



INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Zakład Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji (Z-1)

Anteny średniofalowe

Praca nr 01300056

Warszawa, grudzień 2006

Anteny średniofalowe

Praca nr 01300056

Słowa kluczowe: anteny średniofalowe, DRM, radiofonia cyfrowa, CFA

Kierownik pracy: dr inż. Jacek Jarkowski

Wykonawcy pracy: inż. Andrzej Dusiński, Ewa Wielowieyska

Kierownik Zakładu: mgr inż. Aleksander Orłowski

Spis treści

1. Warunki pracy anten	4
1.1. Krótka charakterystyka rozchodzenia się fal średnich	4
1.2. Zwiększenie zasięgu fali powierzchniowej	5
1.3. Wymagania stawiane średniofalowym antenom	6
2. Wymagania systemu DRM	7
2.1. Szerokość przenoszonego pasma.....	7
3. Anteny stosowane w zakresie fal średnich.....	9
3.1. Charakterystyki promieniowania średniofalowych anten	9
3.2. Pionowa antena.....	9
3.3. Wzajemne oddziaływanie promieniowanego pola przez antenę gruntem.....	10
3.4. System dwóch pionowych elementów promieniujących.....	12
3.5. System elementów promieniujących usytuowanych pod kątem względem siebie.....	14
3.6. Antena z nachylnym elementem promieniującym	15
3.7. Antena CFA.....	15
3.8. Ocena anteny CFA.....	18
4. Zasady projektowania	21
4.1. Przydatność anteny CFA	21
4.2. Charakterystyki promieniowania anten	21
4.3. Projektowanie zasięgów stacji radiofonicznych.....	23
4.4. Uwagi.....	25
Literatura.....	25

1. Warunki pracy anten

1.1. Krótka charakterystyka rozchodzenia się fal średnich

Energia elektromagnetyczna emitowana przez antenę rozchodzi się we wszystkich kierunkach. W związku z tym rozróżniane są: fala przestrzenna i powierzchniowa. Fale przestrzenne rozchodzą się pod różnymi kątami dochodząc do jonosfery, gdzie są tłumione w warstwach D i E. Tłumienie to zmienia się w zależności od pory doby i roku oraz liczby plam na Słońcu, [7], [15].

W porze dziennej, kiedy koncentracja elektronów jest duża występuje większe tłumienie energii elektromagnetycznej fal średnich. Dlatego w miejscu odbioru występuje tylko fala powierzchniowa. Zasięg tej fali, tzn. maksymalna odległość od nadajnika, dla której jest zapewniony odbiór z określoną jakością, zależy od:

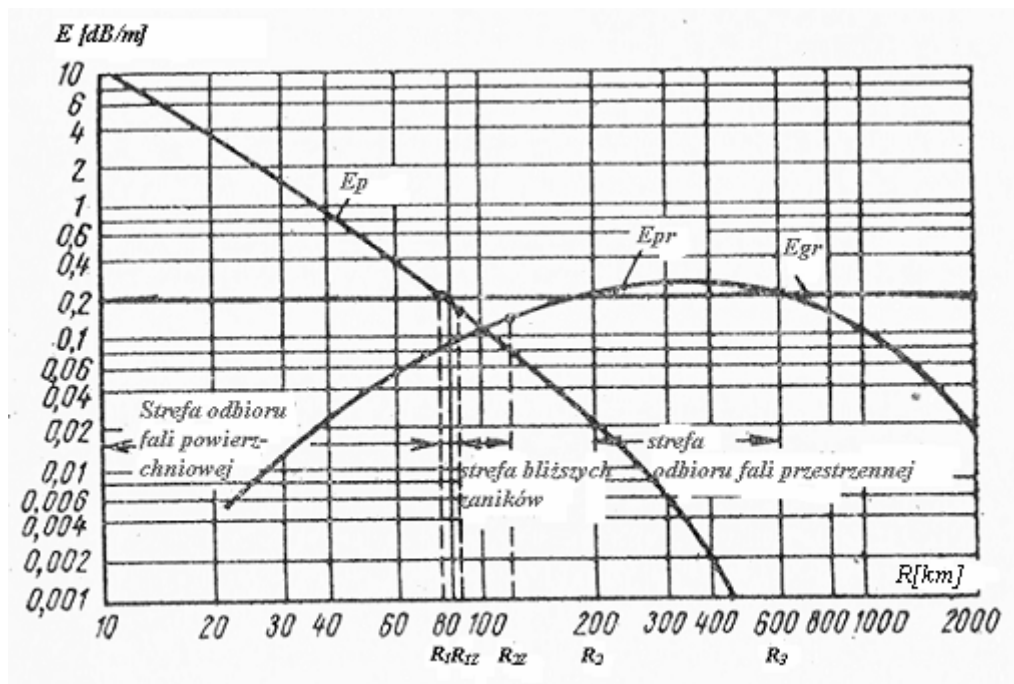
- długości fali,
- mocy nadajnika,
- charakterystyki anteny i jej zysku,
- poziomu zakłóceń w miejscu odbioru,
- od przewodności gruntu na całej trasie i w miejscu odbioru.

W porze nocnej koncentracja elektronów w warstwie D i dolnych częściach warstwy E znacznie maleje, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia tłumienia fali przestrzennej. Przestrzenna fala radiowa odbija się od jonosfery i mówimy o fali jonosferycznej. W miejscu odbioru, gdzie oprócz fali powierzchniowej E_p pojawia się fala jonosferyczna E_j , wypadkowe pole elektromagnetyczne jest wynikiem superpozycji między wspomnianymi falami.

Pojawienie się tzw. własnej fali jonosferycznej może być zjawiskiem zarówno szkodliwym jak i pożytecznym. W systemie analogowym AM pojawienie się fali jonosferycznej na danym obszarze jest zjawiskiem szkodliwym, jeśli poziomy natężenie pól fali powierzchniowej i fali jonosferycznej są zbliżone. Wówczas występuje szkodliwa interferencja. W obszarach, gdzie poziom natężenia pola fali powierzchniowej jest znacznie mniejszy od poziomu natężenia pola fali jonosferycznej mamy do czynienia ze zwiększeniem zasięgu danej stacji.

W systemie cyfrowym DRM, występowanie własnej fali jonosferycznej, na ogół jest zjawiskiem pożytecznym, o ile różnica czasów przebycia tras przez falę powierzchniową i falę jonosferyczną w punkcie odbioru jest mniejsza od czasu ochronnego sygnału DRM, [6] i o ile w wyniku interferencji nie pojawiają się zaniki.

Własności jonosfery zmieniają się w czasie, dlatego zmieniają się zarówno amplituda jak i faza natężenia pola elektromagnetycznego fali jonosferycznej. W odległości R_1 gdzie amplitudy natężeń obu fal są zbliżone zaczyna występować zjawisko wahania się amplitudy wypadkowego pola od zera do podwójnej wartości amplitudy fali powierzchniowej $E_w = 2 E_p$, (Rys. 1).



Rys. 1. Zmienność natężeń pól fal: powierzchniowej i przestrzennej, [4]

W porze wieczornej i nocnej występują trzy charakterystyczne strefy odbioru sygnału radiowego:

- 1) Strefa odbioru fali powierzchniowej odpowiada przedziałowi odległości od nadajnika do R_1 , dla której natężenie pola powierzchniowej spełnia następujące warunki:

$$E_p = E_g \text{ i } E_p > 2E_j, \quad (1)$$

gdzie E_g – graniczne natężenie pola odpowiadające minimalnemu natężeniu pola, dla którego jakość odbioru, przy obecności zakłóceń przemysłowych i atmosferycznych, spełnia jeszcze ustalone wymagania.

- 2) Strefa wahań i zaników sygnału, to przedział odległości od R_1 do R_2 , przy czym:

$$R_1 \leq R_{1z} \text{ a } R_2 \geq R_{2z}, \quad (2)$$

gdzie R_{1z} odpowiada odległości, dla której $E_p = 2E_j$, a R_{2z} odpowiada odległości, dla której następuje $E = 2E_p$, a przedział odległości (R_{1z} , R_{2z}) nazywany bywa przedziałem, lub strefą bliskich zaników lub zaniku selektywnego, [18]. Dla przykładu, na częstotliwości 1000 kHz, przy niskiej antenie w porównaniu z długością fali, bliższy zanik występuje w odległości R_{1z} w przybliżeniu równej 100 km, [4].

- 3) Strefa odbioru fali przestrzennej to przedział odległości (R_2 , R_3), dla którego natężenie fali przestrzennej jest większe od granicznego natężenia E_g . Odbierany sygnał charakteryzuje się zanikami spowodowanymi fluktuacją jonosfery i zjawiskiem wielodrogowości, [4], [18].

1.2. Zwiększenie zasięgu fali powierzchniowej

Uzyskanie dużego zasięgu fali powierzchniowej jest wymaganiem stawianym w radiofonii rozsiewczej przez nadawców korzystających z cyfrowego systemu DRM.

Zwiększenie zasięgu fali powierzchniowej zależy m.in. od wyznaczonej minimalnej wartości granicznego natężenia pola. Zwiększenie mocy, dla danych warunków przewodności gruntu, praktycznie nie powoduje zmiany granicy strefy selektywnego zaniku.

Ze względów praktycznych, dla danych warunków przewodności gruntu, celem jest wybieranie nadawanej mocy o wartości zapewniającej równość odległości $R_1 = R_{1z}$.

