

Rozdział 8

Anteny

8.1. Wprowadzenie

Przestrzeń nad powierzchnią naszej planety wykorzystujemy intensywnie do transmisji fal radiowych. Fale te niosą ogromną ilość strumieni informacji, których liczba w pewnych momentach zbliża się do miliarda. Ich transmisja jest możliwa dzięki antenom, w które wyposażono nadajniki i odbiorniki. Za sprawą wieloletnich wysiłków inżynierii radiowej opanowane zostały techniki transmisji antena – antena w pasmach częstotliwości od fal metrowych do fal milimetrycznych. Wielka liczba użytkowników skutkuje przeciążeniem widma promieniowania radiowego, co powoduje, że coraz surowsze wymagania stawiamy parametrom stosowanych anten.

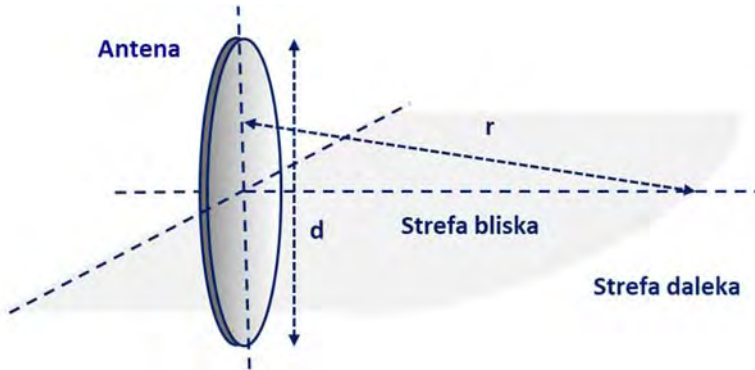
Do transmisji informacji wykorzystujemy też systemy transmisji satelitarnej. Dodajmy, że radioastronomowie wykorzystują bardzo złożone i czułe systemy antenowe do odbioru fal radiowych z bardzo odległych galaktyk, aby wiedzieć coraz więcej o otaczającym nas wszechświecie.

W rozdziale 8 przedstawione zostaną podstawowe parametry anten i opisane najpopularniejsze typy anten stosowanych w różnych systemach transmisyjnych. Więcej informacji znajdzie Czytelnik w rozległej literaturze poświęconej antenom.

8.2. Parametry anten

8.2.1. Pole EM wokół anteny

Antena jest przyrządem, który falę elektromagnetyczną, docierającą do niego przewodniczącą falową (linią współosiową, falowodem itp.), wypromieniowuje do otaczającej ją wolnej przestrzeni także w postaci fali elektromagnetycznej. Taką funkcję pełni antena w nadajniku. W odbiorniku odwrotnie, część energii docierającej z przestrzeni antena skierowuje do dołączonej do niej przewodniczącej falowej. W takim rozumieniu działania antena jest dwuwrotnikiem, chociaż w przypadku wolnej przestrzeni trudno określić położenie płaszczyzny odniesienia. Antena jest dwuwrotnikiem odwracalnym. Jej sprawność i parametry są takie same, niezależnie od tego, czy bierzemy pod uwagę emisję promieniowania, czy też odbiór. Zasada odwracalności oznacza, że wzmocnienie, szerokość wiązki i polaryzacja są takie same dla obu funkcji: nadawania i odbioru. Układ dwóch anten nadajnika i odbiornika jest także dwuwrotnikiem odwracalnym. Parametry tego układu są jednakowe, niezależnie od tego, w którą stronę przesyłany jest sygnał mikrofalowy. Straty mocy są jednakowe dla transmisji w obu kierunkach.



Rys. 8.1. Ilustracja granicy między polem strefy bliskiej a polem strefy dalekiej.

Przestrzeń otaczającą antenę można podzielić na trzy obszary, zgodnie z właściwościami pola promieniowania. Ponieważ pole zmienia się płynnie, granice między obszarami są mniej lub bardziej arbitralne. Obszar najbliższy powierzchni promieniującej anteny nazywany jest obszarem indukcji. W tym obszarze składniki pola zależą bezpośrednio od rozkładu prądów płynących na powierzchniach metalowych elementów anteny.

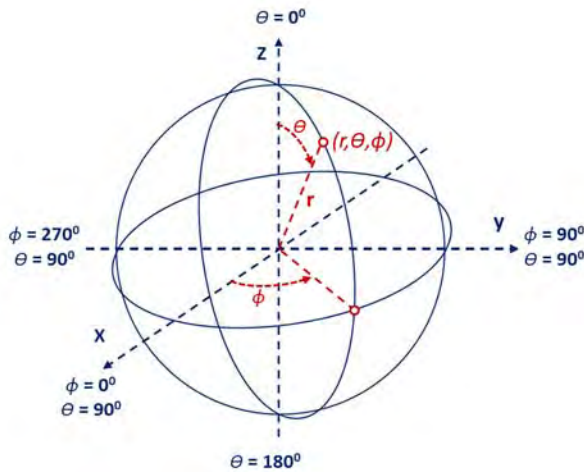
Wraz ze wzrostem odległości dominującym staje się pole wypromieniowane przez antenę. Kolejnym jest obszar tzw. strefy bliskiej, zwany strefą Fresnela. W miarę oddalania od anteny odległość punktu obserwacji od jej powierzchni staje się wielokrotnie większa od długości fali. Przechodzimy do tzw. strefy dalekiej, zwanej też strefą Fraunhofera. Przyjęto, że granicę między strefą bliską a strefą daleką – patrz rys. 8.1 – określa wartość odległości r opisanej zależnością (8-1),

$$r = \frac{2d^2}{\lambda}; \quad (8-1)$$

przy czym d jest największym wymiarem anteny, prostopadłym do kierunku promieniowania, a λ jest długością promieniowanej fali.

8.2.2. Charakterystyki promieniowania anteny

Najważniejsze informacje o działaniu anteny i jej kierunkowych właściwościach zawiera charakterystyka promieniowania. Rozkład natężeń pól elektrycznego E i magnetycznego H można przedstawiać w rozmaitych układach współrzędnych. Popularny jest układ współrzędnych prostokątnych (x, y, z) . Do analizy i pomiarów anten przyjęto jednak stosować układ współrzędnych sferycznych, w których punkt określony jest następującymi współrzędnymi: odległość r , kąt elewacji θ zmienny w granicach od 0° do 180° oraz kąt azymutalny ϕ zmienny w granicach od 0° do 360° . Układ współrzędnych sferycznych pokazano na rys. 8.2.



