

Rozchodzenie się FAL METROWYCH (UKF) cz. I

Wstęp

PRZESYŁANIE obrazu i towarzyszącego mu dźwięku od nadawczej stacji telewizyjnej do odbiorników odbywa się za pośrednictwem fal elektromagnetycznych.

Antena nadawcza przekształca energię w.cz. dostarczaną przez nadajnik na energię elektromagnetyczną oraz wypromieniowuje ją w przestrzeń. Antena odbiorcza absorbuje fale elektromagnetyczne z przestrzeni i realizuje przemianę energii elektromagnetycznej w siłę elektromotoryczną w.cz.

Zgodnie z uchwalonym w r. 1947 w Atlantic City Regulaminem Radiokomunikacyjnym — zakres fal ultrakrótkich można podzielić na następujące podzakresy:

bardzo wielkie częstotliwości (fale metrowe) 30—300 MHz;
ultra wielkie częstotliwości (fale decymetrowe) 300—3000 MHz
super wielkie częstotliwości (fale centymetrowe) 3000—30 000 MHz;
nadzwyczaj wielkie częstotliwości (fale milimetrowe) 30 000—300 000 MHz.

Dla radiofonii FM i dla telewizji przydzielono następujące zakresy częstotliwości powyżej 30 MHz:

zakres I	41	—	68 MHz,
zakres II	87,5	—	100 MHz,
zakres III	174	—	216 MHz,
zakres IV	470	—	585 MHz,
zakres V	610	—	960 MHz.

W krajach zachodnich zakresy I i III wykorzystuje się dla potrzeb telewizji, a zakres II dla radiofonii FM. Zakresy IV i V są już wykorzystane dla telewizji w USA;

w Europie technika telewizyjna w tym zakresie fal znajduje się w stadium początkowym.

Zasięg bezpośredni fal ultrakrótkich jest nieco większy od zasięgu optycznego. Dzieje się tak dzięki dyfrakcji, czyli uginaniu się fali wzdłuż krzywizny ziemi oraz dzięki refrakcji troposferycznej czyli załamaniu się fali w najniższej warstwie atmosfery ziemskiej — troposferze. Mimo to przyjęło się zasięg bezpośredni odbioru nazywać zasięgiem optycznym.

Ostatnie lata przynoszą bardzo intensywne badania nad pozahoryzontalnym rozchodzeniem się fal ultrakrótkich. Wielką rolę odgrywają także badania nad dalekościową propagacją rozproszonej energii fal ultrakrótkich.

Poniżej omówione będą właściwości rozchodzenia się fal metrowych w różnych warunkach.

1. Rozchodzenie się fal metrowych w wolnej przestrzeni

Powstawanie fal elektromagnetycznych związane jest z przekształcaniem energii w.cz. dochodzącej do anteny na energię pola elektromagnetycznego. Proces ten nazywa się promieniowaniem elektromagnetycznym, a energię elektromagnetyczną wypromieniowaną w jednostce czasu (zwykle przyjmuje się 1 sekundę) — określa się mocą promieniowania.

Gdyby można zbudować antenę idealną jako punktowe źródło promieniowania, wówczas fale elektromagnetyczne rozchodziłyby się równomiernie we wszystkich kie-

runkach w wolnej przestrzeni lub inaczej cała powierzchnia o kształcie kuli otaczająca tę antenę nadawczą byłaby przenikana przez jednakowy strumień mocy promieniowanej. Antena rzeczywista odznacza się jednak zawsze właściwościami kierunkowymi; gros strumienia mocy promieniowanej występuje w jednym lub w kilku wyróżnionych kierunkach. Wobec tego przy jednakowej mocy promieniowanej przez antenę idealną i przez antenę rzeczywistą, strumień tej mocy przechodzący przez pewną część kuli będzie większy dla anteny rzeczywistej.

Oznaczając przez P_n moc promieniowaną przez źródło punktowe znajdujące się w wolnej przestrzeni, określimy strumień mocy promieniowanej, znany jako tzw. wektor Pointinga (rys. 1) w odległości r od źródła, w założeniu, że promieniowana energia elektromagnetyczna rozkłada się równomiernie na powierzchni kuli o promieniu właśnie r :

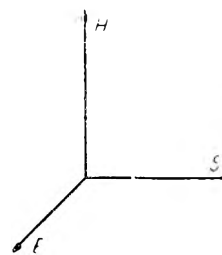
$$S = \frac{P_n}{4\pi r^2} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

Wyrażając natężenie pola elektrycznego w voltach na metr (V/m), a natężenie pola magnetycznego w amperach na metr (A/m) można podać wyrażenie na średnią wartość (za jeden okres zmian fali) strumienia mocy promieniowanej w jednostkach praktycznych:

$$S = E_{sk} \cdot H_{sk} \left(\frac{\text{V} \cdot \text{A}}{\text{m}^2} \right) \quad (2)$$

gdzie:

E_{sk} i H_{sk} — skuteczne wartości



Rys. 1

składowych pola elektromagnetycznego.

W stosowanym układzie jednostek składowe pola elektromagnetycznego są związane z sobą zależnościami:

$$H = \frac{E}{120 \pi} \text{ (A/m)} \quad (3)$$

wobec czego wyrażenie (2) można przedstawić w postaci:

$$S = \frac{E_{sk}^2}{120 \pi} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4)$$

Podstawiając tu wyrażenie (1), otrzymuje się wzór na natężenie pola elektrycznego w wolnej przestrzeni:

$$E_o = \frac{\sqrt{30 P_n}}{r} \text{ (V/m)} \quad (5)$$

W rzeczywistych warunkach znajdują zastosowanie anteny kierunkowe. Stopień kierunkowości określa się tzw. zyskiem energetycznym. Zysk energetyczny, oznaczany przez G , jest to wielkość bezwymiarowa, charakteryzująca stopień koncentracji promieniowania anteny w żądanym kierunku. Antena kierunkowa promieniująca moc P_n posiada takie samo natężenie pola w punkcie odbiorczym, jak antena idealna promieniująca moc $P_n \cdot G$. W ten sposób stosując anteny kierunkowe uzyskuje się G -krotne zwiększenie mocy promieniowania w stosunku do anteny o charakterystyce kołowej promieniowania.