Jeśli antena posiada charakterystykę w płaszczyźnie pionowej w postaci wykresu funkcji trygonometrycznej $\cos \Delta$, gdzie Δ jest kątem elewacji to strefa odbioru fali powierzchniowej zajmuje stosunkowo mały obszar, w porównaniu z ogólnym obszarem obsługiwany przez dany nadajnik.

Jednym z warunków rozszerzenia strefy odbioru fali powierzchniowej jest oddalenie od nadajnika strefy selektywnego zaniku. Dokonuje się tego przez zastosowanie anten nadawczych emitujących mały poziom energii elektromagnetycznej w kierunkach odpowiadających dużym kątom promieniowania. Anteny spełniające ten warunek nazwano antenami antyzanikowymi, [[4], [18]]. Dodatkowym sposobem oddalenia strefy selektywnego zaniku jest ograniczenie listków bocznych anten.

Według [4], anteny antyzanikowe to takie, które dla kątów elewacji większych niż $40 - 50^\circ$ emitują pole elektromagnetyczne o natężeniu mniejszym o 20–17 dB od wartości otrzymywanej dla kierunku $\Delta = 0^\circ$ i $\sigma = \infty$. Anteny antyzanikowe, w porównaniu z anteną krótką posiadają wąską charakterystykę w płaszczyźnie pionowej i odpowiednio duży zysk dla małych kątów promieniowania.

1.3. Wymagania stawiane średniofalowym antenom

Podstawowym wymaganiem stawianym antenom pracującym w zakresie fal średnich jest potrzeba zmian charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie pionowej w zależności od pory doby.

W porze dziennej, promieniowanie dla dużych kątów elewacji nie ma znaczenia. Wówczas występuje tylko fala powierzchniowa i promieniowana moc powinna być jak największa. Można to osiągnąć przez uzyskanie maksymalnego zysku anteny w płaszczyźnie poziomej.

W porze nocnej, jak wcześniej wspomniano, promieniowanie anteny dla dużych kątów elewacji powinno być jak najmniejsze, a charakterystyka anteny powinna zapewniać jak najwęższą strefę selektywnego zaniku. Zapewniają to anteny antyzanikowe, które poza rozszerzeniem strefy odbioru bez zaników, zapewniają:

- zwiększenie zysku i uzyskanie odpowiedniej charakterystyki w płaszczyźnie poziomej dla małych kątów elewacji
- zmniejszenie wpływu modulacji skrośnej,
- zmniejszenie zakłóceń interferencyjnych.

Anteny antyzanikowe charakteryzują się wąskopasmowymi własnościami.

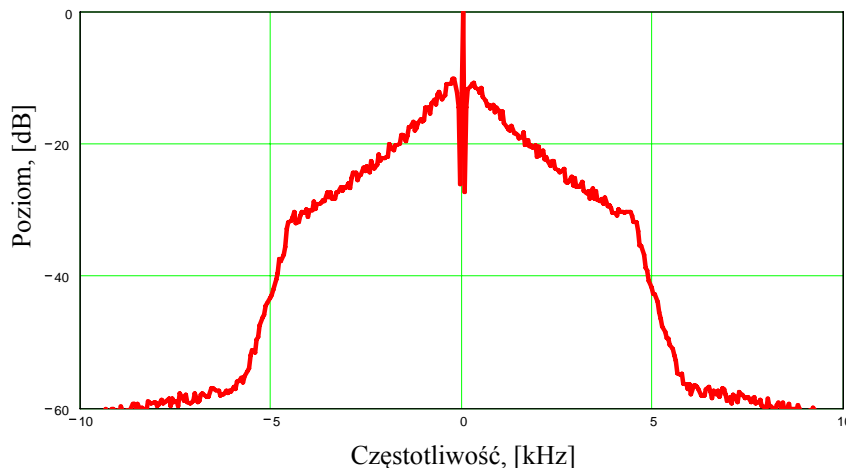
Przy założeniu, że anteny antyzanikowe są wykonane w postaci pionowych masztów, to wymienione wyżej wymagania są związane z dużymi wysokościami tych anten rzędu 180 – 570 m, [4], co jest ich wadą tak z punktu widzenia działań technicznych jak i ekonomicznych.

2. Wymagania systemu DRM

2.1. Szerokość przenoszonego pasma

Jednym z zasadniczych parametrów systemu antenowego pracującego w systemie DRM jest pasmo przenoszenia. W zakresach fal długich i średnich, w Regionie 1, [10] możemy mówić o szerokościach kanałów 9 kHz, które do tej pory były przeznaczone dla transmisji w systemie analogowym dwuwstęgowym AM, (Rys. 2). Część energii sygnału analogowego jest promieniowana w kanale sąsiednim.

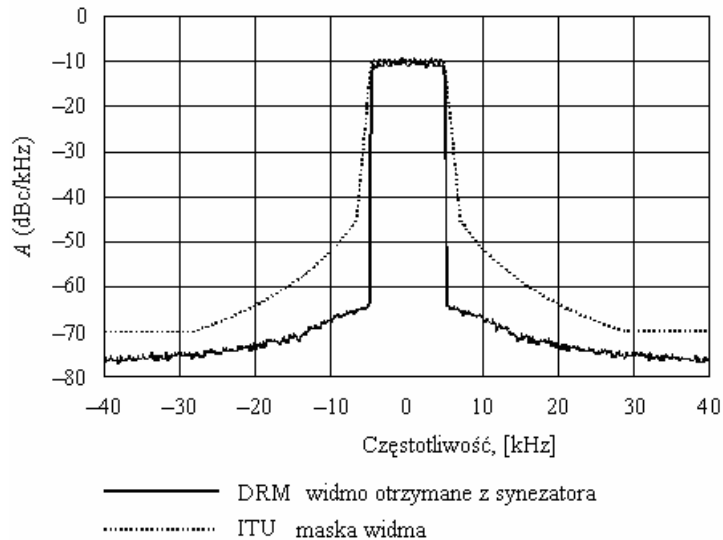
W transmisjach DRM przewidziano wykorzystanie kanałów o szerokości 18 kHz, które można uzyskać przez połączenie dwóch sąsiadujących ze sobą kanałów o szerokości 9 kHz.



Rys. 2 Rozkład widmowy w kanale 9 kHz dla modulacji analogowej AM, [13]

Widmo sygnału cyfrowego systemu DRM zawiera pewną liczbę nośnych OFDM i charakteryzowane jest przez płaską charakterystykę w przedziale kanału i przez strome zbocza na granicy kanałów (Rys. 3). Również i w tym przypadku część energii jest promieniowana poza kanałem. Takie widmo powinno być przenoszone przez antenę nadawczą. Dodatkowym warunkiem jest wymagana stałość fazy w całej szerokości kanału.

Ograniczenie pasma do szerokości kanału wymagane przez system DRM, oprócz tłumienia amplitudy sygnału, zmienia fazowe zależności między nośnymi, co może doprowadzić do zakłócenia ortogonalności między nimi, a w konsekwencji do interferencji między nośnymi. Zatem system antenowy nie powinien wprowadzać dodatkowego ograniczenia pasma.



Rys. 3. Widmo sygnału DRM, otrzymane z syntezyatora, dla modulacji 64-QAM oraz zalecane przez ITU, [13]

Działanie systemu antenowego w jakimś przedziale częstotliwości zależy nie tylko od zależności elementów systemu antenowego od częstotliwości, ale raczej od wypadkowej charakterystyki częstotliwościowej układu składającego się z linii transmisyjnej (fidera) i elementów anteny, [1]. W praktyce charakterystyczna impedancja linii jest zazwyczaj rzeczywista, podczas gdy impedancja systemu antenowego jest zespolona. Różne są również zmiany każdej z tych części w funkcji częstotliwości.

Jeśli szerokość przenoszenia anteny pokrywa się z szerokością pasma sygnału to można spodziewać się, że widmo w.cz. widziane na wyjściu nadajnika obciążonego anteną będzie się różniło od widma zarejestrowanego na obciążeniu w postaci rezystancji. Zatem w fazie projektowania należy określić charakterystykę anteny.

Dla anten wykorzystywanych do pracy w systemie DRM zleca się, aby charakterystyczna impedancja była symetryczna, a jej wartość ograniczona [6]. Oznacza to, że po obu stronach środkowej częstotliwości pasma przenoszenia znak jej części urojonej powinien być różny, a przedział zmian impedancji był równy.

Szerokość pasma przenoszenia anteny może być wyrażona przez wartości współczynnika fali stojącej WFS. Na podstawie badań ustalono, że ten współczynnik nie powinien przekraczać wartości 1,2 w przedziale zmian częstotliwości ± 10 kHz względem środkowej częstotliwości i 1,4 w przedziale ± 15 kHz [6].

Na szerokość przenoszonego pasma mają wpływ rozmiary elementów anteny. Z punktu widzenia potrzeb DRM proste anteny, w postaci pionowych masztów, często używane do tej pory w transmisjach analogowych, nie zapewniają wymaganej szerokości pasma. Natomiast stosowanie krótkich anten jest pożądane z powodów ekonomicznych, estetycznych, mechanicznych lub z potrzeby wykorzystania małych mocy. Jest to szczególnie ważne w miastach. Potrzebne są ich modyfikacje oraz prace nad nowymi rozwiązaniami.

