawitter, wyd. Siebel Verlag 2000
- [A.5] „Podstawy radiokomunikacji”, Stefan Hahn, WKŁ, Warszawa 1964
- [A.6] „Poradnik ultrakrótkofalowca”, Zdzisław Bieńkowski, WKŁ, Warszawa 1988
- [A.7] „Praxis der Mikrowellenantennen”, Sepp Reithofer, wyd. „UKW-Berichte” 1987
- [A.8] „Propagacja fal radiowych”, Waław Lisicki, WKŁ, Warszawa 1962
- [A.9] „Propagation and radio science”, Eric P. Nichols, KL7AJ, ARRL 2015, ISBN 978-1-62595-027-7
- [A.10] „Radio propagation explained“, Steve Nichols, G0KYA, RSGB 2016
- [A.11] „Rothammels Antennenbuch”, Alois Krischke, DJ0DR, Wydawnictwo DARC, wydanie 13, Baunatal 2013
- [A.12] „Teoria pola elektromagnetycznego”, Romuald Litwin, seria „Podręczniki akademickie – elektronika”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1967.

### Adresy internetowe

- [B.1] [www.swiatradio.com.pl](http://www.swiatradio.com.pl)
- [B.2] [www.hamqsl.com/solar.html](http://www.hamqsl.com/solar.html)
- [B.3] [www.dk5ya.de/iono.htm](http://www.dk5ya.de/iono.htm) – mapa europejskich stacji sieci „Digisonde”
- [B.4] <http://digisonda.ufa.cas.cz/latestFrames.htm> – wyniki pomiarów jonosfery czeskiej stacji w Pruhonicach należącej do sieci „Digisonde”
- [B.5] <http://digisonde.oma.be/latestFrames.htm> – wyniki pomiarów jonosfery belgijskiej stacji Dourbes
- [B.6] <https://www.iap-kborn.de/forschung/abteilung-radarsondierungen/aktuelle-radarmessungen/ionosonde-ionogramm/> – wyniki pomiarów jonosfery niemieckiej stacji w Juliusruh
- [B.7] „Über die Lesbarkeit von Digisonden-Ionogrammen”, Jens Mielich, Leibnitz-Institut für Atmosphärenphysik, 2012
- [B.8] [pk-ukf.org.pl](http://pk-ukf.org.pl) – Polski Klub UKF
- [B.9] [www.mmmmonvhf.de](http://www.mmmmonvhf.de) – strona poświęcona DX-om i warunkom propagacji w pasmach 50 MHz – 24 GHz
- [B.10] [http://www.mmmmonvhf.de/bcn\\_map.php](http://www.mmmmonvhf.de/bcn_map.php) – mapa i spis światowych radiolatarni w pasmach 50 MHz – 24 GHz

### Literatura i adresy internetowe do dodatku A

- [D.1] „Can SW Radio detect earthquakes?”, Alex Schwarz, VE7DXW, RadCom 7/2019, str. 72
- [D.2a] [http://www.3.telus.net/public/bc237/MDSR/Matches-RF-Seismograph and Seismic data for 2017.pdf](http://www.3.telus.net/public/bc237/MDSR/Matches-RF-Seismograph%20and%20Seismic%20data%20for%202017.pdf) i
- [D.2b] <http://www3.telus.net/public/bc237/MDSR/Earthquakes%20visible%20with%20RF-Seismograph%202018.pdf> – wyniki badań
- [D.3] <http://www.earthquakescanada.ca> – kanadyjskie obserwacje trzęsień ziemi
- [D.4] <http://users.skynet.be/myspace/mdsr/index.html> – opis odbiornika i oprogramowanie odbiorcze
- [D.5] „Earthquakes in the Sky”, Scientific American 10/2018, [www.ep.sci.hokudaia.ac.jp/~heki/pdfScientific\\_American\\_Vance2018.pdf](http://www.ep.sci.hokudaia.ac.jp/~heki/pdfScientific_American_Vance2018.pdf) – artykuł o podstawach fizycznych
- [D.6] [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)
- [D.7] <http://www3.telus.net/public/bc237/MDSR/IntroductionRF-SeismographandEarthquakes.pdf> – wstęp dla początkujących
- [D.8] <https://groups.io/g/MDSRadio/topics> – bieżące wyniki obserwacji

Literatura i adresy internetowe do dodatku B

[E.1] „Dämpfung“ der Funkstrecke“, Thomas Schiller, DC7GB, Funkamateureur 1-2012, str. 64  
i Funkamateureur 2-2012, str. 171.