Wówczas wzór (5) przyjmuje postać

$$E_o = \frac{\sqrt{30 P_n \cdot G}}{r} \text{ (V/m)}$$

a jeśli P_n wyrazimy w kW i r w km, to

$$E_o = \frac{173 \sqrt{P_n \cdot G}}{r} \text{ (mV/m)} \quad (6)$$

Widać z tego, że antena idealna jest tylko punktem odniesienia przy określaniu charakterystyki promieniowania bardziej złożonych anten.

Najprostszą praktyczną formą anteny jest dipol elektryczny w kształcie prostego przewodu, krótkiego

w porównaniu do długości fali, albo dipol magnetyczny w kształcie pętli przewodzącej o małym promieniu w porównaniu do długości fali.

Jeśli przyjmiemy, że antena nadawcza w postaci tzw. dipola Hertza o zysku energetycznym $G = 1,5$ znajduje się w wolnej przestrzeni, wówczas natężenie pola promieniowanych fal elektromagnetycznych wyrazi się zależnością:

$$E_o = \frac{212 \sqrt{P_n}}{r} \text{ (mV/m)}$$

Jeśli zaś anteną nadawczą będzie dipol $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ o zysku energetycznym 1,64 umieszczony w wolnej przestrzeni, wówczas natężenie pola elektromagnetycznego w odległości r od anteny wyrazi się zależnością:

$$E_o = \frac{222 \sqrt{P_n}}{r} \text{ (mV/m)}$$

Z powyższych zależności wynika, że natężenie pola elektrycznego jest wprost proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego z mocy promieniowanej, a odwrotnie proporcjonalne do odległości.

W praktyce mierzy się natężenie pola elektromagnetycznego promieniowanego przez antenę raczej za pomocą pola elektrycznego E w (V/m) niż za pomocą gęstości mocy S w (W/m²).

2. Rozchodzenie się fal metrowych nad ziemią

Obecność ziemi zmienia nieco rozchodzenie się fal elektromagnetycznych, tak że zarówno charakterystyka promieniowania anteny nadawczej, jak i wielkość natężenia pola w punkcie odbiorczym są inne niż to ma miejsce w wolnej przestrzeni. Powierzchnia ziemi

działa częściowo jako reflektor, a częściowo jako pochłaniacz energii. Obie te właściwości decydują o danym rozkładzie pola nad powierzchnią ziemi. Poniżej omówimy dwa przypadki, a mianowicie: propagację fal nad płaską powierzchnią ziemi oraz propagację fal nad kulistą powierzchnią ziemi.

2.1. Rozchodzenie się fal metrowych nad płaską powierzchnią ziemi

Przyjmijmy, że fale elektromagnetyczne są promieniowane przez antenę nadawczą zawieszoną na wysokości h_1 nad płaską powierzchnią ziemi w kierunku anteny odbiorczej znajdującej się na wysokości h_2 . Biegają one z reguły dwiema drogami, a mianowicie: bezpośrednią r_1 i pośrednią r_2 (rys. 2). Promień fali odbitej od powierzchni ziemi jest niejako promieniowany przez źródło urojone znajdujące się w punkcie lustrzanym odbicia anteny nadawczej, przebiega drogę r_2 dłuższą o Δr od drogi r_1 i przez to doznaje opóźnienia fazy o kąt

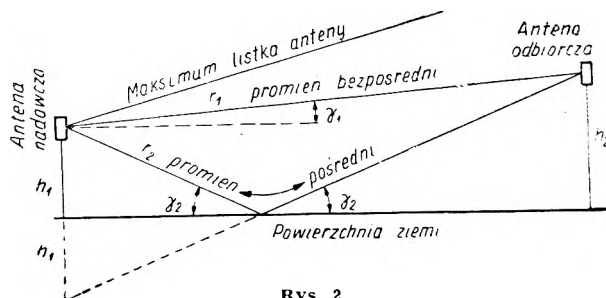
$$\alpha = \Theta + \frac{2\pi \Delta r}{\lambda \cdot d} = \Theta + \frac{4\pi h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot d}$$

Wypadkowe natężenie pola elektrycznego występujące w punkcie odbiorczym jest więc sumą obu pól.

Pole elektryczne wytworzone przez promień fali biegnącej wzdłuż drogi bezpośredniej r_1 wyraża się zależnością:

$$E_1 = E_o \frac{d}{r_1} e^{-jkr_1} = \frac{173 \sqrt{P_n \cdot G}}{r_1} \cdot \frac{d}{r_1} e^{-jkr_1} \text{ (mV/m)} \quad (7)$$

gdzie $k = \frac{2}{\pi}$ oraz $j = \sqrt{-1}$



Rys. 2

Natomiast pole elektryczne wytworzone przez promień fali biegnącej wzdłuż drogi pośredniej r_2 jest osłabione o $(1 - \rho)$ i opóźnione w fazie o kąt Θ i wyraża się zależnością:

$$E_2 = E_0 \frac{d}{r_2} \cdot \rho \cdot e^{-j(kr_2 + \Theta)} = \frac{173 \sqrt{P_n \cdot G}}{r_2} \cdot \frac{d}{r_2} \cdot e^{-j(kr_2 + \Theta)} \text{ (mV/m)} \quad (8)$$

gdzie:

ρ — współczynnik odbicia zależny od kąta nachylenia γ_2 fali pośredniej, od polaryzacji fali, stopnia nierównomierności powierzchni ziemi i jej właściwości elektrycznych,

Θ — opóźnienie fazy promienia fali odbitej zależnie od kąta nachylenia γ_2 , właściwości elektrycznych powierzchni ziemi, polaryzacji fali i wysokości zawieszenia obu anten. Wartości obu tych współczynników podają wykresy na rys. 3.