Nie ma tych problemów w zakresie krótkofalowym. Dotychczas stosowane anteny mogą być wykorzystywane bez zmian.

3. Anteny stosowane w zakresie fal średnich

3.1. Charakterystyki promieniowania średniofalowych anten

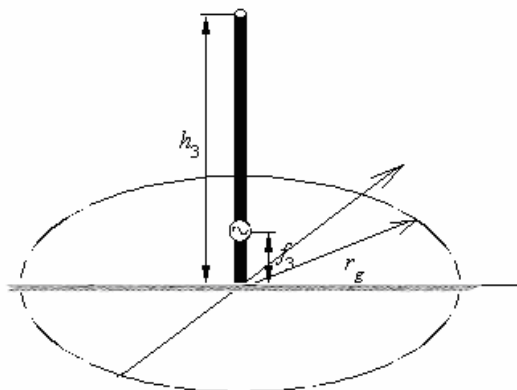
Charakterystyka promieniowania anteny nadawczej ma zasadniczy wpływ na natężenie pola w przestrzeni, ponieważ może uprzywilejować lub dyskryminować pewne sposoby propagacji fal radiowych, [18].

Charakterystyki promieniowania anten zależą od:

- przekroju elementu promieniującego anteny;
- częstotliwości pracy;
- systemu uziemienia pod anteną i charakterystyk gruntu;
- liczby elementów i odległości między nimi;
- wysokości elementów nad poziomem gruntu;
- orientacji w przestrzeni;
- sposobu zasilania anteny
- charakterystyk otoczenia anteny.

3.2. Pionowa antena

Podstawowym promieniującym elementem występującym w zakresach długo- i średniofalowych jest pionowy promieniujący element wzniesiony nad gruntem nazywany prostą anteną, unipolem lub monopolem, (Rys. 4). Prosta antena może być zrealizowana przez podtrzymującą strukturę lub przez maszt z naciągami i może być zasilana na różnej wysokości. Zasilanie prostej anteny jest jednym z najbardziej powszechnych ustaleń. Stosowane są zasilania od dołu, od góry lub pośrednie, (Rys. 4).



Rys. 4. Pionowy monopolek z zasilaniem w części jego wysokości.

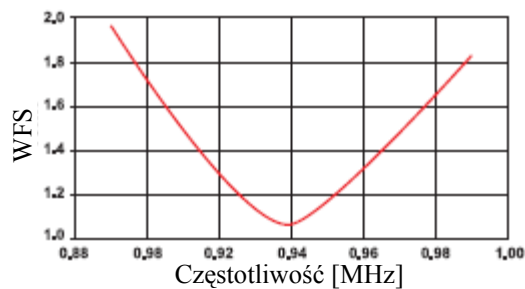
Wysokość pionowej anteny jest z przedziału $(0,1\lambda; 0,625\lambda)$ w zależności od potrzeb. Dla częstotliwości środkowej średniofalowego zakresu odpowiada to przedziałowi wysokości (30 m, 180 m). Impedancja wejściowa zależy od wysokości i przekroju anteny. Pionowy monopolek ma dookólną charakterystykę w płaszczyźnie poziomej.

W powszechnym użytkowaniu są różne struktury takie jak stalowe wieże wolno stojące, wysokie maszty z odciągami, lub rozpięte przewody. Przekrój promieniującego elementu może różnić się znacznie w zależności od różnych planowanych rozwiązań. Wolno stojąca wieża ma przekrój trójkątny lub kwadratowy z długością boku rzędu 5 – 10 m. Średnice masztów, o przekroju kołowym, są rzędu 1 m. Przekroje tych konstrukcji są małe w porównaniu z długością fali, a w odniesieniu do masztów, są bardzo małe w porównaniu z długością masztów.

Przekroje wież i masztów wykorzystywane w praktycznych rozwiązaniach są różne, a w konsekwencji różne są prądy w promieniującym elemencie, czego skutkiem są różne charakterystyki i zyski, [12]. Wzrost przekroju będzie powodował malenie reaktancji i wzrost szerokości pasma.

Na Rys. 5 pokazano zmiany współczynnika WFS w przedziale częstotliwości ± 10 kHz ze środkową częstotliwością równą 939 kHz dla pionowej, ćwierćfalowej anteny. Antena w postaci masztu o średnicy 0,5 m i o wysokości 75 m, zasilana była od dołu, [6].

Wysokości pionowych anten wymienione wyżej okazują się duże. Jest zainteresowanie antenami krótszymi od $1/9 \lambda$ dla radiofonicznych usług..



Rys. 5. Zmiany WFS w funkcji częstotliwości dla anteny ćwierćfalowej, dla $f=939$ kHz, [6]

3.3. Wzajemne oddziaływanie promieniowanego pola przez antenę gruntem

Na kształt wypadkowej charakterystyki anteny wpływają parametry gruntu i fizyczne parametry anteny. Jest to związane z tym, że płynący przez antenę prąd I wzbudza wokół niej pole indukcyjne zamykające się na ziemi i wzbudzające w niej prądy I_z . Te prądy I_z z jednej strony, przedstawiają straty energii w glebie i w konsekwencji wpływają na sprawność anteny:

$$\eta = \frac{P_{\text{prom}}}{P_{\text{we}}}, \quad (3)$$

gdzie:

P_{prom} - moc promieniowana,

P_{we} - moc dostarczana do anteny,

zaś z drugiej strony, wzajemne oddziaływanie pierwotnych pól wypromieniowanych przez antenę i pól wtórnych powstałych w wyniku przepływu prądu w gruncie formują charakterystykę anteny, w szczególności w płaszczyźnie pionowej, [12], [17].

Kształt charakterystyki pionowej ma wpływ na sposoby rozchodzenia się fal jonosferycznych.

W celu zmniejszenia strat energii w gruncie stosuje się zwiększenie przewodności gruntu przez zastosowanie radialnego system uziemienia zwanego przeciwwagą. Polega ono na tym, że od podstawy anteny odchodzą promieniście przewody, których liczba jest różna w zależności od potrzeby. Daje to zmniejszenie rezystancji strat gruncie R_s .

Rezystancja strat gruntu zależy od jego przewodności σ , odległości od anteny w płaszczyźnie poziomej, długości promienia uziemienia, rozkładu prądów w strefie okrążającej antenę, stosunku prądu w gruncie do prądu w przewodach uziemiających. Straty energii zachodzą w górnej warstwie gruntu, zwanej warstwą aktywną, o grubości

$$h_{sg} \approx 0,03 \sqrt{\frac{\lambda}{\sigma}} \quad (4)$$

gdzie:

λ - długość fali,

σ - przewodność gruntu.

Dla przykładu dla $\sigma = 10^{-2}$ S/m i $\lambda = 300$ m tj. dla częstotliwości $f = 1000$ kHz:

$$h_{sg} \approx 5,2 \text{ m [17].}$$

Podstawowym warunkiem, który pozwala na zmniejszenie rezystancji strat gruntu R_s , co wiąże się ze zwiększeniem sprawności anteny, jest wybór miejsca lokalizacji anteny posiadającego największą przewodność σ gruntu w promieniu nie mniejszym niż $\lambda/2$ i możliwości wykonania dużej liczby uziemiających promienistych przewodów. Przy czym przewodność gruntu należy traktować jako lokalny parametr wymagający specjalnego zainteresowania przy wyborze miejsca lokalizacji anteny. Pamiętać przy tym trzeba, że grunt może posiadać niejednorodności w głębszych częściach przewodzącej warstwy.

W określaniu charakterystyki anteny ma udział pewna część powierzchni gruntu wokół anteny, w której pola wypromieniowane przez antenę wzbudzają prądy przekazujące energię odbieraną w punkcie obserwacji.

Rozmiary tej części określa wzór:

$$2a = \frac{\lambda}{2 \sin^2 \Theta} \quad (5)$$

gdzie:

λ - długość fali,

$$\sin \Theta = \frac{z}{d},$$

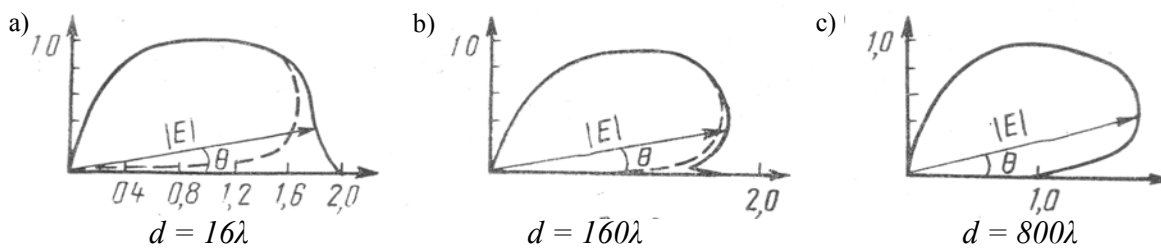
z - wysokość w punkcie obserwacji,

d - odległość punktu obserwacji od anteny

Θ - kąt punktu obserwacji.

Natężenie pola wzbudzone w otoczeniu anteny zależy od parametrów gruntu we wspomnianej wyżej części powierzchni gruntu, a mianowicie od przewodności σ i przenikalności elektrycznej gruntu ϵ .

