

jako direktory w strukturach analogicznych do anten Yagi-Uda (rys. 10-64). Elementem czynnym w przypadku jednostek dwudipolowych jest dipol całofalowy lub w przypadku jednostek czterodipolowych — dwa dipole całofalowe. W celu zapewnienia dużego stosunku promieniowania głównego do wstecznego stosuje się reflektory kątowe lub paraboliczne.

Antenę zbudowaną z jednostek dipolowych można traktować jako układ antenowy złożony z odpowiedniej liczby szerokopasmowych anten Yagi-Uda zasilanych współfazowo. Anteny tego typu, w porównaniu z konwencjonalnymi antenami Yagi-Uda, charakteryzują się dużym zyskiem energetycznym przy stosunkowo niewielkich rozmiarach podłużnych. Buduje się anteny pokrywające kilka lub wszystkie kanały IV i V zakresu częstotliwości. Zależnie od liczby direktorów i częstotliwości pracy zysk energetyczny tych anten waha się w granicach od 10 do 17 dB. Stosunek promieniowania głównego do wstecznego na ogół nie spada poniżej 25 dB.

10.5. ANTENY RADIOLOKACYJNE

Rola anteny w urządzeniu radiolokacyjnym wynika z tzw. równania radarowego, określającego zasięg radaru w zależności od parametrów urządzenia [46]

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_N G_0^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{o min}}} \quad (10-28)$$

przy czym:

- R_{max} — maksymalny zasięg urządzenia radiolokacyjnego w swobodnej przestrzeni;
- P_N — moc promieniowana przez antenę;
- G_0 — zysk energetyczny anteny w odniesieniu do źródła izotropowego;
- $P_{o min}$ — minimalna moc doprowadzona do odbiornika zapewniająca wykrycie celu;
- σ — skuteczna powierzchnia celu.

Zasięg radaru jest proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego z zysku energetycznego anteny i tylko do pierwiastka czwartego stopnia z mocy nadajnika i czułości odbiornika. Obrazowo mówiąc, dwukrotne zwiększenie zasięgu wymaga czterokrotnego zwiększenia zysku energetycznego anteny lub szesnastokrotnego zwiększenia mocy nadajnika lub czułości odbiornika.

Najbardziej rozpowszechnionymi antenami w radiolokacji są anteny reflektorowe oraz układy antenowe złożone z dyskretnych źródeł promieniujących. Zależnie od kształtu charakterystyki promieniowania możemy podzielić je na następujące grupy:

- anteny z wiązką szpilkową,
- anteny z wiązką płetwową,
- anteny z wiązką kształtowaną,
- anteny z szybkim przeszukiwaniem przestrzeni,
- anteny wielowiązkowe.

Istotne znaczenie ma również poziom listków bocznych. Promieniowanie energii przez listki boczne odbywa się kosztem energii zawartej w listku głównym. Jeśli poziom listków bocznych jest wysoki, to echo jest odbierane również za pośrednictwem tych listków i pojawia się na wskaźniku radiolokacyjnym jako fałszywy sygnał. Nie można sprecyzować ogólnych zaleceń co do optymalnego poziomu listków bocznych. W dużej mierze zależy on od zastosowanej anteny i związanych z tym trudności w obniżaniu ich poziomu. W spotykanych w praktyce antenach radiolokacyjnych poziom listków bocznych wynosi — 20... — 30 dB poniżej poziomu listka głównego. Przy bardzo starannym zaprojektowaniu i wykonaniu anteny możliwe jest obniżenie tego poziomu do — 35... — 40 dB.

10.5.1. ANTENY Z WIĄZKĄ SZPILKOWĄ

Najprostszym sposobem uzyskania *wiązki szpilkowej* jest zastosowanie reflektora parabolicznego ze źródłem oświetlającym umieszczonym w ognisku. Teorię takiego reflektora podaliśmy w p. 8.3. W celu zapewnienia dostatecznie niskiego poziomu listków bocznych należy odpowiednio dobrać rozkład pola w aperturze reflektora.