Po dokonaniu szeregu przekształceń matematycznych i poczynieniu pewnych uproszczeń, otrzymujemy dla prostego dipola magnetycznego spolaryzowanego poziomo lub prostego dipola elektrycznego spolaryzowanego pionowo następujące wyrażenie na natężenie pola:

$$E = E_0 \left(2 \sin \frac{2\pi h'_1 \cdot h'_2}{\lambda \cdot d} \right) = \frac{346 \sqrt{P_n \cdot G}}{r} \sin \frac{2\pi h'_1 \cdot h'_2}{\lambda \cdot d} \text{ (mV/m)} \quad (9)$$

gdzie:

$$h'_{1,2} = h_{1,2} + h_0;$$

$h_{1,2}$ — rzeczywiste wysokości anten, odpowiednio nadawczej i odbiorczej;

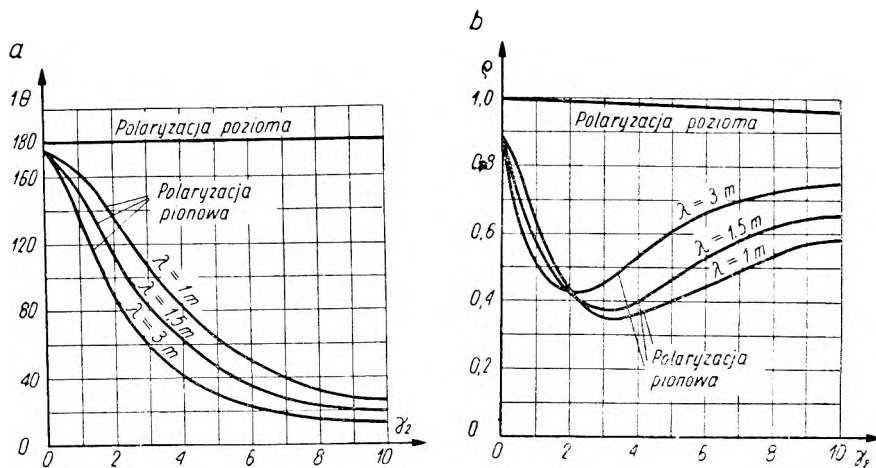
h_0 — zredukowana wysokość anten, której wartości są przedstawione na rys. 4;

d — odległość między antenami.

(Jako grunt dobry uważa się grunt gliniasty, łąkowy, bagieny itp., jako grunt zły — grunt skalisty, piaszczysty itp.).

Należy jeszcze przedstawić wzór na moc odbieraną, która także zależy od współczynnika odbicia fali od ziemi. Moc odbierana przez antenę odbiorczą wyraża się zależnością:

$$P_n = \frac{P_n \cdot G_n \cdot \lambda^2}{(4\pi r^2)} F^2 \quad (10)$$



Rys. 3

gdzie

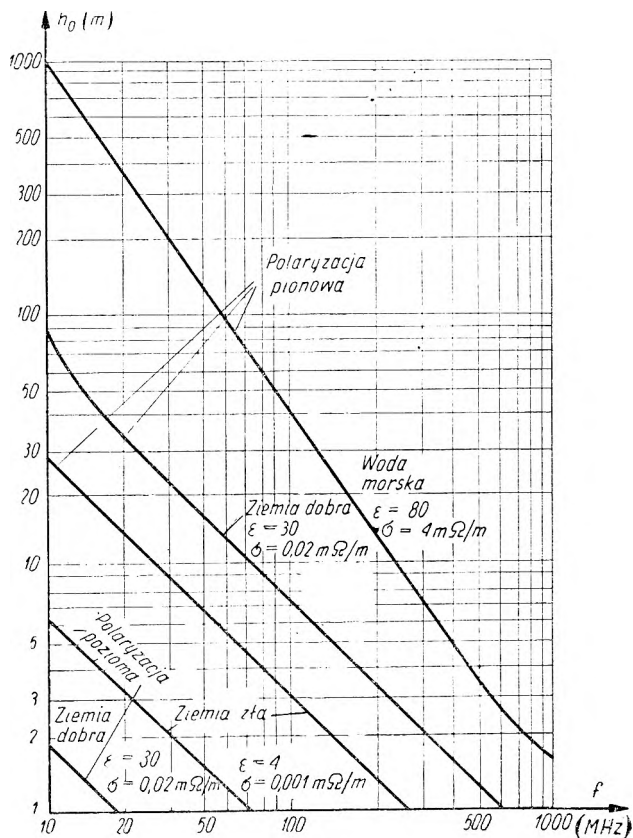
$F = \sqrt{1 + \epsilon^2 + 2\epsilon \cdot \cos \gamma_2}$ — jest to tzw. współczynnik propagacji.

2.2. Rozchodzenie się fal nad kulistą powierzchnią ziemi

Kulisty kształt powierzchni ziemi wywiera trojaki wpływ na roz-

— odbiciu promienia fali od kulistej powierzchni ziemi towarzyszy większe osłabienie pola niż w przypadku odbicia fali od płaskiej powierzchni ziemi;

— występuje pozorne zmniejszenie wysokości anten, zarówno nadawczej h_1 , jak i odbiorczej h_2



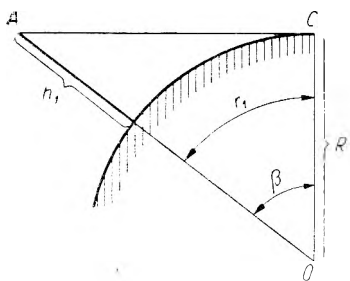
Rys. 4

chodzenie się fal metrowych w zasięgu optycznym, a mianowicie:

— wypukłość ziemi ogranicza zasięg bezpośredni stacji nadawczej;

— nad płaszczyznę styczną do powierzchni ziemi.