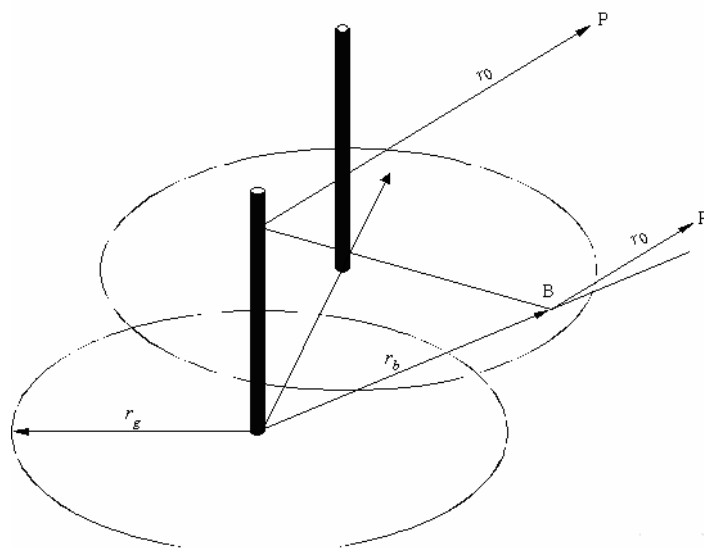
Natężenie pola odbierane w punkcie obserwacji jest superpozycją dwóch pól: pola promieniowanego przez otaczający antenę grunt – fala powierzchniowa i pola pochodzącego bezpośrednio od anteny – fala przestrzenna. To pierwsze pole zależy od parametrów gruntu i szybko maleje z wysokością odbioru. To drugie zależy od parametrów anteny. W funkcji odległości znacznie szybciej maleje pole fali powierzchniowej, ale ostateczny wpływ na kształt charakterystyki mają wzajemne zależności Rys. 6



Rys. 6. Zależność zmian charakterystyki w płaszczyźnie pionowej od odległości d , dla różnych kątów elewacji i dla $60\lambda\sigma = 1000$; Linia przerywana przedstawia charakterystyką dla fali przestrzennej [17]

3.4. System dwóch pionowych elementów promieniujących

Dla lepszego wykorzystania zakresu fal średnich ta sama częstotliwość jest wykorzystywana przez kilka, kilkanaście a nawet kilkadziesiąt stacji radiofonicznych. Dla ochrony przed interferencjami sygnałów pochodzących od stacji pracujących na tej samej częstotliwości stosuje się anteny nadawcze z kierunkową charakterystyką. Kiedy wymagana jest redukcja mocy w jakimś kierunku, pożądana charakterystyka może być uzyskana przy użyciu systemu antenowego składającego się z dwóch pionowych masztów promieniujących umiejscowionych w pewnej odległości od siebie, w kierunku minimum charakterystyki i zasilanych przez prądy o odpowiednich amplitudach i fazach Rys. 7. Każdy z dwóch masztów ma swój system przeciwwagi i systemy te łączą się przez grunt.



Rys. 7. System antenowy składający się z dwóch pionowych monopoli, [12]

Pozioma charakterystyka promieniowania systemu jest symetryczną względem osi przechodzącej przez podstawy tych dwóch masztów i ma kształt kardiody.

System antenowy składający się z dwóch pionowych elementów, w postaci masztów, może pracować z dwoma zasilanymi elementami lub jednym. W tym ostatnim przypadku drugi element odgrywa rolę radiatora lub direktora.

Istotnym parametrem jest stosunek maksymalnego promieniowania w kierunku pożądanym do promieniowania wstecznego. Jeśli wymagany jest duży stosunek promieniowania głównego do wstecznego, to dla przypadku jednoczesnego zasilania dwóch masztów dokonywane jest to za pomocą skomplikowanego systemu obwodów, a dla dużych mocy, całkiem kosztownego systemu pasywnych obwodów. Wynika to z konieczności osiągnięcia właściwej zależności między amplitudami i fazami prądów w masztach. Moc wielkiej częstotliwości z głównego fidera musi być bezpośrednio skierowana do tych radiatorów przez separator mocy i przesuwnik fazowy i obwody dopasowujące impedancję.

Dla nadajników małej mocy wymagania dla charakterystyki promieniowania, ze względu na zakłócenia interferencyjne, nie są tak ostre. Zamiast systemu składającego się z dwóch zasilanych elementów promieniujących stosuje się zasilanie jednego, podczas gdy drugi zachowuje się jako pasywny radiator. Jest on sprzężony z pierwszym radiatorem za pośrednictwem pola elektromagnetycznego. Odpowiednia dopasowująca reaktancja, cewka lub kondensator, jest włączona między podstawę pasywnego radiatora a jego system uziemienia. Ta reaktancja jest użyta dla osiągnięcia wymaganego stosunku amplitud i faz prądów w obu promiennika.

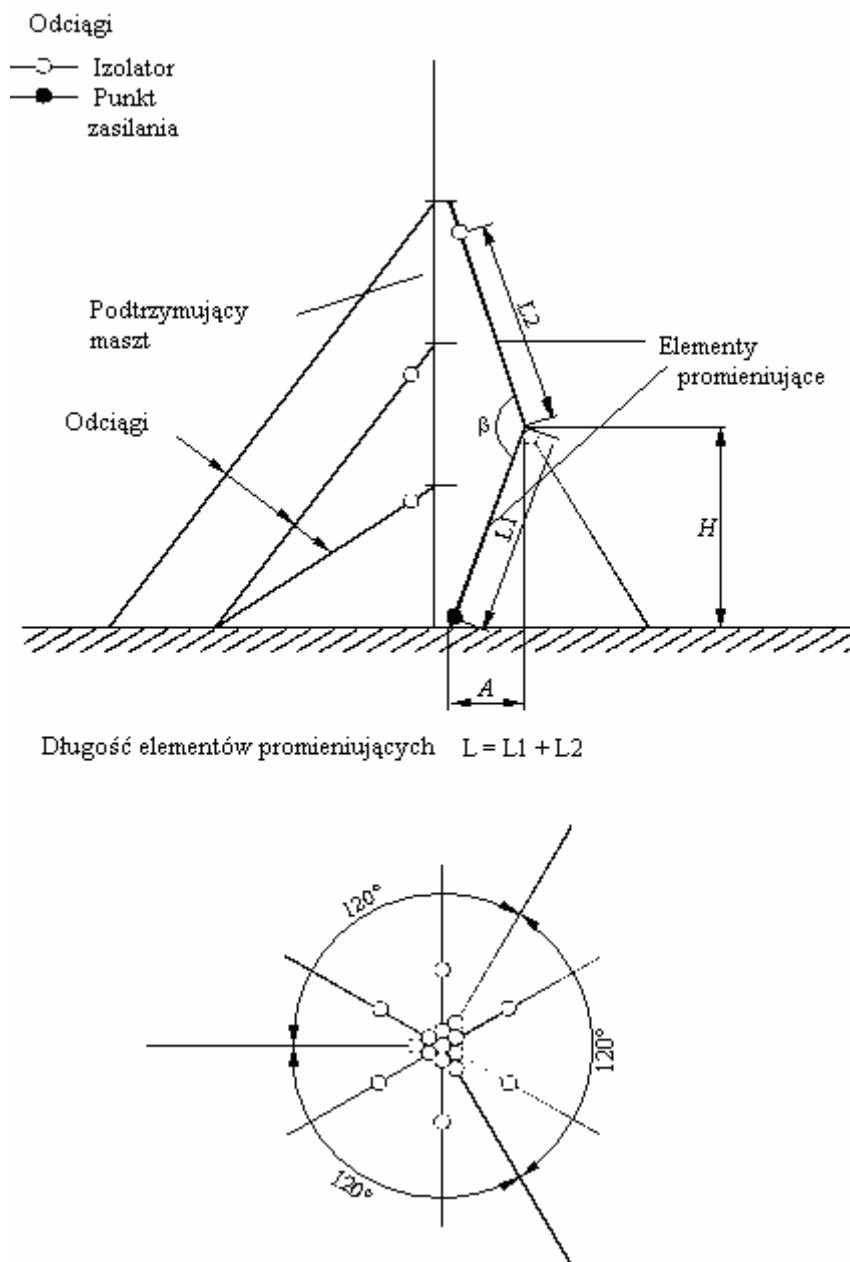
Taki system jest znacznie tańszy niż system składający się z dwóch bezpośrednio zasilanych radiatorów masztowych. Posiada on również charakterystykę w kształcie kardiody, ale nie może osiągnąć dużej wartości stosunku promieniowania w kierunku maksymalnym do wtórnego. Maksymalne osiągnięte wartości tego stosunku wyrażonego w mierze logarytmicznej niewiele przewyższają wartość 10 dB, dla systemu dwóch masztów ćwierćfalowych, odległych od siebie o ćwierć długości fali [9].

Wadą systemu antenowego składającego się z jednego zasilanego masztu i drugiego pasywnego jest, że ma on ograniczone możliwości dostrajania.

3.5. System elementów promieniujących usytuowanych pod kątem względem siebie

Antena proponowana przez ITU dla zakresu fal średnich jest wzorowana na istniejących antenach pracujących w zakresach VHF i UHF Rys. 8 [12]. W tym przypadku maszt nie jest elementem promieniującym. Służy do podtrzymywania układów elementów promieniujących w liczbie trzech lub sześciu rozmieszczonych wokół niego. Każde dwa elementy leżące w płaszczyźnie pionowej są usytuowane względem siebie pod pewnym kątem.