Tablica 10-13

Zysk względny i poziom listków bocznych w zależności od pola na brzegu reflektora

Pole na brzegu reflektora względem pola na środku [dB]	Poziom listków bocznych [dB]		Zysk względny
	w płaszczyźnie <i>E</i>	w płaszczyźnie <i>H</i>	
— 10	— 20	— 21	1
— 12	— 21	— 22	0,975
— 15	— 22,5	— 23,5	0,905
— 20	— 24	— 27	0,827
— 25	— 26	— 30	0,771

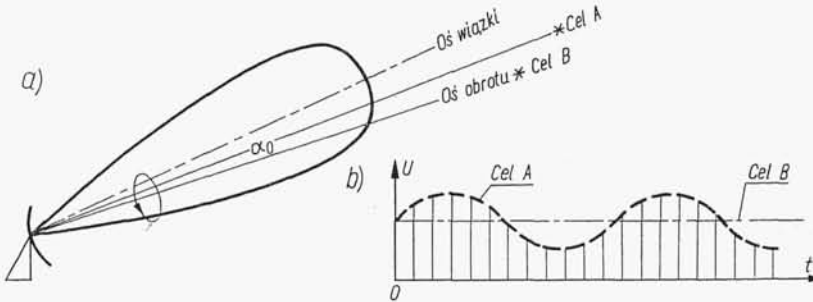
W tabl. 10-13 podano zależność poziomu listków bocznych od pola na brzegu reflektora dla źródła oświetlającego w postaci typowej tuby.

Jednym z zastosowań anteny z wiązką szpilkową jest radar śledzący, określający w sposób ciągły współrzędne śledzonego obiektu i umożliwiający wyznaczenie jego trajektorii lotu. Rozróżnia się radar z *przeszukiwaniem stożkowym* i *radar monoimpulsowy*.

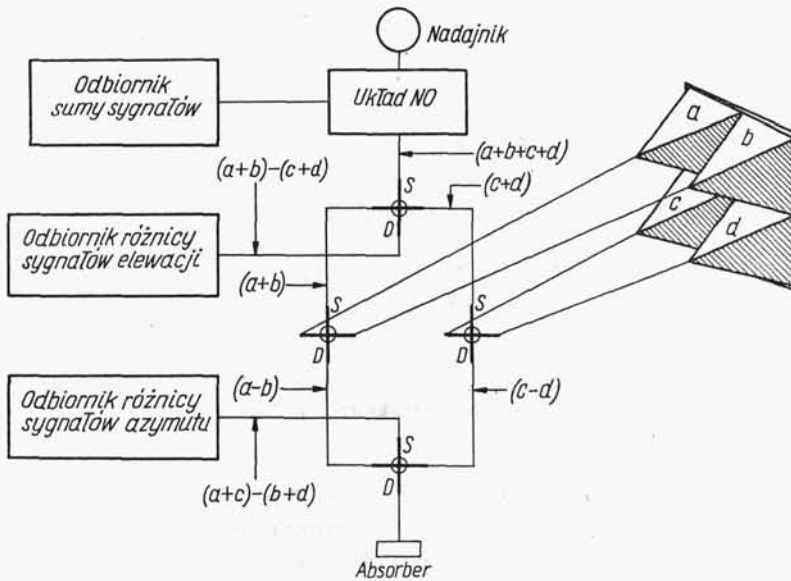
W radarze z przeszukiwaniem stożkowym wiązka antenowa wiruje wokół osi obrotu przesuniętej względem osi wiązki o kąt α_0 (rys. 10-65). Dla celu nie znajdującego się na osi obrotu anteny amplituda odbieranego sygnału zmienia się w funkcji kąta położenia wiązki, przy czym faza składowej zmiennej obwiedni (rys. 10-65b) zależy od kierunku odchylenia kąтового obiektu od kąta równych sygnałów, a amplituda zależy od wielkości kąta odchylenia od kąta równych sygnałów. Stożkowe

przeszukiwanie przestrzeni uzyskuje się na ogół przez wprowadzenie wirowania źródła oświetlającego z prędkością około 30 obr/s.

W urządzeniach automatycznego śledzenia z wirującą wiązką do określenia położenia celu wymaga się szeregu impulsów, natomiast w systemie monoimpulsowym jest możliwe otrzymanie wszystkich informacji o położeniu celu z pojedynczego echa.



Rys. 10-65. Radar śledzący z przeszukiwaniem stożkowym: a) wirująca wiązka antenowa; b) obwiednie odbieranych impulsów



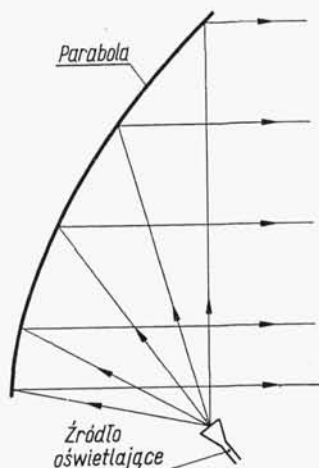
Rys. 10-66. Zasada pracy trójwymiarowego systemu monoimpulsowego