Zasięg optyczny możemy określić na podstawie rys. 5 z trójkątą OAC:



Rys. 5

$$\cos \beta = \frac{R}{R + h_1};$$

$$\sin \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R + h_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{2Rh_1 + h_1^2}}{R + h_1}$$

Normalnie kąt β jest bardzo mały, ponieważ wysokość anteny $h_1 \leq R$. Wobec tego można przyjmując $\sin \beta \cong \beta$ i pominąć h_1^2 . Dzięki temu wzór na kąt β przyjmie postać:

$$\beta = \frac{2Rh_1}{R} \quad (11)$$

Z drugiej strony kąt β jest równy stosunkowi łuku do promienia

$$\beta = \frac{d_1}{R} \quad (12)$$

Z porównania obu tych wyrażeń otrzymujemy wzór na zasięg optyczny:

$$d_1 = \sqrt{2Rh_1} \quad (13)$$

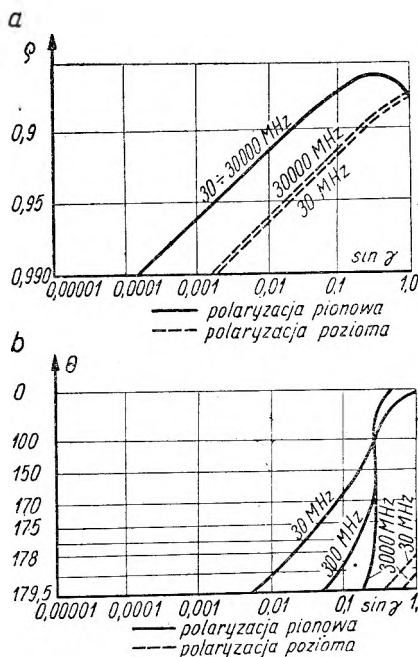
Podstawiając wartość promienia ziemi $R = 6,37 \cdot 10^6$ m i wyrażając d_1 w km, a h_1 w m, otrzymamy praktyczny wzór na odległość horyzontalną, tzn. gdy jedna z anten (z reguły jest to antena nadawcza) jest umieszczona na pewnej wysokości, a druga na poziomie ziemi:

$$d_1 = 3,57 \sqrt{h_1} \cdot 10^6 \text{ (m)} \quad (14)$$

W przypadku, gdy obie anteny umieszczone są na pewnej wysokości, całkowity zasięg optyczny jest równy sumie zasięgów poszczególnych anten:

$$d_o = d_1 + d_2 = 3,57 \cdot 10^6 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ (m)} \quad (15)$$

Nie przeprowadzając już przekształceń matematycznych, przyjmujemy wprost, że natężenie pola

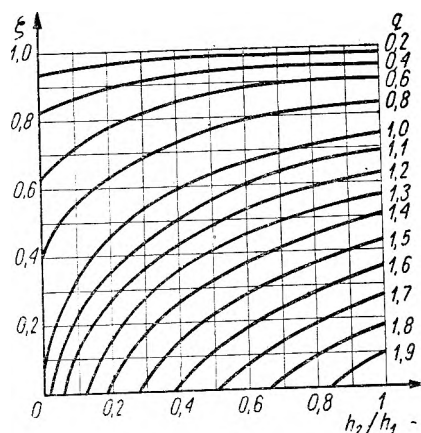


Rys. 6

elektrycznego fali rozchodzącej się nad kulistą powierzchnią ziemi wynosi:

$$E = \frac{173 \sqrt{\rho_n \cdot G}}{d}$$

$$\sqrt{1 + \rho^2 D^2 + 2\rho D \cos\left(\Theta + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r\right)} \text{ (mV/m)} \quad (16)$$



Rys. 7

gdzie:

D jest współczynnikiem rozbieżności i wynosi

$$D = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2h_1 \cdot h_2}{R^2}}}$$

Współczynnik odbicia q i kąt przesunięcia fazy Θ w tym przypadku określamy z wykresów podanych na rys. 6a i 6b dla danego rodzaju gruntu oraz dla danej polaryzacji. Należy uwzględnić skorygowaną wartość kąta nachylenia γ_2 będącego argumentem funkcji q i Θ . Kąt nachylenia γ_2 możemy obliczyć z zależności:

$$\gamma_2 = \frac{h_1 + h_2}{d} \cdot \xi \quad (17)$$

gdzie:

ξ — współczynnik korekcyjny.

Wartość współczynnika korekcyjnego ξ znajdujemy z wykresu na rys. 7 w funkcji stosunku $\frac{h_2}{h_1}$ dla różnych wartości parametru

$$q = \frac{d}{\sqrt{Rh_1}}$$

dcn.

Rozchodzenie się

FAL METROWYCH (UKF) cz. II

WODLEGŁOŚCIACH niewiele przewyższających zasięg optyczny, fale powierzchniowe dzięki zjawisku dyfrakcji, czyli uginaniu się fal wzdłuż powierzchni ziemi, mogą wytwarzać pole niekiedy jeszcze użyteczne dla odbioru. Zjawisko dyfrakcji jest tym słabsze, im fala jest krótsza. Natężenie pola w obszarze pozahoryzontalnym ma więc większą wartość w zakresie I niż w zakresie III.

W odległościach znacznie przewyższających zasięg optyczny występują dwa nowe rodzaje propagacji: troposferyczna i jonosferyczna.

Propagacja troposferyczna występuje w szerokim pasmie częstotliwości i w zasięgu nie przewyższającym zwykle kilkuset (500–600) kilometrów.

Propagację jonosferyczną cechuje znacznie węższy zakres częstotliwości (występuje sporadycznie na częstotliwościach rzędu 70–80 MHz). Fale te rozchodzą się na odległości rzędu 600–2000 km. Na małych odległościach, rzędu setek kilometrów, propagacja jonosferyczna zwykle nie występuje. Rozróżnia się dwa przypadki propagacji jonosferycznej: normalna przy wysokiej aktywności słonecznej i propagacja przez rozproszenie.

Troposfera odgrywa przeważnie większą rolę niż jonosfera w propagacji dalekosiężnej fal metrowych, gdyż tą drogą uzyskuje się większe natężenie pola.

Pole w zasięgu pozahoryzontalnym ma w większości przypadków znaczenie raczej zakłócające niż użyteczne. W strefie zasięgu pozahoryzontalnego natężenie pola jest małe i zmienne; nie jest też zachowany

pożądany stosunek sygnału do zakłóceń, który powinien wynosić co najmniej 45 dB.