Charakterystyka anteny może być dookólna lub kierunkowa. Wymagany kształt charakterystyki uzyskuje się przez odpowiednie ustawienie układów promieniujących oraz pasywnych elementów, jakie tworzą odciągi.

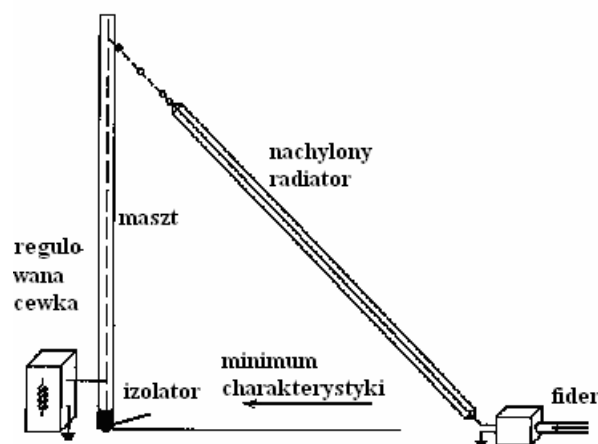


Rys. 8. Antena z ukośnymi elementami promieniującymi, [12]

3.6. Antena z nachylonym elementem promieniującym

System antenowy składa dwóch elementów promieniujących, z których jeden jest masztem, a rolę drugiego elementu promieniującego spełnia nachylona wiązka przewodów rozciągnięta między szczytem masztu i punktem zakotwiczenia w gruncie Rys. 9 [9]. To zakotwiczenie jest oddalone o ok. ćwierć fali od podstawy masztu w kierunku przeciwnym do zera charakterystyki promieniowania lub w kierunku przeciwnym i ma swój własny system uziemienia.

Przez odpowiednie projektowanie geometrii anteny i przez dokładne dostrojenie prądu w nachylonym radiatorze można otrzymać kardoidalną charakterystykę promieniowania z dużą wartością wspomnianego wyżej stosunku promieniowania w kierunku maksymalnym do promieniowania w kierunku wstecznym rzędu 26 dB i głębokie minimum w kierunku nachylonego masztu.



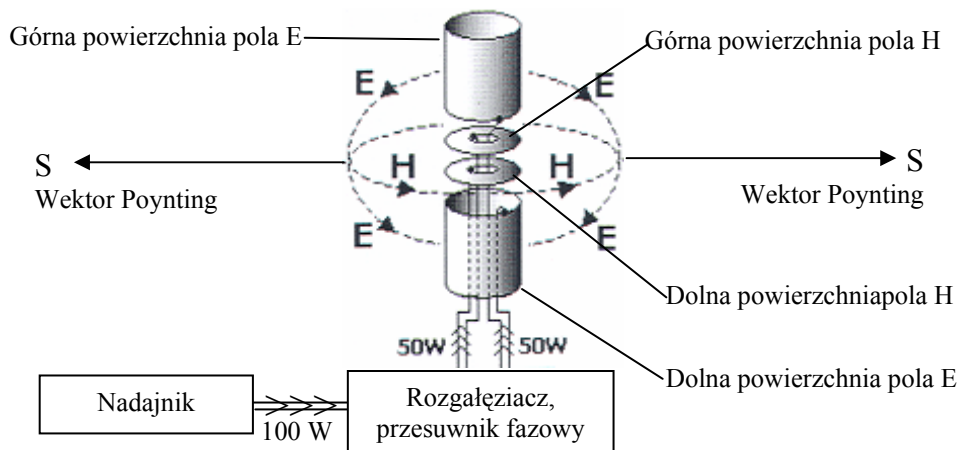
Rys. 9. System antenowy z nachylonym elementem promieniującym, [9]

Zaletami tego systemu antenowego są:

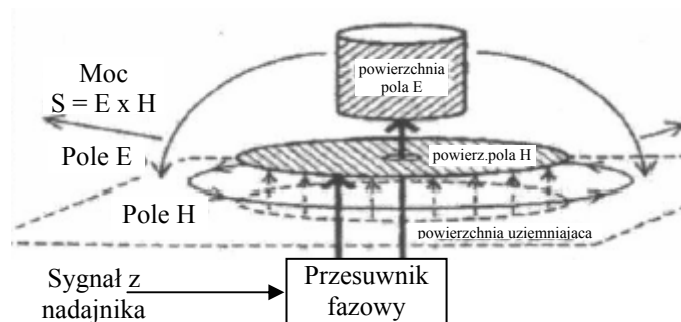
- stosunkowo prosta konstrukcja;
- małe zmiany wejściowych impedancji;
- małe zmiany stosunku promieniowania w kierunku maksymalnym do promieniowania w kierunku wstecznym w funkcji częstotliwości w kanale transmisyjnym, wpływają na ograniczenie możliwości wystąpienia interferencji w nadawanym sygnale;
- charakterystyka proponowanej anteny jest bardziej stłumiona we wszystkich kątach elewacji, co redukuje możliwości wystąpienia interferencji zarówno na fali powierzchniowej jak i jonosferycznej, w ten sposób umożliwiając bardziej stabilny odbiór.

3.7. Antena CFA

Antena ze skrzyżowanymi polami CFA (*Crossed-Field Antenna*) zdaniem wynalazców pracuje na zasadzie syntezy składowych pola elektromagnetycznego wykorzystując w tym celu, zgodnie z pierwotnymi założeniami, dwie duże płaszczyzny w postaci pierścieni tworzące kondensator i dwa duże bardzo krótkie cylindry (Rys. 10).



Rys. 10. Koncepcja Hately anteny CFA, [3], [21].



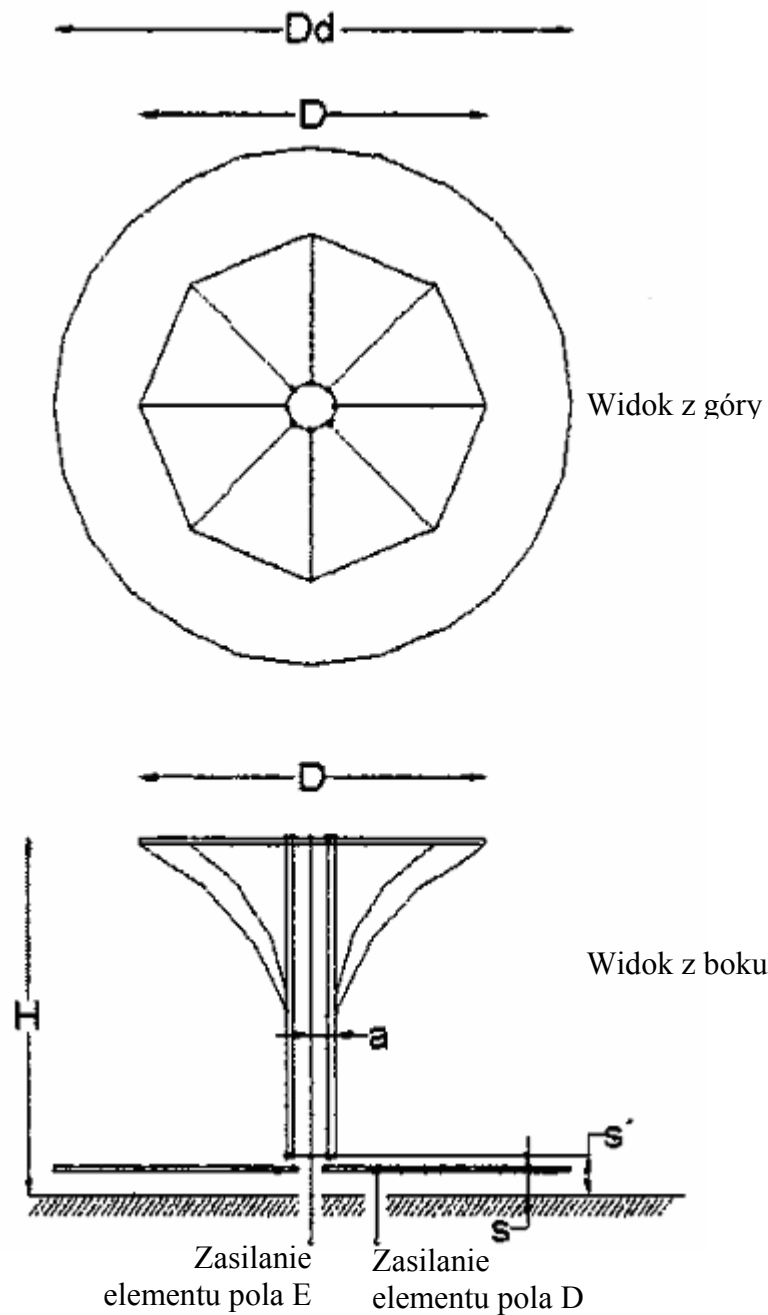
Rys. 11. Koncepcja oryginalnej wersji anteny CFA, [2]

Antena CFA posiada strukturę krótkiej cylindrycznej anteny spełniającej rolę promieniującego elementu zwanego powierzchnią pola E („*E-Plate*”) z metalową płaszczyzną znajdującą się pod tą pierwszą i równoległą do gruntu, zwaną powierzchnią pola D („*D-plate*”).