Schemat trójwymiarowego systemu monoimpulsowego przedstawiono na rys. 10-66. Antena zastosowana w tym systemie składa się z reflektora parabolicznego oświetlonego czterema tubami. Tuby są połączone z nadajnikiem i odbiornikiem sumującym za pomocą rozgałęzień pierścieniowych w ten sposób, że są pobudzone współfazowo, natomiast do wejścia odbiornika sygnału elewacji dociera różnica sygnałów

odebranych przez górną i dolną parę tub, a do wejścia odbiornika sygnału azymutu — różnica sygnałów odebranych przez lewą i prawą parę tub. W ten sposób jeśli śledzony obiekt znajduje się na osi anteny, to sygnały na wyjściach odbiorników różnicowych są równe zero. Odchylenie celu od osi anteny powoduje pojawienie się na wyjściach odbiorników różnicowych sygnałów, które po wzmacnieniu służą do napędu silników anteny, naprowadzających antenę na cel.

10.5.2. ANTENY Z WIĄZKĄ PŁETWOWĄ

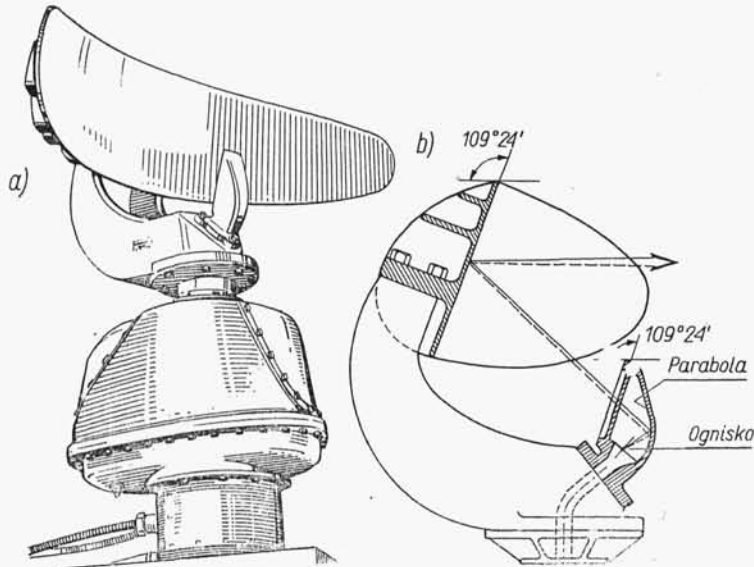
Anteny z *wiązką płetwową* są szeroko stosowane w radiolokatorach morskich. Wiązkę w postaci płetwy można otrzymać wykorzystując symetryczny wycinek paraboloidy obrotowej, oświetlony centralnie źródłem punktowym. Centralne oświetlenie reflektora jest jednak niezbyt korzystne, występują bowiem odbicia od reflek-



Rys. 10-67. Antena z reflektorem podświetlonym

tora w kierunku źródła oświetlającego, powodujące pogorszenie warunków dopasowania anteny, zwiększenie poziomów listków bocznych i zmniejszenie zysku energetycznego. W celu uniknięcia tych niepożądanych zniekształceń charakterystyki promieniowania stosuje się anteny z *reflektorem podświetlonym*. Podświetlenie reflektora polega na usunięciu źródła oświetlającego z obszaru utworzonego przez wiązkę promieni odbitych od reflektora (rys. 10-67).

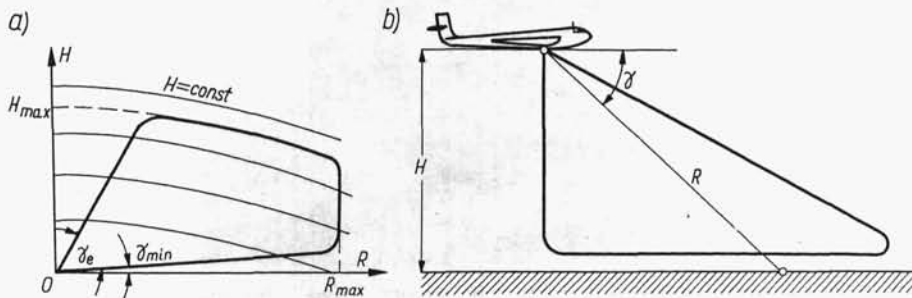
Innym skutecznym sposobem uzyskania wiązki płetwowej jest zastosowanie reflektora w postaci wycinka cylindra parabolicznego oświetlonego źródłem liniowym. Jako liniowego źródła oświetlającego można użyć anteny tubowo-parabolicznej. Przykład takiego rozwiązania pokazano na rys. 10-68.