Przy obecnie stosowanych mocach i antenach — ze względu na wielkość natężenia pola oraz poziom zakłóceń — bierze się jeszcze pod uwagę natężenie pola w odległości do 700–800 km od nadajnika.

Refrakcja w troposferze

Teoria refrakcji fal pozwala obliczyć natężenie pola w obszarze pozahoryzontalnym. Natężenie pola poza horyzontem maleje według funkcji wykładniczej i to tym bardziej, im krótsza jest długość fali.

Przy normalnym ciśnieniu atmosfery ($p = 1015$ milibarów), temperaturze 18°C i względnej wilgotności 70%, stała dielektryczna powietrza wynosi $E = 1,000678$. Ponieważ ciśnienie, temperatura i wilgotność powietrza maleją wraz ze wzrostem wysokości, przeto stała dielektryczna dąży do jedności.

Zmniejszanie się stałej dielektrycznej ze wzrostem wysokości powoduje zmiany toru fali, gdyż prędkość rozchodzenia się fali jest odwrotnie proporcjonalna do współczynnika załamania ośrodka, którego wartość zależy od stałej dielektrycznej powietrza. Wskutek tego fale elektromagnetyczne rozchodzą się znacznie szybciej w górnych warstwach atmosfery, co powoduje zakrzywienie toru fali ku ziemi i wzrost zasięgu.

Istnieją w troposferze pewne przeciętne, najczęściej występujące warunki; pozwalają one zdefiniować tzw. troposferę standardową, w której temperatura maleje z wysokością o $6,5^\circ\text{C}$ na kilometr, poczy-

nając od 15°C na poziomie morza; ciśnienie suchego powietrza na poziomie morza wynosi 1013 mb (760 mm Hg); ciśnienie pary wodnej 10 mb i maleje o 3,3 mb na kilometr. Współczynnik załamania fali n w atmosferze uzależniony od wyżej wymienionych czynników, wyraża się następująco:

$$(n - 1) \cdot 10^6 = \frac{79}{T} \left(p - e + \frac{4800 e}{T} \right)$$

gdzie:

T — temperatura bezwzględna w $^\circ\text{K}$, p — ciśnienie powietrza w mb (milibarach), e — ciśnienie pary wodnej w mb.

Względna krzywiznę toru promienia fali $\frac{1}{\rho}$ w stosunku do krzy-

wizny ziemi $\frac{1}{R}$ określamy jako różnicę krzywizn toru i łuku wielkiego koła ziemi:

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R} = -\frac{n}{n} - \frac{1}{R} = -\frac{1}{kR}$$

gdzie:

ρ — promień toru fali, $R = 6,36 \cdot 10^6$,
 m — promień ziemi,

$$k = \frac{1}{1 + R \frac{\Delta n}{\Delta h}} \quad \text{— współczynnik}$$

zmiany toru promienia fali,

$\frac{\Delta n}{\Delta h}$ — współczynnik zmiany toru fali na jednostkę wysokości.

W troposferze standardowej współczynnik zmiany toru promienia fa-

li wynosi $k = \frac{4}{3}$, a współczynnik zmiany toru fali na jednostkę wysokości jest stały i równa się

$$\frac{\Delta n}{\Delta h} = -\frac{1}{4R} = -0,039 \cdot 10^{-6}.$$

W danym przypadku tory promieni fali są kołami o promieniu:

$$\rho = \frac{kR}{k-1} = 4R$$

Takie zakrzywienie toru promienia fali nazywa się refrakcją standardową (rys. 8) a absolutny współczynnik refrakcji wynosi $n = 1.000338$.

W danym przypadku występuje wzrost zasięgu stacji o 15% w stosunku do zasięgu optycznego.

Zasięg stacji w przypadku troposfery standardowej wyraża się podobnie jak w przypadku kulistej powierzchni ziemi:

$$d = \sqrt{2kR} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

gdzie:

kR — zmodyfikowany promień ziemi.

Wyrażając poszczególne wysokości anten h_1 i h_2 w metrach, a R w kilometrach, otrzymamy dla troposfery standardowej zasięg stacji:

$$d_0 = 4,12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ (km)}$$

Jeśli refrakcja jest większa niż standardowa, jak to bywa, gdy

$k > \frac{4}{3}$ i $n > 1,000338$, to fala zagi-

na się bardziej ku ziemi i zasięg nadajnika wzrasta powyżej 20%; taka refrakcja nazywa się dodatnią. Jeśli natomiast refrakcja jest mniejsza niż standardowa, jak to bywa,

gdy $k < \frac{4}{3}$ i $n < 1,000338$, to tor

promienia fali zagina się mniej niż w przypadku refrakcji standardowej i promień fali biegnie bardziej prosto liniowo lub lekko zagina się ku górze. Taka refrakcja nazywa się ujemną.

Refrakcja ujemna jest oczywiście zjawiskiem niekorzystnym, gdyż zmniejsza zasięg stacji. Zdarzają się przypadki, kiedy refrakcja ujemna skraca zasięg stacji do 40% w stosunku do zasięgu występującego przy refrakcji standardowej. Istnieje ona głównie wtedy, gdy wilgotność powietrza wzrasta ze wzrostem wysokości lub gdy temperatura szybko obniża się ze wzrostem wysokości. Warunki takie występują przy przechodzeniu mas chłodnego powietrza z brzegu lądu nad bardziej ciepłe morze.

Ogólnie należy stwierdzić, że stopień zakrzywienia toru promienia fali jest różny w różnych warun-

kach meteorologicznych. Zdarzają się przypadki zwiększenia zasięgu nawet do bardzo dużych odległości.