Powierzchnia pola E jest zasilana napięciem przesuniętym w fazie o 90° względem napięcia zasilającego powierzchnię pola D. Powierzchnia D, która jak wspomniano wyżej, jest kondensatorem o równoległych powierzchniach wytwarza wokół niego pole D. Według wynalazców, zmieniające się pole E między cylindrami łączy się z polem D wytwarzanym wokół kondensatora.

Ideą działania anteny jest przekonanie, że pola E i H są generowane oddzielnie. Pole elektryczne jest wytwarzane przez powierzchnię E i jest prostopadłe do pola magnetycznego wytwarzanego przez płaszczyznę D. W wyniku syntezy tych dwóch skrzyżowanych pól pojawia się wektor Poyntinga. Przez antenę promieniowane jest pole elektromagnetyczne.

W następnym rozwiązaniu, dla wzmocnienia promieniowania i ułatwienia dostrajania anteny dodano jej na szczycie dodatkowy element, (Rys. 12).



Rys. 12. Szkic modelu anteny CFA nad powierzchnią gruntu, dla którego przeprowadzono eksperymenty sprawdzające, gdzie $H = 1$ m, $D = 0,4$ m, $Dd = 0,6$ m [20].

Anteny CFA są obecnie wykorzystywane w zakresie fal średnich w kilku lokalizacjach. Obecnie ich instalacją i uruchomieniem zajmuje się egipska firma posiadająca licencję, [16]. Antena jest reklamowana między innymi krótkim opisem jej parametrów i własności:

- zakres częstotliwości: fale średnie i długie
- charakterystyka pozioma: dookólna
- charakterystyka pionowa: zamknięta do masztu antenowego,
- impedancja wejściowa 50Ω (lub dowolna wymagana)
- współczynnik fali stojącej bocznej wstęgi: 1,2
- lokalizacja: na dachu budynku z nadajnikiem lub na ziemi

- niezbędna powierzchnia pod antenę : mniejsza niż 0,25 % powierzchni potrzebnej pod maszty antenowy
- sprawność: większa niż 90 %
- pasmo: szersze niż masztu antenowego więcej niż 30%, dobre dla DRM
- rozkład napięcia antenowego: bardzo mały w porównaniu do napięcia u podstawy masztu antenowego
- bliskie pole indukcyjne: bardzo małe w porównaniu do towarzyszącego antenie wieżowej
- zysk 5 – 7 dB/ (1 μ V/m) większy niż anteny ćwierćfalowej
- przydatna dla transmisji danych i DRM
- brak zaników
- 24 godzinna usługa z pełną mocą
- brak fal jonosferycznych
- brak zniekształceń częstotliwościowych.

Szczegółowy opis anteny CFA przedstawiony został w pracy nr której wykonawcą jest dr inż. Aleksander Makiedoński.

3.8. Ocena anteny CFA

Najbardziej wnikliwe badania anteny CFA przeprowadził Trainotti, [20], który uważa, że anteny tego typu były początkowo atrakcyjne z powodu braku informacji o ich działaniu. Antena ta nie jest niczym nowym i jej zachowanie jest podobne do krótkiej anteny o tej samej wysokości.

Najpoważniejszym jego zarzutem i nie tylko jego, [2], jest znana własność fizyczna, iż każda metalowa struktura produkuje swoje własne pola E i H. Te systemy, zdaniem Trainottiego są rodzajem tablicy, gdzie obie promieniujące struktury pracują razem z silnym sprzężeniem między nimi.

CFA jest zasadniczo połączeniem dwóch zamkniętych antenowych elementów niekonwencjonalnie podzielonych i zasilanych oddzielnie. Pomiar wykazały, że każda z części tej anteny może być wykorzystana jako oddzielna struktura promieniująca pole elektromagnetyczne [20]. A w przypadku dwóch oddzielnych zasileń, jak to ma miejsce w CFA, wypadkowe pole promieniowane przez taki system jest wynikiem złożenia pól wytwarzanych przez każdą z tych części.

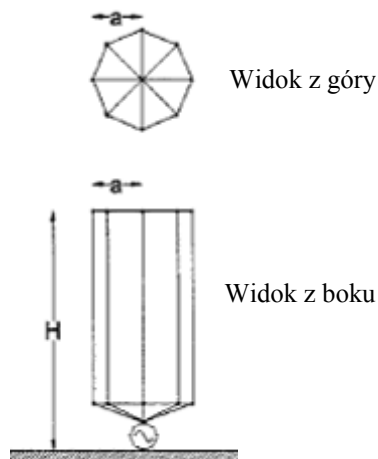
Okazuje się, że nie jest ważna wysokość cylindra, z tym, że zbytne zmniejszenie tej wysokości pogarsza skuteczność promieniowania z powodu małej rezystancji. Nieważne są rozmiary powierzchni D, ponieważ nie powodują wzrostu promieniowania. Natężenie pola w odległości kilku długości fali jest takie samo, kiedy powierzchnia D jest i kiedy jej nie ma.

Występowanie dwóch niezależnie zasilanych struktur komplikuje system dopasowania zapewniający m.in. przesunięcie fazy o 90° między nimi. Nie powoduje również wzrostu zysku w porównaniu z bardzo krótką anteną. W związku z tym Trainotti [20] proponuje wyeliminowanie płaszczyzny D i wykorzystanie tylko jednego systemu zasilania. Spowoduje to wzrost sprawności anteny.

W przeprowadzonych obliczeniach ustalono, że dla obu struktur anteny CFA widoczne są niskie wartości rezystancji i wysokie pojemnościowej reaktancji bliskie wartościom monopola o wysokościach $0,0333\lambda$ i $0,0667\lambda$ [20]. Podobne wartości otrzymano dla cylindrycznego monopola. Z tego powodu jej system strojenia potrzebuje bardzo wysokiej dobroci indukcyjności i pojemności oraz bardzo dobrej uziemiającej powierzchni metalowej.

Charakterystyka promieniowania jest funkcją cosinusa w płaszczyźnie kąta elewacji i z tych powodów ta antena jest przydatna dla małych mocy, mniejszych niż 10 kW, gdzie obszar dziennego pokrycia jest ograniczony i własności anteny antyzanikowe nie są brane pod uwagę. Dla większych mocy, aby otrzymać maksymalną sprawność promieniowania i lepsze własności antyzanikowe, powinny być użyte: bądź standardowy monopól bądź standardowy dipol zbliżony do pół długości. Obliczona charakterystyka promieniowania anteny CFA w płaszczyźnie kąta elewacji nie jest prostą funkcją cosinusa, z maksimum na poziomie gruntu. Promieniowana moc maleje do połowy (-3 dB) dla kąta elewacji 45° , czyli tak jak zachowuje się moc promieniowana przez bardzo krótką pionową antenę. Jest ona proporcjonalna do kwadratu pola E lub H. W zastosowaniach dla radiofonii średniofalowej, dla dużych kątów elewacji, moc promieniowana powinna być możliwie najmniejsza ze względu na ograniczenie emisji fal jonosferycznych. Warunków tych antena CFA nie spełnia [20]. Opinia ta jest niezgodna z informacjami rozpowszechnianymi przez [20]. Według tych informacji antena promieniuje minimalnie w kierunku jonosfery. Ta rozbieżność wymaga sprawdzenia.

Pomiary i analiza przeprowadzone dla anteny CFA [20] pokazują, że antena ta zachowuje się podobnie jak cylindryczna krótką antena o tej samej wysokości i zasilana od góry (Rys. 13). Z tych powodów jest zalecane wykorzystywanie cylindrycznej krótkiej anteny, która posiada prostszy system dostrojczy. W Tabl. 1 przedstawiono porównanie zysków i sprawności anteny CFA i krótkiej anteny w odniesieniu do takich samych parametrów anteny ćwierćfalowej [20].



Rys. 13. Krótką antena cylindryczna, [20]

Tabl. 1. Porównanie zysków G i sprawności anten r

Antena umieszczona nad metalową powierzchnią: dla $\frac{H}{\lambda} = 0,0667$, $f = 20\text{MHz}$				
Typ anteny	$\frac{H}{a}$	$\frac{2r}{H}$	G	r
			dBi	%
Antena umieszczona nad metalową powierzchnią: dla $\frac{H}{\lambda} = 0,0667$ i $f = 20\text{MHz}$				
Antena ćwierćfalowa	-	-	5,0	97
Antena krótka	80	1	4,3	90
	80	0	0,2	35
	13,33	1	3,3	71
Antena CFA	13,33	0,4	2,5	59
Antena umieszczona nad rzeczywistą ziemią: dla $\frac{H}{\lambda} = 0,0667$, $f = 20\text{MHz}$ i $r_{uz} = 0,0667$				
Antena ćwierćfalowa	-	-	2,6	51,3
Antena krótka	80	1	-5	10,5
	80	0	-14	1,3
	13,33	1	-6,0	8,4
Antena CFA	13,33	0,4	-8	5,3

gdzie:

f – częstotliwość [MHz]

λ - długość fali [m],

G - zysk [dBi]

r - sprawność [%]

a, H, r – rozmiary anten (Rys. 12, Rys. 13).

Zmierzona charakterystyka promieniowania anteny CFA [20] wykazuje się kierunkowością i zyskiem. Podobnie jak innych krótkich anteny jej zysk zależy ściśle od własności elektrycznych gruntu.