Rys. 10-68. Antena morskiego radaru nawigacyjnego (a) oraz schemat jej działania (b) (Western Electric Co., New York)

10.5.3. ANTENY Z WIĄZKĄ KSZTAŁTOWANĄ

W radiolokatorach kontroli obszaru powietrznego wymaga się, aby echo od obiektu lecącego na stałej wysokości miało stałą amplitudę przy założeniu, że skuteczna powierzchnia obiektu nie ulega zmianie z odległością. Sygnał echa jest pro-

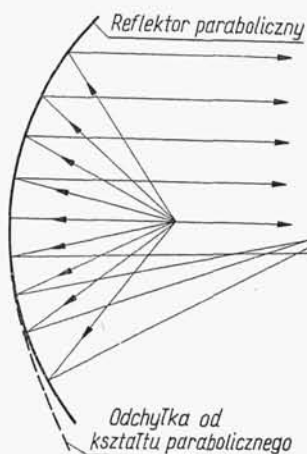


Rys. 10-69. Optymalne charakterystyki promieniowania radaru kontroli obszaru powietrznego (a) i radaru samolotowego służącego do obserwacji powierzchni ziemi (b)

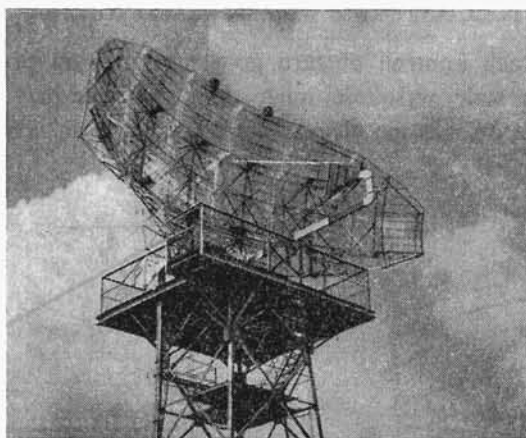
porcjonalny do czwartej potęgi pionowej charakterystyki promieniowania i odwrotnie proporcjonalny do czwartej potęgi odległości R od anteny do obiektu (rys. 10-69). Ponieważ przy stałej wysokości lotu obiektu odległość R jest proporcjonalna do cosecansa kąta elewacji, więc charakterystyka promieniowania anteny zapewniająca stałą amplitudę echa powinna być również proporcjonalna do cosecansa kąta

elewacji. Charakterystykę taką nazywamy *charakterystyką cosecansową*¹⁾. Podobną charakterystykę powinien mieć radiolokator samolotowy służący do obserwacji powierzchni ziemi (rys. 10-69b).

Charakterystykę cosecansową można uformować za pomocą prawie każdego typu anteny. Ograniczymy się tu jedynie do omówienia anteny z reflektorem o pod-



Rys. 10-70. Kształtowanie elewacyjnej charakterystyki promieniowania anteny radiolokatora kontroli obszaru powietrznego



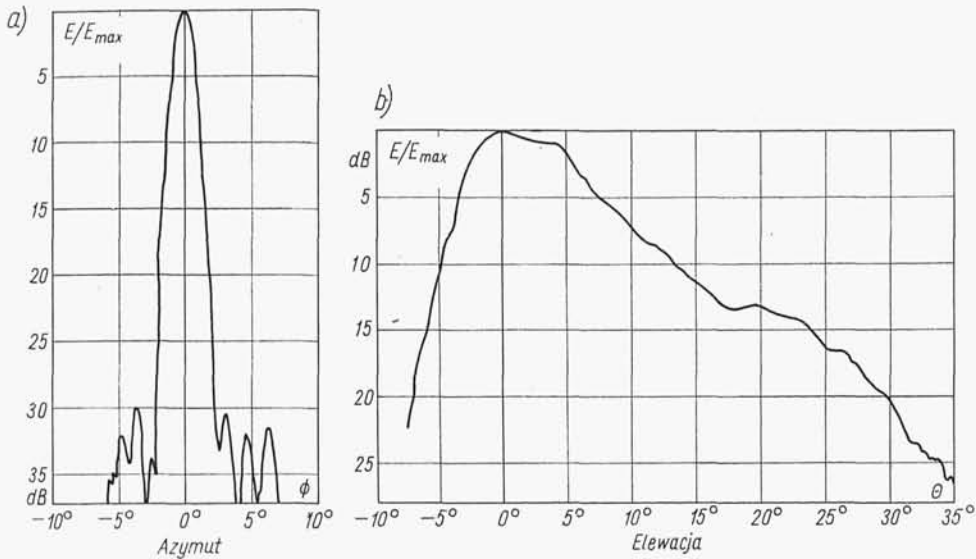
Rys. 10-71. Antena radiolokatora „Avia” (według L. Kiernożycki: Anteny z niesymetryczną wiązką kształtowaną. Prace PIT, 1966, nr 54)

wójnej krzywiźnie. Kształtowanie charakterystyki promieniowania za pomocą reflektora o podwójnej krzywiźnie, oświetlonego źródłem punktowym, pokazano na rys. 10-70. Reflektor kształtowany składa się z dwóch części, a mianowicie: części