Dukty troposferyczne

Niejednokrotnie stwierdza się występowanie sygnałów nadawanych na falach metrowych w odległościach znacznie przekraczających zasięg radiowy, przy czym natężenie pola tych sygnałów wielokrotnie przewyższa znikome natężenie pola, jakie normalnie istnieje w tych miejscach. Początkowo uważano tego rodzaju propagację za zupełnie „anormalną”, występującą sporadycznie. Zjawisko to tłumaczono refrakcją troposferyczną występującą w szczególnych warunkach meteorologicznych, znacznie odbiegających od troposfery standardowej.

W wyniku wielu badań stwierdzono powstawanie w troposferze pewnego rodzaju kanałów przewodzących fale. Nazwano je duktami troposferycznymi.

Współczynnik załamania fali

$$M = \left(n - 1 + \frac{h}{R} \right) 10^6 \text{ zmienia się z}$$

wysokością, a zmiana ta uwarunkowana jest zmiennością ciśnienia atmosferycznego, temperatury i wilgotności. Jednak głównym czynnikiem wpływającym na kształt krzywej $M = f(h)$ jest rozkład pionowy temperatury i wilgotności, przy czym wpływ zmian wilgotności przeważa. W warunkach normalnych ($n = 1$)

maleje liniowo z wysokością, a $\left(\frac{h}{R} \right)$

liniowo wzrasta, dając liniowy wzrost M . Warstwa inwersji M powstaje wtedy, gdy na pewnym odcinku wysokości zmniejszenie $n - 1$ będzie

szczególnie szybkie, wówczas $\frac{\Delta M}{\Delta h}$

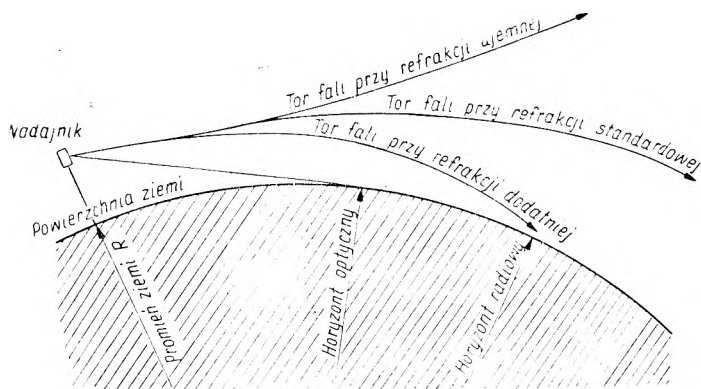
może okazać się ujemne i wtedy powstaje tzw. warstwa inwersji. Powstanie warstwy inwersyjnej bardzo silnie wpływa na rozchodzenie się fal i często wywołuje zjawisko superrefrakcji. Polega ono na tym, że przy szybkim zmniejszaniu się M ugięcie promieni w warstwie inwersyjnej jest tak duże, że promień falowy odbijając się od pewnego poziomu w troposferze trafia na ziemię, odbija się od niej i znów po odbiciu w troposferze dochodzi do ziemi. Powstaje dukt z falą wieloskokową.

W troposferze standardowej temperatura i wilgotność maleją wolno z wysokością. W pewnych warunkach temperatura może jednak wzrastać z wysokością. Wówczas powstaje warstwa inwersji temperatury, która przy pewnych wartościach tej temperatury może wywołać zjawisko superrefrakcji. Jeżeli przy tym zmienność wilgotności jest normalna, tworzy się dukt suchy.

Szybkie obniżanie się wilgotności z wysokością łatwiej prowadzi do duktu niż inwersja temperatury, szczególnie gdy ma to miejsce w powietrzu ciepłym. Inwersja temperatury ułatwia spadek wilgotności, ale jeżeli ten spadek wilgotności powstaje bez udziału inwersji temperatury, tworzy się dukt wilgotny.

Głównymi czynnikami pociągającymi za sobą powstawanie inwersyjnej warstwy temperatury i spadku wilgotności są: poziome przesuwanie się mas powietrza, wolne pionowe osiadanie powietrza na dużym obszarze i nocne oziębianie się ziemi. Gdy suche i ciepłe powietrze napływa nad zimną i wilgotną powierzchnię ziemi lub morza, to najniższa warstwa oziębia się przez kontakt z ziemią, która silnie paruje, a w

Dok. na str. 312



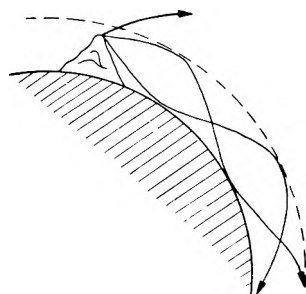
Rys. 8

Rozchodzenie się fal metrowych (UKF)

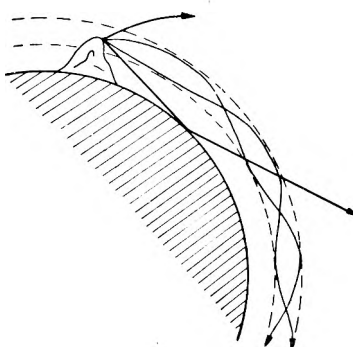
konsekwencji powstaje inwersja temperatury i spadek wilgotności. Wysokość tworzącego się wówczas

gdy występuje przemieszczanie się w dół mas powietrza połączone z równoczesnym poziomym przesu-

duktu przyziemnego zależy od stopnia turbulencji czyli bezładności przesuwających się mas powietrza (rys. 9).



Rys. 9



Rys. 10

Osiadanie powietrza może uformować oba rodzaje duktów — przyziemny i wzniesiony. Dukt wzniesiony (rys. 10) tworzy się najczęściej waniem się mas powietrza w wyższych warstwach troposfery.

Wszystkie te anomalie w rozchodzeniu się fal związane z superrefrakcją, powodują w praktyce powiększenie zasięgów, które niejednokrotnie przekraczają nawet 2000 km.

d. c. n.

Inż. S. Wągródzki

Rozchodzenie się FAL METROWYCH (UKF) cz. III

Dalekosiężna propagacja fal metrowych

W TRZECIM kolejnym artykule o rozchodzeniu się fal metrowych zapoznamy się z propagacją dalekosiężną.