Trzeba przy tym pamiętać, że krótkie anteny mogą być znacznie ulepszone za pomocą doskonale przewodzącej przeciwwagi i zastosowaniu górnego zasilania, ale nigdy nie mogą być bardziej sprawne lub wykonane bardziej optymalnie niż krótka antena lub dipol o długości bliskiej połowie długości fali.

4. Zasady projektowania

4.1. Przydatność anteny CFA

Z analizy wyników badań dotyczących anteny CFA przedstawionych m.in. w [2], [20] wynikają dla niej raczej niekorzystne wnioski. Antena CFA nie spełniła oczekiwanych nadziei wyrażonych w założeniach tej pracy. Spodziewano się, że ta antena oprócz stosunkowo małych rozmiarów w porównaniu z tradycyjnymi masztami posiada lepsze od nich parametry antenowe i łatwo jest je zmieniać przez zmianę jej parametrów elektrycznych.

Tak nie jest. Ze spodziewanych korzyści pozostały jedynie jej małe rozmiary i ewentualnie w miarę spłaszczona charakterystyka w płaszczyźnie pionowej, dla kątów elewacji większych niż 45° .

Pozostają na razie do wykorzystania tradycyjne anteny i ich ulepszone wersje.

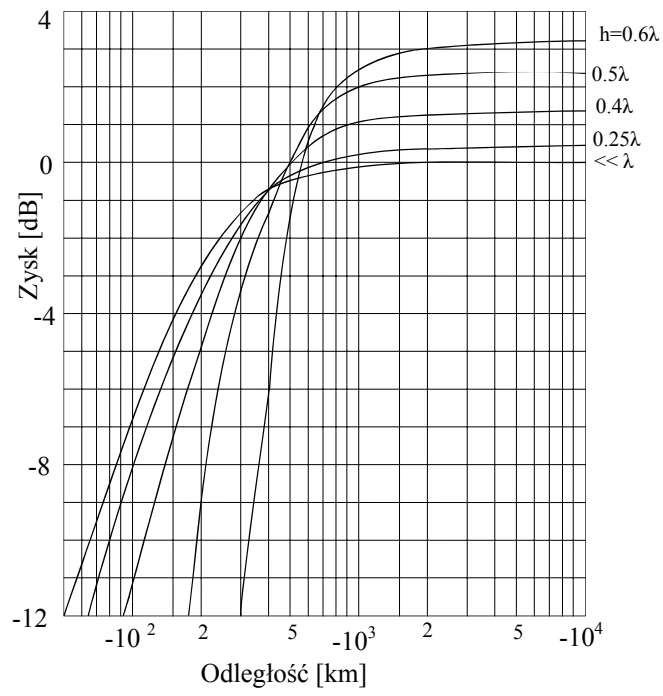
4.2. Charakterystyki promieniowania anten

W procesie projektowania należy rozważyć, że charakterystyka promieniowania w płaszczyźnie pionowej, biorąc pod uwagę nieidealną przewodność gruntu, ma tendencję zmiany w funkcji odległości od anteny, ponieważ dla każdego punktu przestrzeni rozkład pola może być rozważany pod kątem występowania dwóch składowych: pierwszej związanej z falą przestrzenną i drugiej z falą powierzchniową. O ile ta pierwsza składowa maleje z proporcjonalnie do odwrotności odległości to fala powierzchniowa jest szybciej tłumiona.

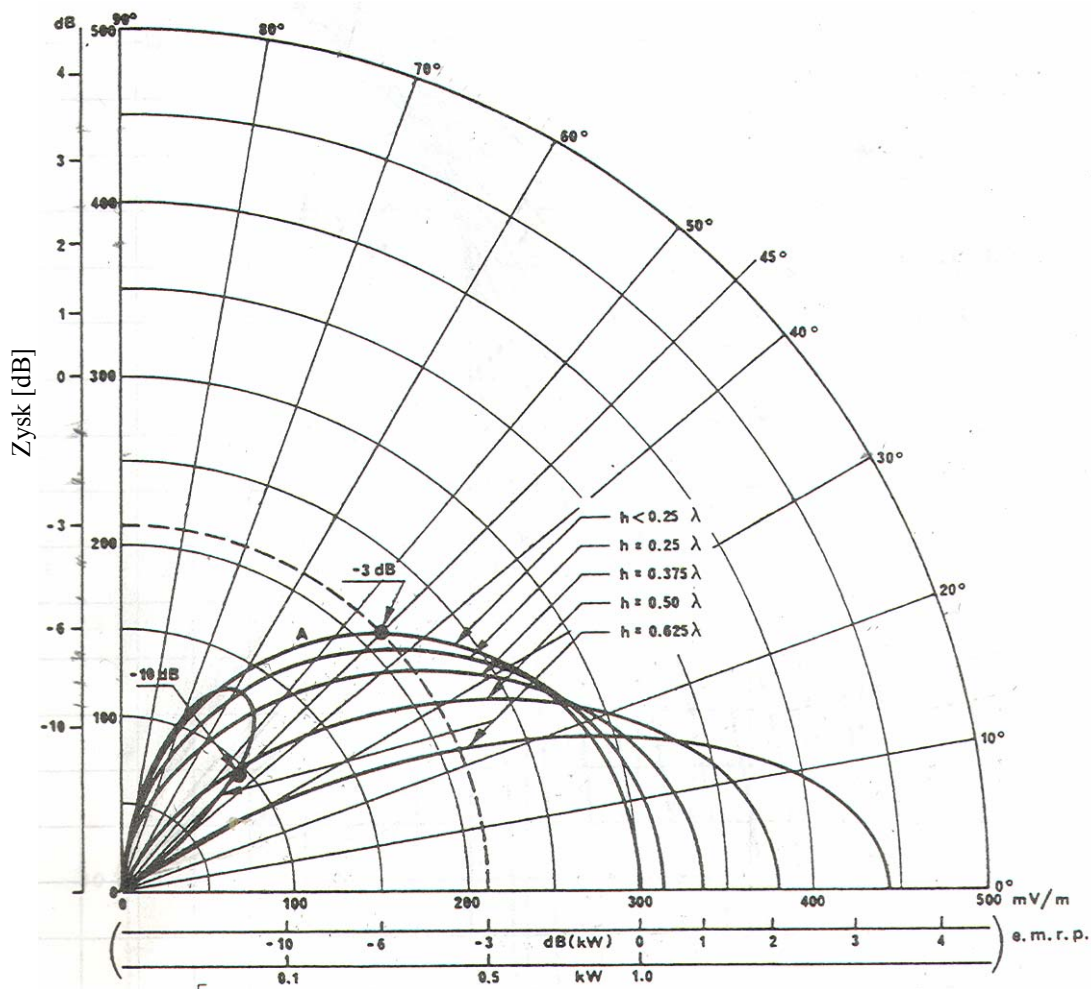
Projektowanie zasięgów stacji radiofonicznych pracujących w zakresie średniofalowym wykorzystujących omówione wyżej anteny sprowadza się, zatem do obliczenia zasięgów zarówno na fali powierzchniowej jak i na fali jonosferycznej. W obliczeniach niezbędna jest znajomość charakterystyk promieniowania planowanych anten w płaszczyźnie poziomej i w płaszczyźnie pionowej.

Dla stacji, które pracują w sieci stacji średniofalowej od dawna, zgodnie z listą stacji z Planu GE75 [10], określone są charakterystyki w płaszczyźnie poziomej. Dla anten z charakterystyką dookólną zysk G_H jest równy zero, zaś dla anten kierunkowych jest funkcją azymutu.

Zysk anten w płaszczyźnie pionowej jest funkcją długości trasy fali radiowej i jest przedstawiony w postaci krzywych w Zaleceniu ITU [14], dla różnych wartości stosunku h/λ od $\ll 0,1$ do $0,6$ Rys. 14. Te same charakterystyki w funkcji kąta elewacji przedstawia Rys. 15, [5].



Rys. 14. Zyski prostych anten pionowych nad elektrycznie idealnym gruntem w funkcji długości trasy fali radiowej, [14]



Rys. 15. Wartości mocy promieniowanej i natężenia pola elektrycznego w funkcji kąta elewacji wyznaczone dla prostej pionowej anteny w odległości 1 km od niej, dla różnych jej wysokości i dla 1 kW mocy promieniowanej przez tę antenę [5]

W Tabl. 2. przedstawiono zależności długości trasy fali radiowej od nadajnika do odbiornika od wartości kątów elewacji. Te zależności obliczono przy założeniu, że promień Ziemi wynosi 6373 km, wysokość warstwy E, od której odbija się fala radiowa jest równa 96,5 km. Długość trasy jest liczona po powierzchni wielkiego koła Ziemi dla danego azymutu [5].

Tabl. 2. Przykładowe zależności między długością trasy a kątem elewacji

d [km]	40	50	60	70	100	200	270	300	500	1000	2000
Θ [°]	78,11	75,26	72,47	69,77	62,21	43,31	34,75	31,88	19,84	8,59	0,96

4.3. Projektowanie zasięgów stacji radiofonicznych

Zasady projektowania zasięgu stacji radiofonicznej zostały określone przez ITU, a wcześniej przez CCIR i można je znaleźć w odpowiednich Zaleceniach. Wytyczne zalecane dla

prognozowania zasięgów fali powierzchniowej zawiera Zalecenie ITU w [11], a dla zasięgów fali jonosferycznej Zalecenie ITU w [14].