Rys. 8.2. Układ współrzędnych sferycznych stosowany do analizy i pomiarów pól promieniowania anten w strefie dalekiej.

Charakterystyka promieniowania opisuje w przestrzeni rozkład powierzchniowej gęstości mocy $S(r, \theta, \phi)$ wyrażonej w W/m^2 , przenoszonej przez pole elektromagnetyczne. Gęstość mocy powierzchniowej znajdujemy, obliczając rozkład wektora Poyntinga, zgodnie z zależnością (8-2).

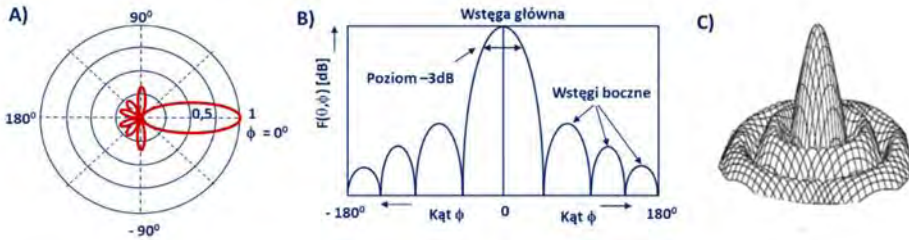
$$\vec{S}(r, \theta, \phi) = \vec{E}(r, \theta, \phi) \times \vec{H}(r, \theta, \phi); \quad (8-2)$$

Długość wektora \vec{S} określa powierzchniową gęstość strumienia mocy, a jego kierunek jest zgodny z prędkością fali EM.

Do określenia właściwości anteny można wykorzystać gęstość mocy promieniowanej fali na jednostkę kąta bryłowego – steradiana F [W/sr]. Obie gęstości związane są prostą zależnością (8-3).

$$F_{[W/sr]}(\theta, \phi) = r^2 |\vec{E} \times \vec{H}| = r^2 S_{[W/m^2]}(r, \theta, \phi); \quad (8-3)$$

Charakterystyki promieniowania $F(\theta, \phi)$ anteny przedstawiane są w rozmaity sposób. Może to być układ biegunowy, jak pokazano na rys. 8.3A, bądź układ prostokątny, jak na rys. 8.3B. W niektórych przypadkach charakterystyki anten prezentowane są w układzie trójwymiarowym, co pokazano na rys. 8.3C. Wartości $F(\theta, \phi)$ anten mogą być prezentowane w mierze liniowej lub logarytmicznej.



Rys. 8.3. Techniki prezentacji charakterystyk promieniowania anten. **A)** Charakterystyka w układzie biegunowym. **B)** Charakterystyka w układzie prostokątnym. **C)** Charakterystyka w układzie trójwymiarowym.

8.2.3. Wzmocnienie i kierunkowość anteny

Definiowanie parametrów anteny ułatwia wprowadzenie pojęcia anteny dookólnej, albo izotropowej. Przyjmijmy, że anteny te promieniają moc P_A , przy czym w każdym kierunku jednakową. Przy takim założeniu, w odległości r od punktowo umieszczonej anteny, gęstość mocy na jednostkę powierzchni S_0 [W/m^2] zapisuje się prostym wzorem:

$$S_{0[\text{W}/\text{m}^2]} = \frac{P_A}{4\pi r^2}; \quad (8-4)$$

Równie prostym wzorem można określić kątową gęstość mocy promieniowania F_0 [W/sr] na jednostkę kąta bryłowego.

$$F_{0[\text{W}/\text{sr}]} = \frac{P_A}{4\pi} = r^2 S_0; \quad (8-5)$$

Wymagania stawiane konstruowanym antenom wskazują zwykle na preferowany kierunek promieniowania, w który należy skierować większość emitowanej mocy. W tym przypadku gęstość kątowna wypromieniowanej mocy jest funkcją współrzędnych kątowych $F(\theta, \phi)$. Otrzymujemy wtedy antenę kierunkową, a kątowna gęstość mocy w wybranym kierunku jest maksymalna $F_{MAX}(\theta, \phi)$. Porównanie maksymalnych wartości powierzchniowej gęstości mocy $S_{MAX}(r, \theta, \phi)$ i kątowej gęstości mocy $F_{MAX}(\theta, \phi)$ rzeczywistej anteny, z odpowiednimi gęstościami anteny izotropowej, prowadzi do definicji kierunkowości D anteny, zgodnie z zależnością (8-6)

$$D = \frac{S_{MAX}}{S_0} = \frac{F_{MAX}}{F_0}; \quad (8-6)$$

Dla niektórych typów anten podaje się wartość szerokości wiązki promieniowania jako kąt, dla którego wartość kątowej gęstości mocy $F(\theta, \phi)$ spada do połowy wartości maksymalnej $F_{MAX}(\theta, \phi)$.

Moc P_A wypromieniowana przez antenę jest zwykle mniejsza od mocy P_{WY} kierowanej do niej przewodniczą falową. Część mocy pochłaniana jest przez dielektryki i przewody metalowe. Jednym z istotnych parametrów anteny jest jej sprawność η_A , definiowana zależnością (8-7).

$$P_A = \eta_A P_{WY}; \quad (8-7)$$

Z kierunkowością D anteny ściśle związane jest wzmocnienie G . Wartość G uwzględnia straty mocy anteny, opisane jej sprawnością, zgodnie z zależnością (8-8).

$$G = \eta_A D; \quad (8-8)$$

Wartości kierunkowości D i wzmocnienia G podawane są bądź w mierze liniowej, bądź logarytmicznej w decybelach.

Dla anten odbiorczych definiuje się powierzchnię skuteczną $A_{ef}[\text{m}^2]$ w oparciu o moc P_0 odebraną przez antenę umieszczoną w miejscu, gdzie gęstość mocy wynosi S [W/m^2].

$$P_0 = A_{ef} S; \quad (8-9)$$

$$A_{ef}[\text{m}^2](\theta, \phi) = \frac{\lambda_{[m]}^2}{4\pi} G(\theta, \phi);$$

Dla anten izotropowych $A_{ef} = \lambda^2/(4\pi)$.