Badania ostatnich lat wykazały, że istnienie dość znacznego natężenia pola w dużej odległości od nadajnika zawdzięczamy czterem zjawiskom występującym w troposferze i w jonosferze. Są to:

— rozproszenie fal metrowych w miejscach niejednorodności troposfery,

— częściowe odbicia się fal metrowych od niejednorodności warstwowych, tzw. ciągle rozpraszanie fal,

— rozproszenie fal metrowych od niejednorodności warstw jonosfery,

— odbicia fal metrowych od zjonizowanych obszarów wytworzonych przez meteory.

Zapoznajmy się z tymi zjawiskami i z ich wpływem na dalekosiężne rozchodzenie się fal metrowych.

Propagacja troposferyczna na falach rozproszonych

Zjawisko rozproszenia fal metrowych w troposferze można tłumaczyć odbiciem spowodowanym przez wiele drobnych nieciągłości współczynnika załamania. Z samej istoty zjawiska wynika, że stosunkowo drobne ułamki energii fali wypromieniowanej docierają na większe odległości. Przy stosowaniu stosunkowo dużych mocy nadajników i zysków anten zasięg fal metrowych może przekroczyć kilkaset kilometrów, a w sprzyjających warunkach dochodzić może nawet do 1000 km. Zasięg użyteczny maleje wyraźnie ze wzrostem częstotliwości.

Natężenie pola fal rozproszonych podlega dość silnym zanikom. Różni się dwa rodzaje zaników: szybkie i powolne. Zaniki szybkie są spowodowane przebiegiem fal wieloma jednocześnie drogami.

Prędkość ich wzrasta z odległością i z częstotliwością. Zaniki powolne wywołane są powolnymi zmianami współczynnika załamania troposfery. Głębokość zaników powolnych może dochodzić do 40 dB.

Wpływ jonosfery

W zakresie fal metrowych przejawia się dwójaki wpływ jonosfery na propagację fal, a mianowicie: — normalna refrakcja występująca w tym zakresie fal przy szczególnie dużej gęstości elektronowej jonosfery, — rozpraszanie i odbicie fal przez jonosferę.

W latach dużej aktywności słonecznej maksymalne częstotliwości użyteczne, do odległości rzędu 2—3 tysięcy kilometrów, osiągają w niektórych porach roku i doby (w szczególności w zimie w godzinach popołudniowych) wartości rzędu 40—50 MHz. Maksymalna częstotliwość użyteczna odpowiada współczynnikowi prawdopodobieństwa przenikania fali równemu 50%. Z mniejszym prawdopodobieństwem mogą przechodzić jeszcze większe częstotliwości, rzędu 60 MHz. Refrakcja fal w warstwach sporadycznych występuje niekiedy jeszcze przy częstotliwościach 70—80 MHz.

Drugi sposób rozchodzenia się fal metrowych za pośrednictwem jonosfery stanowi rozpraszanie. Propagacja fal rozproszonych w jonosferze charakteryzuje się znacznie większym zasięgiem niż to ma miejsce na falach rozproszonych w troposferze. Użyteczne pasmo częstotliwości propagacji jonosferycznej jest ograniczone mniej więcej do zakresu 35÷60 MHz.

W jonosferze występują cztery podstawowe warstwy zjonizowane: warstwa E, warstwa F1, warstwa F2 — znajdujące się na wysokościach odpowiednio 100, 200 i 300 km oraz warstwa D, która jest najmniej zjonizowana i występuje na wysokości 70 km. Warstwy te są wywołane przez promienie słoneczne i wskutek tego gęstość elektronowo-jonowa poszczególnych warstw ulega ciągłym zmianom, a częstotliwości tzw. krytyczne, które ulegają refrakcji od poszczególnych warstw zjonizowanych, są większe w dzień niż w nocy. Grubość, gęstość elektronowa i wysokość poszczególnych warstw zjonizowanych są różne w różnych punktach kuli ziemskiej. Częstotliwości krytyczne zmieniają się w zależno-

ści od pór roku, co głównie spowodowane jest działalnością słońca. Różnice te najbardziej zaznaczają się w warstwie F2. Istnieją również przypadkowe zjawiska, bliżej nie wytłumaczone. Niektóre z nich związane są z burzami magnetycznymi i jonosferycznymi. Inne jeszcze zjawiska występujące pod lub nad warstwą E wywołane są przez meteory.

Spśród wielu zjawisk jonosferycznych tylko niektóre mają wpływ na propagację fal metrowych, jak również nie wszystkie warstwy jonosfery uczestniczą w tej propagacji.

Warstwa F2

Najwyższa warstwa F2 występująca na wysokości od 250 do 400 km odgrywa podstawową rolę w propagacji fal metrowych. W latach od 1946 do 1948 (okres maksymalnej aktywności słońca) stwierdzono, że w pewnych okresach roku występowała propagacja fal metrowych na duże odległości na częstotliwości 50 MHz. Bezpośrednim powodem tego była silnie zjonizowana warstwa F2. Odbierane pole jest wówczas zmienne i waha się od wartości występującej w wolnej przestrzeni do poziomu szumów. Jeśli więc poziom zakłóceń lokalnych jest mały, to niejednokrotnie uzyskuje się stały odbiór przez długie okresy czasu.

Sporadyczna warstwa E_s

Warstwa E nie jest jednorodna. Z grubsza biorąc, warstwa E występuje w pięciu różnych odmianach. Sporadyczna warstwa E_s najczęściej spotykana w Polsce, ma duży wpływ na propagację fal metrowych i może występować w dowolnej porze dnia (długotrwałe maksimum ma miejsce po zachodzie słońca). Ponadto występują sezonowe zmiany warstwy E_s zwykle w okresie od maja do września; w pozostałych miesiącach są one stosunkowo małe.

Choć nie są te zagadnienia jeszcze dokładnie zbadane, to zakłada się, że typowa warstwa E_s w środkowych szerokościach geograficznych wywołana jest turbulencją powietrza i szybkim przesuwaniem się chmur zjonizowanych. Jeśli chmury te nie są dość duże, to odbiera się stosunkowo słabe pole przez okresy trwające od kilku minut do kilku godzin.