¹⁾ W literaturze spotyka się również określenie charakterystyki promieniowania typu cosec². Określenie to dotyczy charakterystyki promieniowania mocy.

kształtującej prawie równoległą wiązkę promieni i części rozpraszającej promienie w odpowiednich kierunkach. Pierwszą część reflektora, zbliżoną do paraboloidy, nazywamy częścią współfazową. Druga część reflektora ma kształt zbliżony do kuli. Dokładny kształt reflektora można wyznaczyć metodą optyki geometrycznej.

Jako przykład zastosowania anteny z reflektorem o podwójnej krzywiznie można podać radiolokator kontroli obszaru powietrznego „Avia”, zainstalowany w porcie



Rys. 10-72. Charakterystyki promieniowania anteny radiolokatora „Avia”: a) w azymucie; b) w elewacji (według L. Kiernożycki: Anteny z niesymetryczną wiązką kształtowaną. Prace PIT, 1966, nr 54)

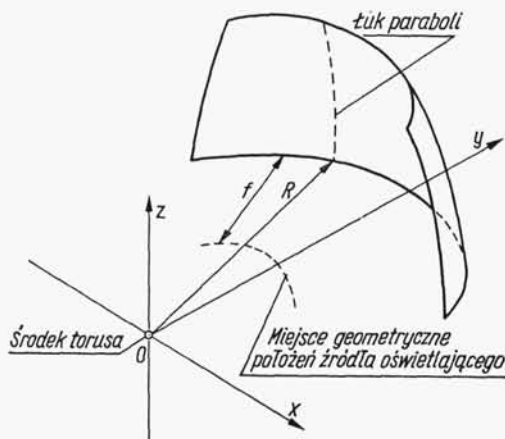
lotniczym Warszawa-Okęcie [27]. Jest to radiolokator o średnim zasięgu wyposażony w antenę o wymiarach $12 \times 4,8$ m (rys. 10-71). Zysk energetyczny anteny wynosi 32,9 dB, szerokość wiązki między punktami odpowiadającymi połowie mocy — $1,5^\circ$, a poziom listków bocznych — 30 dB poniżej poziomu listka głównego. Charakterystyki promieniowania anteny w azymucie i w elewacji przedstawiono na rys. 10-72.

10.5.4. ANTENY Z SZYBKIM PRZESZUKIWANIEM PRZESTRZENI

Mechaniczne przeszukiwanie przestrzeni w przypadku dużych anten jest trudne i nie zawsze może się odbywać z dostateczną prędkością. Często więc w dużych antenach stosuje się inne metody przemieszczania wiązki niż mechaniczne obracanie całej anteny. Znane są różne sposoby elektromechanicznego i elektrycznego sterowania wiązką. Przede wszystkim zajmiemy się zbadaniem możliwości przemieszczania wiązki w antenach ze stałym reflektorem przez przesuwanie źródła oświetlającego. Oczy-

wiście znacznie łatwiej jest poruszać mechanicznie małe źródło oświetlające niż całą antenę. Ponadto nieruchomy reflektor o dużych rozmiarach jest znacznie tańszy od reflektora ruchomego.

W antenie z reflektorem parabolicznym wysunięcie źródła oświetlającego z ogniska powoduje zmianę kierunku maksymalnego promieniowania. Tą metodą nie można jednak uzyskać szerokiego zakresu przemiatania ze względu na astygmatyzm i komę. W przypadku reflektora parabolicznego z ogniskiem w aperturze ($f/d_a = 0,25$) kierunkowość anteny maleje do 80% wartości maksymalnej przy odchyleniu wiązki



Rys. 10-73. Geometria reflektora torusowego

o ± 3 kąty połowy mocy. Zwiększenie długości ogniskowej reflektora powoduje w przybliżeniu proporcjonalny wzrost dopuszczalnych granic przemiatania.