Moc wypromieniowana przez antenę jest częścią mocy doprowadzonej do niej przewodniczą falową: kablem współosiowym, falowodem, bądź odcinkiem linii mikropaskowej. W każdym przypadku ważnym parametrem jest dopasowanie impedancji anteny do impedancji przewodnicy falowej. Poziom mocy odbitej wpływa na wartość sprawności anteny. Anteny nadawcze są zwykle bardzo starannie dopasowane w paśmie pracy.

Pasma pracy jest jednym z ważniejszych parametrów anteny. Jest oczywiste, że ze zmianą częstotliwości zmieniają się parametry anteny. Szerokość pasma pracy anteny można definiować w różny sposób. Najczęściej w paśmie pracy anteny wybrane jej parametry, takie jak wzmocnienie, szerokość wiązki, dopasowanie czy też poziom wstęg bocznych, mieszczą się w określonych granicach. W kolejnym punkcie rozdziału opisane zostaną wybrane i powszechnie stosowane konstrukcje anten. Parametry niektórych z nich zmieniają się szybko ze zmianą częstotliwości, jednak większość może pracować w szerokim zakresie częstotliwości.

8.3. Przykłady konstrukcji anten

8.3.1. Anteny dipolowe

Antenę dipolową jako źródło promieniowania elektromagnetycznego opisał w drugiej połowie XIX wieku Heinrich Hertz, wykorzystując równania Maxwella. Anteny dipolowe należą do grupy anten przewodowych i są nadal stosowane z powodzeniem dla częstotliwości

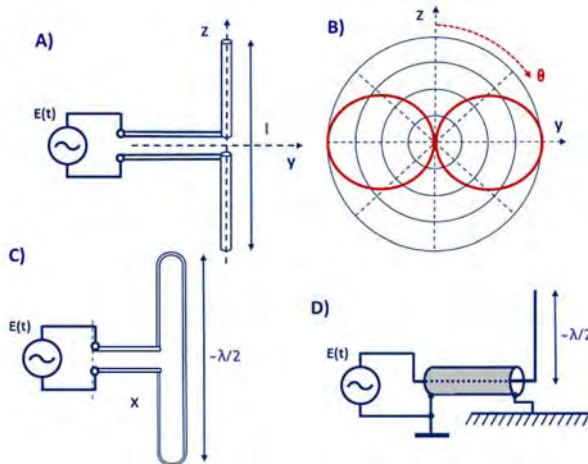
poniżej 1 GHz. Antenę dipolową tworzą dwa pręty metalowe umieszczone symetrycznie w stosunku do przewodnicy falowej, doprowadzającej sygnał, który zostanie wypromieniowany. Układ przewodnica – antena dipolowa pokazano na rys. 8.4A.

Przewodnica falowa doprowadzająca moc do anteny widzi impedancję $Z_A = R_A + jX_A$. Część rzeczywista tej impedancji reprezentuje moc wypromieniowaną przez antenę. Jeśli długość l anteny dipolowej jest mniejsza od $\lambda/4$ rezystancję R_A można z dobrym przybliżeniem obliczyć z zależności (8-10).

$$R_{A[\Omega]} \approx 20\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 ; \quad (8-10)$$

W klasycznym przypadku długość prętów metalowych tworzących antenę jest równa pół fali $\lambda/2$. Wtedy rezystancja $R_A = 73 \Omega$. Część urojona X_A ma charakter indukcyjny i niewielkie skrócenie anteny sprowadza ją do zera.

Na rys. 8.4B pokazano charakterystykę promieniowania anteny dipolowej w płaszczyźnie pionowej z . Gęstość wypromieniowanej mocy jest proporcjonalna do $S \sim \sin^2\theta$. Maksimum gęstości mocy antena wypromieniowuje w płaszczyźnie prostopadłej do przewodów dipola, dla $\theta = 90^\circ$. Obliczone wzmocnienie anteny wynosi $G = 1,64$. Podane w decybelach – $G_{[\text{dB}]} = 2,15 \text{ dB}$. Gęstość mocy spada do połowy dla $\theta_{3\text{dB}} = 78^\circ$.



Rys. 8.4. Anteny dipolowe i monopolowe. **A)** Klasyczna antena dipolowa – pręty promieniujące są często krótsze od $\lambda/2$. **B)** Charakterystyka promieniowania anteny dipolowej. **C)** Składana antena dipolowa. **D)** Antena monopolowa, stosowana w pasmach częstotliwości poniżej 300 MHz.

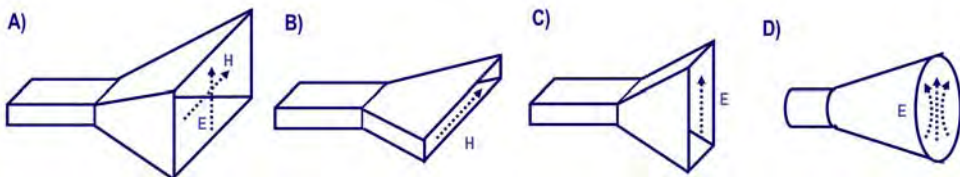
Na rys. 8.4C pokazano układ przewodów anteny zwanej złożonym dipolem. Oba przewody anteny mają długość $\lambda/2$ i podobny rozkład prądu. Z tego powodu pole wytworzone przez dipol złożony ma natężenie dwukrotnie większe niż opisany wcześniej dipol półfalowy, przy tej samej wartości prądu. Zatem moc promieniowania jest czterokrotnie większa

niż w przypadku dipola półfalowego. W związku z tym rezystancja dipola złożonego widziana na zaciskach od strony doprowadzającej moc przewodnicząca wynosi około $R_A \approx 300 \Omega$. Przewodnicząca doprowadzająca moc jest zwykle linia dwuprzewodowa z przewodnikami równoległymi, która przy odpowiednio dobranych wymiarach ma impedancję charakterystyczną $Z_0 = 300 \Omega$.