Warstwy wywołane meteorami

Fale metrowe odbijają się również od zjonizowanych obszarów wywołanych przez meteory na wysokości warstwy E i trochę poniżej. Ze względu na przejściową naturę zjonizowanych śladów, fale na ogół odbierane są przez bardzo krótkie okresy czasu, np. sekundy. Przypadki długotrwałych rozprysków meteorów (trwających od kilku sekund do kilkunastu minut) zdarzają się wyjątkowo rzadko.

Wpływ nierówności i pokrycia terenu na rozchodzenie się fal metrowych

Omówiliśmy właściwości rozchodzenia się fal metrowych, na których pracują stacje telewizyjne i radiofonii FM.

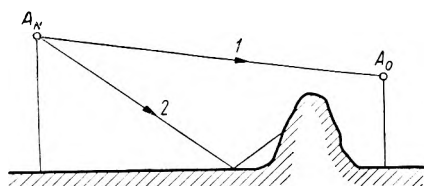
Dotychczas rozważało się jednak natężenie pola tych fal w założeniu gładkiej powierzchni ziemi. W rzeczywistości tak nie jest. Fale te rozchodzą się wzdłuż terenów mniej lub więcej falistych lub górzystych oraz napotykają na swej drodze różne pokrycie terenu — naturalne np. lasy, i sztuczne np. fabryki, linie wysokiego napięcia itp.

W zakresie fal metrowych wpływ małych nierówności terenu można pominąć, natomiast przy falach decymetrowych zaznacza się on już poważnie. Również tłumienie wywołane przez drzewa, ściany z cegieł lub z kamienia szybko rośnie z częstotliwością.

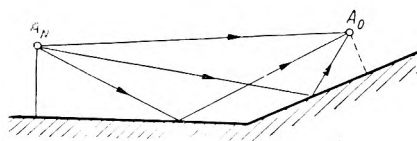
Ogólnie wpływ nierówności i pokrycia terenu odgrywa większą rolę w telewizji w zakresie IV i V niż w zakresie III, a zwłaszcza w zakresie I.

Wpływ terenów górzystych

Przeszkody terenowe w postaci wzgórz powodują znaczne tłumienie natężenia pola w obszarze znajdującym się bezpośrednio za wzniesieniem. Obszar ten jest zacieniony i tylko dzięki dyfrakcji natężenie pola nie obniża się w nim do zera. Zdolność uginania się fal zależna jest w dużym stopniu od częstotliwości i w pewnym stopniu od polaryzacji fali. Przy częstotliwościach rzędu 1000 MHz fale spolaryzowane poziomo w większym stopniu ulegają dyfrakcji i dają większe natężenie pola w obszarze cienia, niż fale spolaryzowane pionowo. Straty natężenia pola wywołane przesłanami takimi, jak np. pagórki, ros-



Rys. 11



Rys. 12

na ze wzrostem wysokości przeszkód i ze wzrostem częstotliwości.

W pewnych warunkach przeszkody terenowe w postaci wzgórz lub grzbietów górskich powodują zwiększenie natężenia pola w punkcie odbioru. Przypadek taki może mieć miejsce np. w sytuacji terenowej przedstawionej na rys. 1, gdzie przeszkoda terenowa znajduje się blisko anteny odbiorczej na drodze promienia odbitego. Natężenie pola w punkcie A_0 jest wytworzone prawie wyłącznie przez falę bezpośrednią i wskutek tego ma wartość zbliżoną do natężenia pola w wolnej przestrzeni.

Górzystość terenu może również wywołać zjawisko interferencyjne w niektórych punktach odbioru, na

przykład w sytuacji przedstawionej na rys. 2, gdzie interferencja fal jest spowodowana przez dwie fale odbite.

Wpływ drzew i obszarów leśnych

Większe grupy drzew, a szczególnie gęste lasy, należy traktować jako ośrodek pochłaniający energię fal elektromagnetycznych. Lasy iglaste powodują niewielkie tłumienie, natomiast lasy liściaste zwłaszcza wilgotne wywołują znacznie większe tłumienie. Tłumienie powodowane przez lasy rośnie z częstotliwością i wynosi dla lasów liściastych ok. 0,02–0,03 dB m w I zakresie telewizyjnym.

Wpływ budynków

Fale radiowe niższych zakresów aż do fal metrowych włącznie przenikają przez ściany budynków. Także w zakresie telewizyjnym I i III. Pokojowe anteny odbiorcze mogą więc być stosowane, jeśli tylko mury budynków nie są zbrojone.

Natężenie pola na terenach zabudowanych jest wypadkową szeregu promieni fal odbitych od dachów, ścian, powierzchni ulic, podwórz itp.

Obszary zabudowane mają mały wpływ na rozchodzenie się fal o częstotliwościach kilku MHz, gdyż wielkość przesłon takich jak budynki, mosty stalowe itp. jest stosunkowo mała w porównaniu do długości fal. Tłumienie fal przez ściany jest rzędu 2–3 dB przy częstotliwościach 30 MHz i 5–10 dB przy częstotliwościach 300 MHz.

Straty energii fal metrowych wzrastają wraz z wysokością budynków i z ilością ich na 1 km². Z tych też względów wprowadzono podział budynków na dwie kategorie. Budynki znajdujące się w centrum miasta zostały zaliczone do jednej kategorii, a domki willowe budowane najczęściej na przedmieściach miasta zaliczono do drugiej kategorii. Średnie straty natężenia pola w stosunku do płaskiej powierzchni ziemi w centrum miasta, gdzie pobudowane są duże domy wynoszą ok. 10 dB, a na przedmieściach w obszarach domków willowych rzędu 4–6 dB.

Natężenie pola w mieście pośród budynków, a nawet wewnątrz budynków, zmienia się z miejsca na miejsce w bardzo szerokich granicach. Przy lokalizacji pokojowej anteny odbiorczej wystarcza niekiedy przesunąć ją o 2–3 metry, aby w znacznym stopniu poprawić odbiór fal metrowych.