Reflektor kulisty umożliwia uzyskanie szerszego kąta przeszukiwania przestrzeni niż reflektor paraboliczny. W reflektorze kulistym występuje jednak zjawisko aberacji sferycznej, wskutek czego energia fali padającej jest ogniskowana wzdłuż odcinka linii prostej, a nie w ognisku punktowym. Jako źródła oświetlającego nie można więc używać prostej tuby lub dipola. Niewłaściwe ogniskowanie można skorygować stosując liniowe źródło oświetlające lub dodatkowe reflektory albo soczewki.

Szeroki kąt przeszukiwania przestrzeni bez zniekształcenia wiązki można uzyskać za pomocą reflektora torusowego. Zasadę działania reflektora torusowego pokazano na rys. 10-73. Torus paraboliczny otrzymuje się przez obrót łuku paraboli wokół osi równoległej do płaszczyzny wierzchołkowej paraboloidy. Przekrój poprzeczny w jednej płaszczyźnie (płaszczyzna pionowa na rys. 10-73) jest parabolą, natomiast w płaszczyźnie ortogonalnej — łukiem koła. Przemiatanie wiązki realizuje się przez przesuwanie źródła oświetlającego wzdłuż łuku koła o promieniu równym w przybliżeniu połowie promienia torusa. Ze względu na symetrię osiową reflektora przemiatanie wiązki w płaszczyźnie poziomej nie powoduje jej zniekształcenia.

Czoło fali odbitej od reflektora torusowego nie jest ściśle płaskie; dostateczne przybliżenie fali płaskiej uzyskuje się, jeśli stosunek długości ogniskowej do promienia torusa zawiera się w granicach od 0,43 do 0,45.

W praktyce są realizowane reflektory torusowe oświetlane centralnie i podświetlone. Niższy poziom listków bocznych, lecz niesymetryczny kształt charakterystyki promieniowania otrzymuje się w przypadku reflektorów podświetlonych. Maksymalne listki boczne nie znajdują się w płaszczyznach głównych, lecz w płaszczyznach nachylonych pod kątem 45° względem płaszczyzn głównych. Poziom tych listków jest około 15 dB niższy od poziomu listka głównego.

Teoretyczny zakres przeszukiwania przestrzeni dla reflektora torusowego wynosi 180° . Jednak ze względu na „przelewanie się” energii przez krawędzie reflektora oraz ze względu na zacienianie jednego brzegu reflektora przez drugi praktyczny zakres przeszukiwania wynosi około 120° .

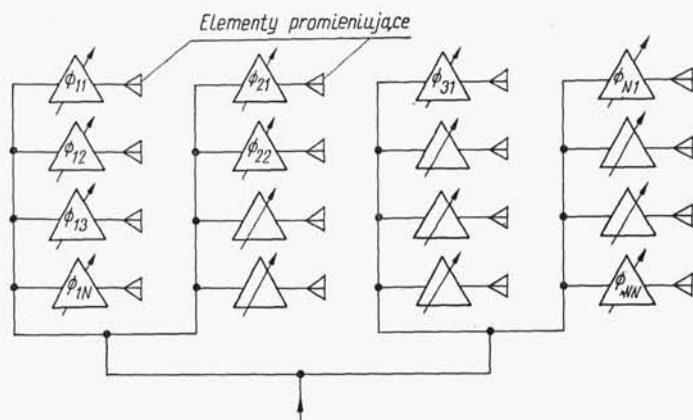
Bardzo szybkie przeszukiwanie przestrzeni można uzyskać w układach antenowych zbudowanych z dyskretnych źródeł promieniujących. Sterowanie wiązki odbywa się w tym przypadku przez zmianę fazy sygnałów poszczególnych elementów promieniujących. Zmiana fazy może odbywać się mechanicznie lub elektronicznie. W tym drugim przypadku mówimy o *elektronicznym przeszukiwaniu przestrzeni* [139]. Oprócz szybkiego przeszukiwania przestrzeni układy antenowe mają jeszcze inne zalety, a mianowicie: możliwość jednoczesnego promieniowania wielu wiązek za pomocą jednej tylko apertury, możliwość uzyskania bardzo dużej mocy szczytowych (elementy promieniujące zasila się równolegle z dużej liczby nadajników), możliwość uzyskania bardzo małych poziomów listków bocznych, brak zacienienia apertury oraz możliwość (teoretyczna) przeszukiwania całej górnej półprzestrzeni.

Zasadniczą wadą układów antenowych jest ich koszt i stopień skomplikowania. Na przykład, układ antenowy promieniujący wiązkę o szerokości 1° musi zawierać około 10 000 elementów promieniujących¹⁾; przy szerokości wiązki $0,1^\circ$ liczba elementów wzrasta do miliona. Podane liczby elementów promieniujących świadczą o stopniu skomplikowania i koszcie układów antenowych. Mimo to układy antenowe, jako najbardziej wielostronne anteny radiolokacyjne, znalazły zastosowanie w praktyce.