**W serii „Biblioteka polskiego krótkofalowca” dotychczas ukazały się:**

- Nr 1 – „Poradnik D-STAR”, wydanie 1 (2011), 2 (2015) i 3 (2019)
- Nr 2 – „Instrukcja do programu D-RATS”
- Nr 3 – „Technika słabych sygnałów” Tom 1
- Nr 4 – „Technika słabych sygnałów” Tom 2
- Nr 5 – „Łączności cyfrowe na falach krótkich” Tom 1
- Nr 6 – „Łączności cyfrowe na falach krótkich” Tom 2
- Nr 7 – „Packet radio”
- Nr 8 – „APRS i D-PRS”
- Nr 9 – „Poczta elektroniczna na falach krótkich” Tom 1
- Nr 10 – „Poczta elektroniczna na falach krótkich” Tom 2
- Nr 11 – „Słownik niemiecko-polski i angielsko-polski” Tom 1
- Nr 12 – „Radiostacje i odbiorniki z cyfrową obróbką sygnałów” Tom 1
- Nr 13 – „Radiostacje i odbiorniki z cyfrową obróbką sygnałów” Tom 2
- Nr 14 – „Amatorska radioastronomia”
- Nr 15 – „Transmisja danych w systemie D-STAR”
- Nr 16 – „Amatorska radiometeorologia”, wydanie 1 (2013) i 2 (2017)
- Nr 17 – „Radiolatarnie małej mocy”
- Nr 18 – „Łączności na falach długich”
- Nr 19 – „Poradnik Echolinku”
- Nr 20 – „Arduino w krótkofalarstwie” Tom 1
- Nr 21 – „Arduino w krótkofalarstwie” Tom 2
- Nr 22 – „Protokół BGP w Hamnecie”
- Nr 23 – „Technika słabych sygnałów” Tom 3, wydanie 1 (2014), 2 (2016) i 3 (2017)
- Nr 24 – „Raspberry Pi w krótkofalarstwie”
- Nr 25 – „Najpopularniejsze pasma mikrofalowe”, wydanie 1 (2015) i 2 (2019)
- Nr 26 – „Poradnik DMR” wydanie 1 (2015), 2 (2016) i 3 (2019), nr 326 – wydanie skrócone (2016)
- Nr 27 – „Poradnik Hamnetu”
- Nr 28 – „Budujemy Ilera” Tom 1
- Nr 29 – „Budujemy Ilera” Tom 2
- Nr 30 – „Konstrukcje D-Starowe”
- Nr 31 – „Radiostacje i odbiorniki z cyfrową obróbką sygnałów” Tom 3
- Nr 32 – „Anteny łatwe do ukrycia”
- Nr 33 – „Amatorska telemetria”
- Nr 34 – „Poradnik systemu C4FM”, wydanie 1 (2017) i 2 (2019)
- Nr 35 – „Licencja i co dalej” Tom 1
- Nr 36 – „Cyfrowa Obróbka Sygnałów”
- Nr 37 – „Telewizja amatorska”
- Nr 38 – „Technika słabych sygnałów” Tom 4, wydanie 1 (2018) i 2 (2020)
- Nr 39 – „Łączności świetlne”
- Nr 40 – „Radiostacje i odbiorniki z cyfrową obróbką sygnałów” Tom 4
- Nr 41 – „Licencja i co dalej” Tom 2
- Nr 42 – „Miernictwo” Tom 1
- Nr 43 – „Miernictwo” Tom 2
- Nr 44 – „Miernictwo” Tom 3
- Nr 45 – „Testy sprzętu” Tom 1
- Nr 46 – „Testy sprzętu” Tom 2
- Nr 47 – „Licencja i co dalej” Tom 3
- Nr 48 – „Jonosfera i propagacja fal”