Antena monopolowa jest prostym prętem metalowym umieszczonym prostopadłe do powierzchni ziemi, jak pokazano na rys. 8.4D. Anteny tego typu stosował w swoich eksperymentach Guglielmo Marconi. Anteny monopolowe promieniują dookoła. Montowane są zwykle na płaszczyźnie uziemionej. Wykorzystywane są w urządzeniach nadawczych i odbiorczych na fale długie, średnie i krótkie.

8.3.2. Anteny tubowe

Anteny tubowe są rodziną anten związanych z techniką falowodową. Są one naturalnym zakończeniem falowodu otwartego do półprzestrzeni. Otwarty koniec falowodu działa jak prosta antena, jednakże z powodu znacznego niedopasowania impedancji sprawność anteny jest mała. Gdy falowód jest zakończony tubą, jedną z pokazanych na rys. 8.5, nieciągłość falowodu otwartego zostaje zastąpiona odcinkiem, który stopniowo transformuje impedancję i ułatwia wypromieniowanie energii.



Rys. 8.5. Falowodowe anteny tubowe. **A)** Antena tubowa w kształcie piramidy. **B)** Antena tubowa z rozszerzeniem w płaszczyźnie H. **C)** Antena tubowa z rozszerzeniem w płaszczyźnie E. **D)** Antena tubowa jako zakończenie falowodu cylindrycznego

Na rys. 8.5B pokazano antenę tubową powstałą przez stopniowe, kilkukrotne powiększenie szerokości falowodu prostokątnego. Odpowiedni dobór proporcji zapewnia dobre dopasowanie. Przy propagacji w falowodzie modu podstawowego TE_{10} rozkład pola stopniowo modyfikuje się, zachowując pionowy kierunek pola elektrycznego.

Podobne rozwiązanie pokazano na rys. 8.5C. Antena tubowa kilkukrotnie zwiększa wysokość falowodu, zachowując jego szerokość. Także w tym przypadku można uzyskać bezodbiciową transmisję mocy sygnału z falowodu do wolnej przestrzeni.

Najpopularniejszym rozwiązaniem kształtu anteny jest tuba piramidalna, pokazana na rys. 8.5A. Przy powiększaniu rozmiarów anteny zachowana jest proporcja między szerokością a wysokością.

Anteny tubowe są szerokopasmowe, pracują w całym pasmie jednomodowej pracy falowodu. Ponadto charakteryzują się dobrą kierunkowością i prostotą struktury. Współcześnie wykorzystywane są w systemach czujników mikrofalowych.

Antenę tubową można zaprojektować na bazie falowodu cylindrycznego. Konstrukcję taką pokazano na rys. 8.5D. Także tym razem można uzyskać dobre dopasowanie. W przypadku falowodu cylindrycznego pasmo jednomodowej pracy jest stosunkowo wąskie.

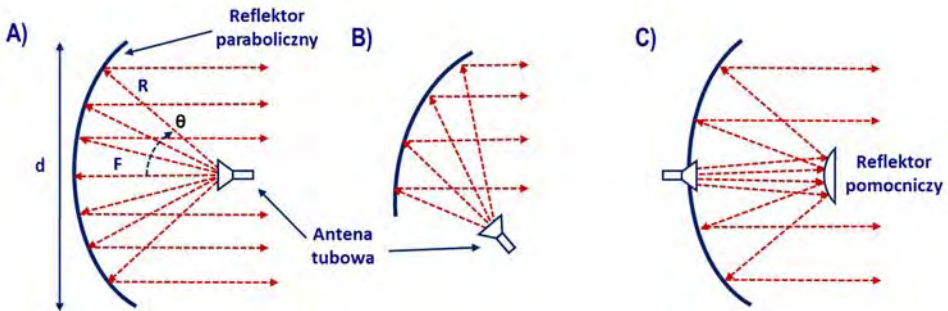
8.3.3. Anteny paraboliczne

Anteny paraboliczne należą do szerokiej grupy anten reflektorowych, w której specjalnie przygotowany element wspomaga proces formowania wiązki promieniowania. Anteny reflektorowe pozwalają uzyskać bardzo duże wartości wzmocnienia przy szerokim pasmie pracy. Z tego względu stosowane są w stałych łączach radiowych, w komunikacji satelitarnej, w odbiornikach telewizji satelitarnej, w systemach radarowych i w radioastronomii. Antena paraboliczna jest najczęściej spotykaną anteną reflektorową.

Na rys. 8.6A pokazano antenę paraboliczną odbijającą promieniowanie umieszczonej w ognisku anteny tubowej. Aby wiązka promieniowania odbitego była równoległa, zgodnie z prostymi zależnościami optyki geometrycznej krzywizna reflektora powinna spełniać równość (8-11).

$$R(\theta) = \frac{2F}{1 + \cos\theta}; \quad (8-11)$$

Oznaczenia odległości $R(\theta)$ i F oraz kąta θ liczonego względem osi symetrii podano na rys. 8.6A.



Rys. 8.6. Anteny z parabolicznym reflektorem. **A)** Antena z parabolicznym reflektorem z anteną tubową umieszczoną w ognisku. **B)** Antena tubowa umieszczona poza wiązką, reflektor jest fragmentem paraboloidy. **C)** Antena typu Casagrain z hiperbolicznym reflektorem pomocniczym.

Skierowanie promieniowania odbitego w jednym kierunku daje możliwość uzyskania dużych wartości kierunkowości D i wzmocnienia G anteny parabolicznej. Wzmocnienie G anteny z dobrym przybliżeniem można obliczyć ze wzoru (8-12). Przyjęto, że sprawność anteny $\eta = 1$. Wartość wzmocnienia rośnie z kwadratem średnicy d anteny i częstotliwości $f = c/\lambda$ transmitowanego sygnału.

$$G \cong \left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)^2; \quad (8-12)$$

Rozmiary anteny tubowej mogą być na tyle duże, że jej obecność wpływa ujemnie na wzmacnienie anteny i poziom listków bocznych. Sytuacje takie mają miejsce, gdy długość fali λ zaczyna być porównywalna ze średnicą anteny, $\lambda/d > 0,1$. W takim przypadku maleje sprawność η anteny i tym samym wzmacnienie. Jedno ze stosowanych rozwiązań pokazano na rys. 8.6B. Antena oświetlająca reflektor umieszczona jest poza ogniskiem reflektora i obszarem uformowanej przez reflektor wiązki. Reflektor w tym przypadku jest fragmentem paraboloidy.