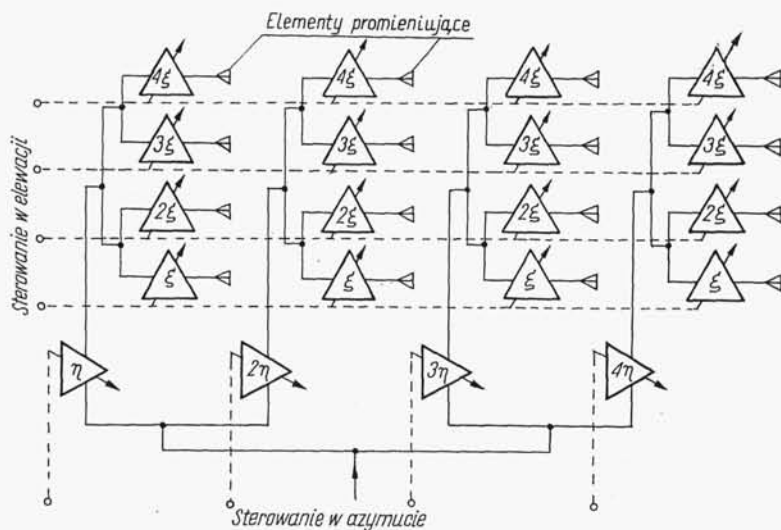
Elektroniczne dwuwymiarowe przeszukiwanie przestrzeni można zrealizować za pomocą dwuwymiarowego układu antenowego, przedstawionego na rys. 10-74. Każdemu elementowi promieniującemu w układzie jest przyporządkowany niezależnie regulowany przesuwnik fazy. Odpowiedni program zmian fazy zabezpiecza elektroniczne przeszukiwanie przestrzeni w azymucie i elewacji. W przypadku układu antenowego o dużej kierunkowości zachodzi potrzeba stosowania bardzo dużej liczby elementów promieniujących i tyluż niezależnych przesuwników fazy. Zmniejszenie liczby przesuwników fazy i uproszczenie sterowania można uzyskać stosując odrębne

¹⁾ Stwierdzenie to dotyczy układów antenowych z równomiernie rozmieszczonymi elementami promieniującymi.

przesuwniki fazy do zmiany położenia wiązki w azymucie i w elewacji (rys. 10-75). Układ taki nazywamy równoległo-równoległym. Wszystkie elementy, znajdujące się w tym samym rzędzie, otrzymują identyczne przesunięcia fazy w celu sterowania wiązki w jednej płaszczyźnie. W celu sterowania wiązki w płaszczyźnie ortogonalnej wszystkie elementy leżące w jednym szeregu otrzymują również jednakowe przesunięcie fazy. Wiązkę można ustawić w dowolnym położeniu w przestrzeni, dobierając odpowiednie przesunięcia fazy, niezależnie dla azymutu i elewacji.



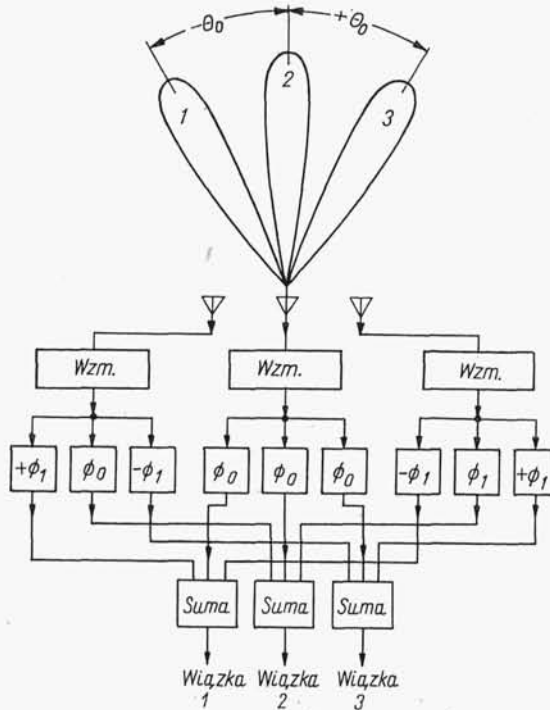
Rys. 10-74. Układ antenowy z regulowanymi przesuwnikami fazy do dwuwymiarowego przeszukiwania przestrzeni



Rys. 10-75. Układ antenowy z niezależnym sterowaniem przesuwnikami fazy do dwuwymiarowego przeszukiwania przestrzeni w azymucie i elewacji