Na podstawie tych zaleceń zostało wykonane w IŁ oprogramowanie pod nazwą AnaZas, które w swoim zakresie działań obejmuje prognozy zasięgów stacji radiofonicznej pracującej w systemie analogowym AM jak i w systemie cyfrowym DRM [8]. W obliczeniach uwzględnia się sytuację interferencyjną powstającą w wyniku pracy, innych stacji wspólnie i sąsiednio-kanalowych z otoczenia stacji użytecznej o promieniu 3300 km pracujących z modulacją analogową lub cyfrową.

W dotychczasowych algorytmach oprogramowania AnaZas [8], nie uwzględniano możliwości wytyczenia obszaru wahań i zaników sygnału powodowanych zbliżonymi wartościami natężeń pól fali powierzchniowej i jonosferycznej (1.1). Natomiast za pomocą wspomnianego oprogramowania można wyznaczyć oddzielnie natężenia pól dla każdej z tych fal. Wyznaczenie granic przedziału odległości z zanikami sprowadza się do wyznaczenia granicznego natężenia pola reprezentowanego na Rys. 1 prostą E_{gr} , która w punktach przecięcia się jej z krzywymi reprezentującymi zmienność natężenia pola fali powierzchniowej i jonosferycznej wyznacza odpowiedni punkty R1 i R2. W przedziale odległości zawartym między tymi punktami mogą występować zaniki selektywne. Jest to przedział odległości, w którym jakość odbieranych audycji radiofonicznych będzie gorsza od założonej.

Wartość natężenia granicznego E_{gr} jest wyznaczana ze wzoru [4]:

$$E_{gr} = E_{grmin} - V, \quad (6)$$

gdzie:

E_{grmin} – minimalne graniczne natężenie pola wymagane dla ustalonej jakości odbioru w obecności zakłóceń atmosferycznych, przemysłowych i szumów własnych odbiornika, [dB/(1 μ V/m)]; ta wartość jest wyznaczana w obliczeniach za pomocą oprogramowania AnaZas;

V – siła symomotoryczna (CFM) nadajnika, [dB/300V].

$$V = P + G_V + G_H - P_{str}, \quad (7)$$

gdzie:

P – moc promieniowana nadajnika [dB/1kW],

G_V – zysk anteny nadawczej w płaszczyźnie pionowej [dB];

G_H – zysk anteny nadawczej w płaszczyźnie poziomej, w funkcji azymutu

P_{str} – moc strat, [dB/1kW]

$$P_{str} = P(1 - \eta_f \eta_a \eta_d),$$

η_f, η_a, η_d – sprawności, odpowiednio fidera, anteny i układów dostrojczych.

Przy odbiorze sygnałów cyfrowych DRM zaniki sygnałów mogą być w mniejszym stopniu szkodliwe, niż ma to miejsce w przypadku odbioru sygnałów z modulacją analogową AM. Skutki selektywnych zaników mogą być poprawiane przez odbiornik. Wynika to z użycia formatu sygnałowego OFDM połączonego z czasowym częstotliwościowym przeplataniem razem z kodem korekcji błędów.

Mimo tych udogodnień w transmisji sygnału cyfrowego zaleca się, w procesie projektowania, wyznaczenie obszaru pojawiania się zaników dla stacji pracujących z dużą mocą.

Dla stacji małej mocy rzędu 1 kW, pracujących z prostymi antenami krótkimi, zjawisko wahań i zaników sygnału radiofonicznego nie występuje ze względu na duże tłumienie promieniowanej przez antenę fali przestrzennej i w związku z tym można uważać, że w rejonie występowania fali powierzchniowej nie pojawi się fala jonosferyczna z odpowiednim natężeniem pola.

Położenie obszarów wahań i zaników sygnału zależy od zastosowanego systemu antenowego, a dokładnie od jego charakterystyk promieniowania i zysku.

4.4. Uwagi

Jedną z zalet cyfrowego systemu DRM, który korzysta ze wspomnianej wyżej techniki formowania sygnału OFDM, jest możliwość odbioru sygnałów przychodzących z różnymi opóźnieniami, pod warunkiem, że te opóźnienia nie przekraczają odstępu ochronnego Tabl. 3. Uwaga ta powinna być brana pod uwagę przy projektowaniu zasięgów stacji radiofonicznych a w konsekwencji przy projektowaniu charakterystyk anten.

Tabl. 3. Wartości parametrów OFDM [4]:

Tryby odpornościowe	Czas trwania T_u	Odstęp między nośnymi $1/T_u$	Czas trwania odstępu ochronnego T_g	Czas trwania symbolu $T_s=T_u+T_g$	T_g/T_u	Liczba symboli w ramce N_s
A	24 ms	$41^{2/3}$ Hz	2,66 ms	26,66 ms	1/9	15
B	21,33 ms	$46^{7/8}$ Hz	5,33 ms	26,66 ms	1/4	15
C	14,66 ms	$68^{2/11}$ Hz	5,33 ms	20,0 ms	4/11	20
D	9,33 ms	$107^{1/7}$ Hz	7,33 ms	16,66 ms	11/14	24

Projektowanie zasięgów anten związane jest z decyzją wyboru fali, od której zależeć będzie pokrycie danego obszaru.

Jednym z kroków w projektowaniu średniofalowej anteny będącej zarówno pojedynczym elementem promieniującym, jak i systemem antenowym jest wyznaczenie optymalnej wysokości masztu, która koresponduje z optymalną charakterystyką promieniowania [19]. Wyznaczona optymalna wysokość powinna zapewnić maksymalne pokrycie obszaru w wybranej porze doby.

Przy projektowaniu anten pracujących z systemem DRM należy zadbać o szerokość przenoszonego pasma.

Literatura

- [1] Balanis C.A.: *Antenna theory. Analysis and design*. Wiley-Interscience. 2005 John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
- [2] Belrose J.S.: *Characteristics of the crossed field antenna obtained by numerical and experimental modeling*. Communications Research Centre Canada. IEEE 2005

- [3] Bibhas R.D.: *To see beyond electromagnetic waves. TransMaxwellian Physics.* FreeBook, 2004. www.geocities.com/bibhasde/radiocomm.html
- [4] Bjełousow S.P.: *Sredniowolnowyje antienny c regulirymym raspredjeljeniem toka.* Swjaz, Moskwa, 1974.
- [5] CCIR: *Conclusion of the interim meeting of study group 6, (Propagation in ionized media).* 1988, Geneva. Doc.6/175-E
- [6] DRM: *Broadcasters' user manual.* DRM project Office, Ganeva, 2006
- [7] Dusiński A., Wielowieyska E.: *Prognozowanie zasięgów dla radiofonii rozsiewczej pracującej w systemie DRM w zakresie fal średnich i długich.* Etap 3: Sprawozdanie z pracy nr 01300013: *Platforma cyfrowa mediów elektronicznych w Polsce.* IŁ, Warszawa, 2003.
- [8] Dusiński A.: *Algorytm oprogramowania analizy propagacyjno-sieciowej w zakresach fal średnich i długich w systemach AM i DRM.* Załącznik do opr. *Problemy propagacyjne w środkach przekazu radiowego.* Etap 3.IŁ, Warszawa, 2004
- [9] ITU: *A new and simple mf antenna with alternative cardioidal or nondirectional radiation pattern.* Special Rapporteur of SRG 10A-1, 1998.Doc. ITU-R 10A/18-E
- [10] ITU: *Final Acts of the Regional Administrative LF/MF Broadcasting Conference (Regions 1 and 3).* Geneva 1975. ITU, Geneva, 1976.
- [11] ITU: *Ground-Wave propagation curves for frequencies.* 1992. ITU-R P.368-7
- [12] ITU: *LF and MF transmitting antennas characteristics and diagrams,* 2001. Rec. ITU-R BS.1386-1.
- [13] ITU: *Planning parameters" for digital sound broadcasting at frequencies below 30 MHz,* 2003. Rec. ITU-R BS.1615
- [14] ITU: *Prediction of sky-wave field strength at frequencies between about 150 and 1700 kHz.* 2003. Rec. ITU-R P.1147-2
- [15] Jarkowski J, Dusiński A., Wielowieyska E.: *Koncepcja uruchomienia w Polsce emisji cyfrowej DRM.* Sprawozdanie z pracy nr 80407718. IŁ, Warszawa, 2003
- [16] Kabbarly Antenna Technology Co. Crossed Field Antenna (CFA). www.crossedfieldantenna.com
- [17] Kaszpirowskij W. E., Kuzubor F.A.: *Rasprastranienie srednich radiowołn ziemnym łuczom.* Swjaz, Moskwa, 1971.
- [18] Lisicki W.: *Propagacja fal radiowych.* WKiŁ, Warszawa 1962.
- [19] Pacini G.P.: *Relationship between the electrical height of medium-wave antenna and its mechanical dimensions.* IEEE Trans. on Broadcasting, t.35, nr. 2 1989
- [20] Trainotti V.: *Short medium frequency AM antennas.* IEEE Transactions on broadcasting, vol. 47, no. 3, 2001
- [21] United States Paten:5,155,495: Maurice Hately & Fathi Kabbarly:*Crossed Field Antenna.* www.rexresearch.com/xfldant.htm.