Antenę typu Cassegrain¹ pokazano na rys. 8.6C. W ognisku anteny parabolicznej umieszczono dodatkowy reflektor pomocniczy. Na ten reflektor skierowane jest promieniowanie z anteny tubowej umieszczonej na osi symetrii reflektora głównego. Krzywizna powierzchni reflektora pomocniczego odpowiada hiperboli. Takie rozwiązanie struktury anteny ma kilka zalet w porównaniu z anteną z rys. 8.6A. Reflektor pomocniczy jest prostym konstrukcyjnie elementem, niewymagającym zasilania i doprowadzenia mocy sygnału.



Rys. 8.7. Zdjęcie przedstawia radioteleskop Effelsberg z ruchomą anteną paraboliczną o średnicy 100 metrów. Radioteleskop uruchomiono w roku 1972 w Nadrenii-Westfalii w Niemczech.

Źródło: Raimond Spekking, Effelsberg 100-m Radio Telescope, 25 April 2021, Wikimedia Commons, https://en.wikipedia.org/wiki/Effelsberg_100-m_Radio_Telescope#/media/File:Radioteleskop_Effelsberg-0197.jpg.

¹ Laurent Cassegrain (1629-1693) był francuskim księdzem katolickim, który zastosował dodatkowy reflektor w teleskopie do obserwacji astronomicznych. W uznaniu pomysłowości tego rozwiązania jeden z typów anteny parabolicznej nazwano jego nazwiskiem.

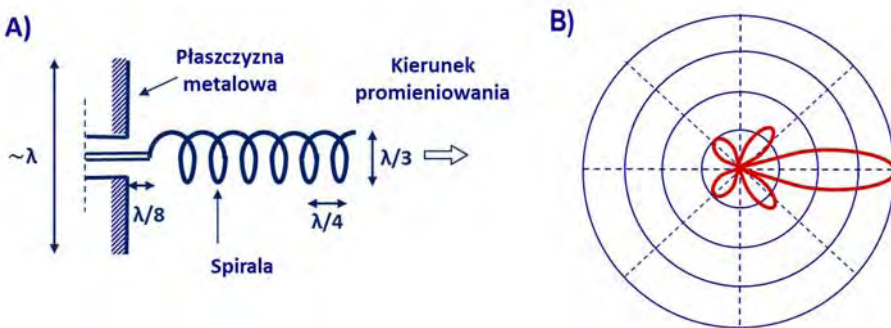
W drugiej połowie XX wieku rozwinięto systemy obserwacji galaktyk i przestrzeni międzygwiazdowej w pasmach radiowych od fal metrowych do milimetrowych. Obserwację w paśmie promieniowania widzialnego, prowadzoną z użyciem teleskopów uzupełniono obserwacją w pasmach radiowych. W krótkim czasie utworzono światową sieć obserwatoriów radioastronomicznych. Głównym narzędziem radioastronomii stała się antena paraboliczna ze względu na możliwości uzyskania bardzo dużych wartości wzmocnień i możliwość obserwacji ruchomych obiektów. Zdjęcie jednego z najważniejszych radioteleskopów z anteną paraboliczną przedstawiono na rys. 8.7.

Czytelnicy zainteresowani tematem radioastronomii znajdą wiele bardzo interesujących publikacji, na przykład na stronie https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_astronomy.

Anteny paraboliczne wykorzystywane są zarówno w systemach nadawczych, jak i w odbiornikach. Ich właściwości są w pełni symetryczne. Stosowane są jako anteny wąskostrumieniowe o dużym wzmocnieniu silnie zależnym od rozmiarów reflektora. Znajdują też zastosowanie w stałych łączach radiowych, w komunikacji satelitarnej, w odbiornikach telewizji satelitarnej, w radarach i w radioastronomii.

8.3.4. Anteny helikalne (śrubowe)

Anteny helikalne / śrubowe stosowane są w szerokim zakresie częstotliwości od 30 MHz do 3 GHz. Konstrukcję takiej anteny pokazano na rys. 8.8A. Składa się ona z luźno zwiniętej spirali, która jest przedłużeniem przewodu wewnętrznego linii współosiowej, oraz metalowego ekranu, który jest rozwinięciem przewodu zewnętrznego linii. Ekran wykonywany jest często z prętów metalowych.



Rys. 8.8. Antena helikalna / śrubowa. **A)** Struktura anteny helikalnej. Rozmiary skoku i średnicy przybliżone. **B)** Charakterystyka promieniowania anteny helikalnej / śrubowej.

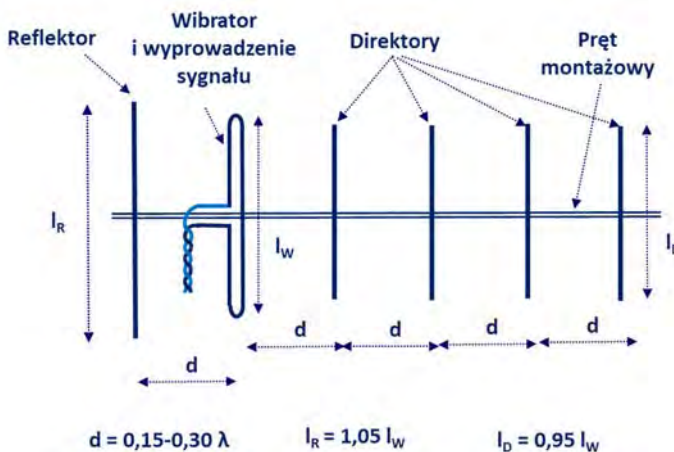
Gdy antena helikalna ma proporcje wymiarów pokazane na rysunku, wartość parametru kierunkowości dochodzi do 15 dB. Antena może pracować w szerokim, przekraczającym 20% paśmie częstotliwości wokół częstotliwości środkowej. Wypromieniowana fala ma

polaryzację kołową. Energia takiej fali jest równo podzielona między składowe pozioma i pionową.

Antena helikalna może pracować w układzie jako pojedyncza bądź w układzie równoległe połączonych kilku anten. Jednym z często spotykanych rozwiązań jest umieszczenie sześciu anten w wierzchołkach sześciokąta foremnego, a siódmej na osi tego układu. Taki układ antenowy posiada dużą kierunkowość i jest używany w systemach łączności satelitarnej.