10.5.5. WIELOWIAZKOWE UKŁADY ANTENOWE

W niektórych radiolokatorach stosuje się wielowiązkowe metody natychmiastowego przeszukiwania przestrzeni. Umożliwiają one dokonanie jednoczesnego pomiaru wszystkich współrzędnych celu. Dzięki temu wiązka antenowa może pozostawać nieruchoma i realizować nieprzerwane przeszukiwanie przestrzeni. Tak więc zostaje usunięta główna wada kolejnego przeszukiwania przestrzeni za pomocą jednej wiązki, jaką jest długi czas przeszukiwania. W celu uzyskania takiego samego zasięgu

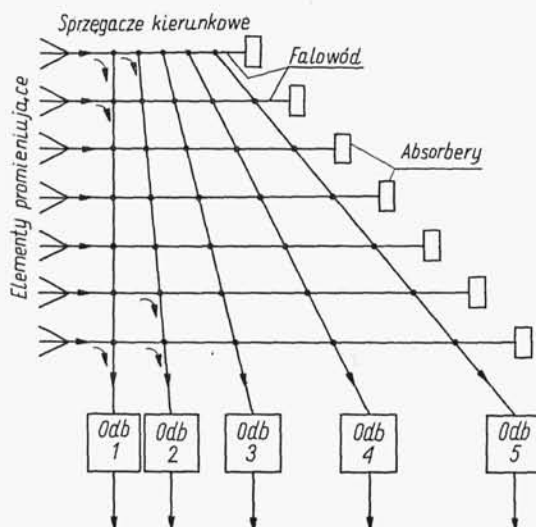


Rys. 10-76. Równoczesne formowanie trzech wiązek w układzie antenowym złożonym z trzech elementów promieniujących

i rozróżnialności jak w stacjach jednowiązkowych z wąską wiązką, stacje wielowiązkowe powinny mieć dużą liczbę wąskich wiązek, pokrywających cały obszar przeszukiwania. Każda z tych wiązek powinna być związana z osobnym urządzeniem odbiorczym.

Zasadę tworzenia *układów wielowiązkowych* wyjaśnimy na przykładzie układu złożonego z trzech elementów promieniujących (rys. 10-76). Każdy element ma przyporządkowane trzy przesuwniki fazy. Jeden zestaw przesuwników wytwarza wiązkę prostopadłą do apertury układu ($\theta = 0$). Drugi zestaw trzech przesuwników fazy wytwarza wiązkę o kierunku $\theta = +\theta_0$; trzeci zestaw wytwarza wiązkę o kierunku $\theta = -\theta_0$.

Między elementy promieniujące a przesuwniki fazy można włączyć wzmacniacze kompensujące straty w przesuwnikach. Układy formujące wiązkę (przesuwniki fazy) mogą być zrealizowane na wielkiej częstotliwości lub na pośredniej częstotliwości. Formowanie układu wielowiązkowego na wielkiej częstotliwości za pomocą falowodowych torów przesyłowych pokazano na rys. 10-77.



Rys. 10-77. Formowanie szeregu wiązek na wielkiej częstotliwości

10.6. ANTENY DLA RADIOKOMUNIKACJI SATELITARNEJ

Przy obecnym stanie techniki naziemna stacja łączności satelitarnej jest poważną i kosztowną inwestycją [40, 165]. Niemalą część kosztów budowy stacji stanowi antena. Jest więc oczywiste, że należy tak projektować antenę, aby uzyskać żądane parametry przy możliwie małych kosztach. Zadaniem anteny jest wypromiowanie sygnałów ze stacji naziemnej w kierunku satelity i odbiór sygnałów wysyłanych przez satelitę. Wymagania stawiane antenie od strony nadawczej są stosunkowo łagodne. Zbyt mały zysk energetyczny anteny może być bowiem zrównoważony zwiększeniem mocy nadajnika; Jednak ze względu na możliwość zakłócania pracy innych służb korzystających z tego samego zakresu częstotliwości wymaga się dostatecznie niskiego poziomu listków bocznych.

Znacznie ostrzejsze wymagania stawia się antenie od strony odbiorczej. Odbiór słabych sygnałów z satelity wymaga zapewnienia odpowiedniego stosunku mocy sygnału do mocy szumów na wejściu odbiornika. Moc sygnału jest proporcjonalna do zysku energetycznego anteny. Moc szumów jest proporcjonalna do temperatury szumów systemu, o której decydują szumy odbiornika, straty w torze zasilającym, duplekserze itp. oraz szumy odbierane przez antenę. Dogodnym parametrem określa-