8.3.5. Anteny Yagi–Uda²

Antena Yagi–Uda jest strukturą wieloelementową, jak pokazano na rys. 8.9. Najważniejszym elementem jest wibrator, który jest anteną monopolową o długości $\lambda/2$, opisaną w punkcie 8.1. Pozostałe składniki anteny są cienkimi prętami metalowymi. Składniki anteny zamocowane są zwykle na metalowym pręcie skierowanym w stronę źródła promieniowania. Kilka prętów o długości nieco mniejszej od pół fali umocowanych jest od strony odbiorczej; noszą nazwę direktorów. Direktory jako elementy dipolowe mają węzeł napięcia w środku długości, dzięki czemu można je przymocować do przewodzącej metalowej podpory, bez potrzeby izolacji i bez zakłócania ich działania. Liczba direktorów ma wpływ na wartość wzmocnienia anteny.



Rys. 8.9. Struktura popularnej anteny Yagi–Uda wykorzystywanej do odbioru telewizji naziemnej.

Jeden z prętów, o długości nieco większej od pół fali, umocowany po drugiej stronie wibratora nosi nazwę reflektora. Reflektor odbija energię w stronę wibratora. Zwykle stosuje się tylko jeden reflektor, ponieważ poprawa wzmocnienia dzięki dodatkowym reflektorom jest niewielka. Odległości między elementami są jednakowe i mieszczą się w granicach

² Nazwa opisywanej w tym punkcie anteny pochodzi od nazwisk Hidetsugu Yagiego i Shintaro Udy z Tohoku Imperial University w Japonii, którzy w roku 1926 opatentowali jej konstrukcję.

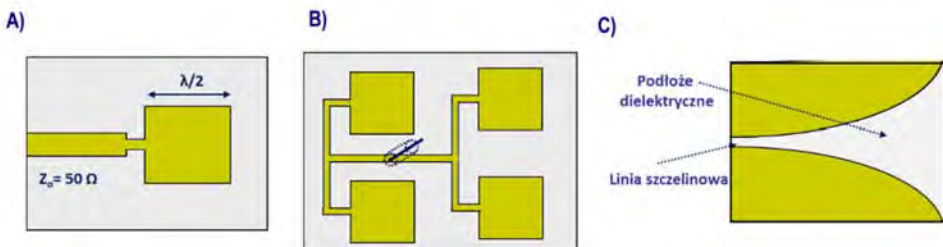
0,15-0,30 λ . Zmiana odległości powoduje zmianę charakterystyki promieniowania i impedancji wejściowej.

Antena Yagi–Uda jest anteną kierunkową, stosowaną do odbioru telewizji naziemnej w pasmach 30-300 MHz. Anteny pełniące tę funkcję montowane są zwykle na dachach domów. W zależności od liczby elementów jej wzmacnienie może dochodzić do 20 dB. Anteny odbierają fale radiowe o długościach metrowych i decymetrowych, o polaryzacji poziomej lub pionowej, w zależności od ustawienia. Zakres częstotliwości, w którym utrzymuje się duże wzmacnienie, jest niewielki, kilka procent wokół częstotliwości środkowej. Antena jest także używana do stacjonarnych połączeń komunikacyjnych punkt-punkt oraz przez radioamatorów do komunikacji na duże odległości.

8.3.6. Anteny planarne

Wraz z rozwojem technologii układów planarnych rozwinęto konstrukcję anten planarnych. Na rys. 8.10A pokazano prostą antenę zbudowaną w technice linii mikropaskowej. Element taki jest prostym obwodem rezonansowym. Pole elektromagnetyczne zostaje wypromieniowane do półprzestrzeni i efekt promieniowania w przypadku obwodu rezonansowego zmniejsza jego dobroć.

Rysunek 8.10A przedstawia podstawową strukturę anteny mikropaskowej: prostokątny, półfalowy rezonator, wykonany na podłożu dielektrycznym, z uziemioną metalizacją po drugiej stronie. Rezonator jest zasilany linią mikropaskową i promieniuje z obu otwartych krawędzi. Wiązka główna spolaryzowana liniowo jest prostopadła do powierzchni. Antena promieniuje skutecznie tylko przy częstotliwości rezonansowej, dlatego też szerokość pasma pracy jest niewielka. Dość wysokie straty podłoża dielektrycznego to kolejna wada anten mikropaskowych.



Rys. 8.10. Przykłady anten planarnych wykonanych w technice linii mikropaskowych. **A)** Konstrukcja anteny wykorzystującej półfalowy rezonator planarny. **B)** Antena planarna wykorzystująca cztery półfalowe rezonatory. **C)** Antena Vivaldiego.

Aby poszerzyć pasmo pracy anteny planarnej, zwiększa się liczbę elementów promieniujących do 4, 8 lub 16. Antenę z czterema rezonatorami półfalowymi przedstawiono na rys. 8.10B. Antena zasilana jest z linii współosiowej, umocowanej z drugiej strony podłoża.

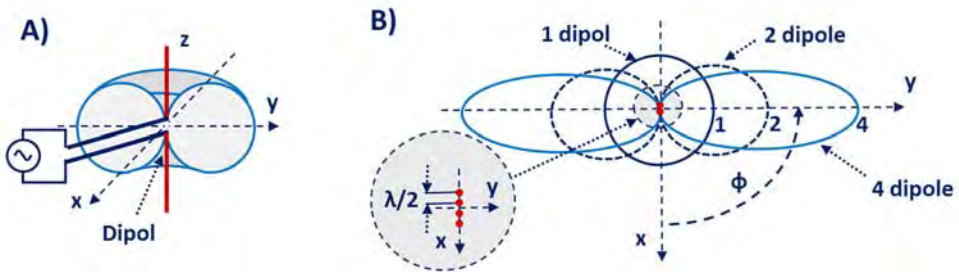
Doprowadzenia sygnału do każdego z elementów są identyczne. Parametry anteny znacznie się poprawiają, istotnie rośnie kierunkowość anteny i poszerza pasmo pracy.

Bardzo ciekawą konstrukcją anteny jest tzw. antena Vivaldiego. Układ elektrod pokazano na rys. 8.10C. Wykonywana jest na małosiatkowym podłożu dielektrycznym, jako bezodbiciowe przejście z dwuelektrodowej linii szczelinowej do wolnej przestrzeni. Anteny Vivaldiego stosowane są na falach centymetrowych i milimetrowych.

Anteny mikropaskowe mają małe wymiary, można je łatwo integrować ze wzmacniaczami, zarówno w układach nadawczych, jak i odbiornikach. Ich zalety wykorzystano w masowej produkcji urządzeń telekomunikacji mobilnej.

8.3.7. Szyki antenowe

Szyk antenowy jest konstrukcją, w skład której wchodzi anteny, czyli elementy promieniujące, zwane także radiatorami, zestawione w odpowiedniej strukturze. Efekty sumowania pól elektromagnetycznych wypromieniowanych z kilku radiatorów / dipoli można ocenić na podstawie rys. 8.11.



Rys. 8.11. Ilustracja sumowania pól EM wypromieniowanych przez kilka dipoli. **A)** Kształt wypromieniowanej wiązki przez pojedynczą antenę dipolową. **B)** Kształty charakterystyk promieniowania w płaszczyźnie x, y dla pojedynczej anteny dipolowej, dla układu dwóch dipoli i układu czterech dipoli, rozmieszczonych liniowo w odległości pół fali.

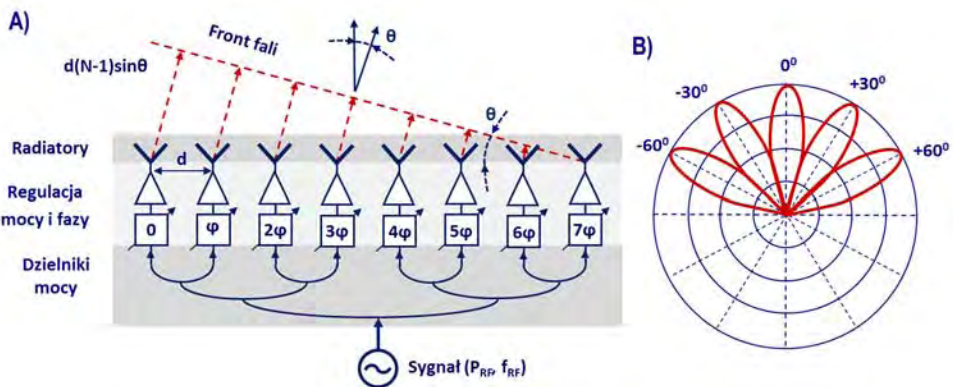
Na rys. 8.11A pokazano w przestrzeni charakterystykę promieniowania idealnego dipola antenowego, co jest powtórzeniem informacji przedstawionych w punkcie 8.3.1. Antenę tworzą dwa pręty metalowe (na rysunku w kolorze czerwonym) umieszczone na końcu linii dwuprzewodowej, zasilanej źródłem sygnału elektrycznego. Charakterystyka swym kształtem przypomina obwarzanek.

Rysunek 8.11B przedstawia charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie (x, y) dla pojedynczego dipola, dla dwóch dipoli i dla czterech dipoli. Obecność dwóch dipoli istotnie zmienia kształt charakterystyki. Dipole oddalone są o $\lambda/2$ i z tego powodu suma wypromieniowanej mocy w kierunku osi x jest równa zero. Dla czterech anten wypadkowa charakterystyka promieniowania zmienia się w sposób zasadniczy, przybierając kształt cygara.

Podstawową strukturę liniowego szyku antenowego pokazano na rys. 8.12A. Szyk ten pracuje w modzie nadawczym. Źródło sygnału mikrofalowego dostarcza mocy P_{RF} o częstotliwości f_{RF} . Moc ta dzielona jest przez pasywny układ dzielników mocy na osiem równych części, wzmacniana przez identyczne wzmacniacze i kierowana do identycznych ośmiu radiatorów. Należy zauważyć, że struktura układu dzielników mocy jest możliwie idealnie symetryczna. Moc P_{RF} powinna być z dużą dokładnością równo podzielona i skierowana do radiatorów. Drogi sygnału do każdego radiatora powinny być identyczne, aby fazy sygnałów docierających do przesuwników fazy były identyczne. Równy podział mocy między elementy promieniujące nie jest warunkiem poprawnej pracy szyku antenowego; zostanie jednakże przyjęty dla uproszczenia rozważań.

Cząstkowe moce sygnału we wrotach wyjściowych układu dzielników mocy docierają do układu regulowanych przesuwników fazy, bądź odpowiedniego układu linii opóźniających. Przesuwniki fazy na rys. 8.12A wprowadzają przesunięcia fazy równe: $0, \phi, 2\phi, \dots, 7\phi$. Przed dotarciem do radiatorów sygnały są wzmacniane przez układ identycznych wzmacniaczy. Wymienione elementy tworzą układ formowania wiązki, a wprowadzane przez nie parametry transmisji sygnału decydują o kształcie wiązki i kierunku propagacji.

Radiatory anteny, w liczbie N , umieszczone są w jednej linii, a odległość między nimi wynosi d i jest zwykle porównywalna z długością propagowanej fali λ . Moce wypromieniowywane przez cząstkowe anteny są jednakowe. Podobnie charakterystyki promieniowania wszystkich anten i parametry polaryzacji są także jednakowe.



Rys. 8.12. Ilustracja działania szyku antenowego. **A)** Podstawowa struktura liniowego szyku antenowego z ośmioma elementarnymi antenami i układem przesuwników fazy. **B)** Charakterystyki promieniowania szyku antenowego dla różnych kierunków wypromieniowanej wiązki.

Obiektem rozważań jest pole dalekie anteny w odległości r_n od anten szyku. Ponieważ spełniony jest warunek $r_n \gg Nd$, to można przyjąć, że amplitudy pól pochodzące od kolejnych radiatorów są sobie równe. Natomiast z punktu widzenia relacji fazowych niewielkie różnice odległości odgrywają istotną rolę, co pokazują zależności (8-13):

$$\begin{aligned}
 r_1 &= r; \\
 r_2 &= r + d\sin\theta; \\
 &\dots \dots \dots \dots \\
 r_N &= r + d(N - 1)\sin\theta;
 \end{aligned}
 \tag{8-13}$$

Fazowane szyki antenowe osiągają najlepsze parametry, gdy wartości przesunięć fazy w kolejnych antenach tworzą ciąg arytmetyczny z krokiem φ :

$$\varphi_n = 0, \varphi, 2\varphi, \dots, (n - 1)\varphi, \dots, (N - 1)\varphi; \tag{8-14}$$

Dwie sąsiednie anteny n i $n+1$ wysyłają promieniowanie w kierunku określonym kątem θ . Promieniowanie anteny n przebywa drogę dłuższą o $d\sin\theta$, co powoduje przesunięcie fazy o $\beta d\sin\theta$. Sygnały obu anten będą dodawały się w punkcie odległym o r gdy spełniony będzie warunek (8-15).

$$\beta d\sin\theta = \varphi + k2\pi; \quad k = 0, 1, 2, \dots; \tag{8-15}$$

Tutaj $\beta = 2\pi/\lambda$ jest stałą fazową wolnej przestrzeni. Jednakowe odstępki między antenami, oraz jednakowe zmiany kąta fazowego, zgodnie z zależnością (8-14), warunkują sumowanie wszystkich sygnałów promieniowanych przez anteny.

Z zależności (8-15) wynika prosty wniosek, że zmieniając przesuwnikami fazy wartość kąta ϕ można sterować kierunkiem propagacji fali promieniowanej przez szczyk antenowy, bez mechanicznego przemieszczania struktur radiatorów. Mechaniczna struktura szyku antenowego pozostaje nieruchoma, a wiązka promieniowania może zmieniać kierunek sterowana elektronicznie sygnałem sterującym przesuwnikami fazy. Ta właściwość szyku antenowego stanowi jego największą zaletę. Na rys. 8.12B pokazano położenia wiązki przy zmianach kąta przesunięcia fazy.

Ważnym parametrem anteny jest jej wzmacnienie G . Parametr ten mówi, ile razy większa jest moc fali elektromagnetycznej skierowanej przez antenę w wybranym kierunku w stosunku do mocy wypromieniowanej przez antenę dookólną. W szyku promieniujących dipoli sumowanie wartości natężeń pól elektrycznych wszystkich radiatorów ma miejsce tylko w określonym kierunku. W miarę wzrostu liczby N radiatorów rośnie natężenie pola elektrycznego N razy, co oznacza wzrost promieniowanej mocy o N^2 w wybranym kierunku, a więc wzrost wzmacnienia G_N anteny złożonej z N elementów:

$$G_N = G_0 N^2; \tag{8-16}$$

Funkcją szyku antenowego, którego strukturę pokazano na rys. 8.12A, jest nadawanie. W wielu przypadkach fazowany szczyk antenowy służy jedynie do celów nadawczych. Szczyk radiatorów wypromieniowuje kierunkowo dostarczoną moc w przestrzeń. W oparciu

o opisane zasady można skonstruować fazowany antenowy szczyk odbiorczy, który jako antena kierunkowa będzie odbierał sygnały propagowane z określonego kierunku. Takie rozwiązania stosowane są m.in. w radioastronomii.

Z powyższego krótkiego opisu można wnioskować, że parametry fazowanych szczyków antenowych, kształt wiązki, duże wzmocnienia, możliwość szybkiej zmiany kierunków emisji i odbioru stawiają je w rzędzie najlepszych narzędzi systemów radarowych i transmisyjnych.

8.4. Podsumowanie

W rozdziale 8 opisano podstawowe parametry anten i krótko scharakteryzowano najczęściej stosowane konstrukcje anten. W tabeli 8.1 zestawiono najważniejsze typy anten z krótką informacją o ich parametrach.

Tabela 8.1. Zestawienie typów anten i ich głównych parametrów

Typ anteny	Antena jako obwód	G [dBi]	Uwagi
Antena dipolowa	Rezonansowy	2,15	$l = \lambda/2; R_A = 73 \Omega$
Antena tubowa	Szerokopasmowy	12-25	-
Antena paraboliczna	Szerokopasmowy	30	dla $D = 10 \lambda$
Antena helikalna	Szerokopasmowy	5	-
Antena Yagi–Uda	Rezonansowy	6-18	-
Antena mikropaskowa	Rezonansowy	9	-
Antena Vivaldiego	Szerokopasmowy	10	Pasma fal milimetrowych

Anteny są niezbędnym elementem systemów radiokomunikacyjnych. W systemach nadawczych anteny wypromieniowują dostarczoną przewodnicami falowymi moc sygnału w postaci fali elektromagnetycznej. Promieniowanie kierowane jest zwykle w stronę układów odbiorczych. Anteny odbiorcze kierują odebrany sygnał przewodnicą falową w stronę wzmacniaczy, filtrów i przetworników częstotliwości. Na początku XX wieku anteny były ważnym elementem odbiorników radiowych, a później telewizyjnych. Rozwój techniki umieszczania satelitów na orbitach wokół Ziemi umożliwił rozwój transmisji satelitarnej,

a następnie radioastronomii. Obecnie telekomunikacja mobilna, bezprzewodowa, stała się jednym z najważniejszych obszarów rozwoju techniki transmisji informacji.

Rozwój bardzo potrzebnej we współczesnym świecie techniki radarowej, niezbędnej do kontroli ogromnego ruchu samolotów i samochodów przyczynił się w znacznym stopniu do poszerzenia wiedzy o technice antenowej. Technikę radarową i transmisji informacji wykorzystano także do celów militarnych, obserwacji przestrzeni wokół Ziemi, transmisji obrazów i danych. Technika radarowa rozwijana jest nadal, pojawiają się kolejne, udoskonalone narzędzia i systemy.

Współczesny świat Internetu dodał nowe funkcje, rozwijany jest internet rzeczy. Technika ta ma wspomagać nas w prowadzeniu samochodów, transmisji informacji wewnątrz dużych miast, w transmisji informacji o stanie zdrowia w systemach medycznych. W każdym przypadku niezbędne są anteny, zarówno w procesie nadawania, jak i odbioru sygnałów.

Czytelnikom zainteresowanym pogłębieniem wiedzy o antenach można polecić rozległą literaturę przedmiotu, zarówno publikacji książkowych, jak i artykułów naukowych.