

Przy symetrycznej funkcji rozkładu amplitudy odchylenie sześciennne w rozkładzie fazy powoduje zmianę kierunku maksymalnego promieniowania, zmniejszenie zysku energetycznego oraz asymetrię charakterystyki promieniowania. Przykład charakterystyki promieniowania z uwzględnieniem sześciennego odchylenia fazy przedstawiono na rys. 2-24b.

2.4. UKŁADY ANTENOWE ZŁOŻONE Z DYSKRETYCH ELEMENTÓW PROMIENIUJĄCYCH

Duże znaczenie w technice antenowej mają *układy antenowe* złożone z pewnej liczby jednakowych i jednakowo zorientowanych elementów promieniujących. Względne amplitudy i fazy prądów w poszczególnych elementach są przy tym dobierane tak, aby uzyskać założoną charakterystykę promieniowania całego układu. Elementami układów antenowych mogą być dowolne źródła promieniujące, np. dipole, szczeliny, tuby itp. Elementy promieniujące mogą być rozmieszczone dowolnie, w praktyce jednak wykorzystuje się układy o regularnych kształtach geometrycznych. Największe znaczenie mają *układy liniowe* (w których źródła są rozmieszczone wzdłuż pewnej prostej) oraz *układy płaskiowe*. W tym ostatnim przypadku rozróżnia się *układy prostokątne*, które można traktować jako układy liniowe złożone z układów liniowych, oraz *układy pierścieniowe*, w których źródła są rozmieszczone na obwodach kół. Istnieje istotna różnica między antenami aperturowymi i układami antenowymi. W pierwszym przypadku źródło oświetlające wytwarza falę kulistą a zadaniem anteny (reflektora, soczewki) jest przekształcenie tej fali w falę płaską; natomiast w przypadku układów antenowych właściwe zależności fazowe uzyskuje się przed wypromieniowaniem fali, dobierając odpowiednio sposób zasilania poszczególnych źródeł. Charakterystyczną cechą układów antenowych jest łatwość zmiany rozkładu fazy pola w aperturze układu. Ta właściwość jest wykorzystywana do elektronicznego sterowania charakterystyki promieniowania układu [9, 18, 54].

Zgodnie z zasadą przemnażania charakterystyk (p. 2.1.7) charakterystyka promieniowania układu antenowego jest iloczynem charakterystyki promieniowania pojedynczego elementu przez charakterystykę promieniowania układu złożonego ze źródeł izotropowych (mnożnika układu). Dalsze rozważania ograniczymy więc do układów złożonych ze źródeł izotropowych.

2.4.1. LINIOWY UKŁAD ANTENOWY

Rozważmy układ antenowy złożony z N źródeł izotropowych równomiernie rozmieszczonych wzdłuż osi z (rys. 2-25). Zgodnie ze wzorem (2-45) charakterystyka promieniowania takiego układu wyraża się następującą zależnością:

$$f(\theta) = \left| \sum_{n=1}^N A_n e^{j[k(n-1)d \cos \theta + \vartheta_n]} \right| \quad (2-148)$$

w której:

$A_n e^{j\vartheta_n}$ — prąd w n -tym elemencie;

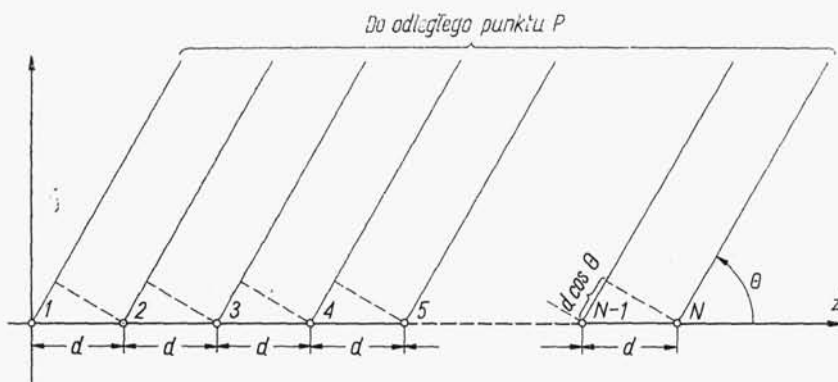
d — odległość między elementami.

Ze względu na symetrię układu charakterystyka promieniowania nie zależy od współrzędnej Φ .

Szczególne znaczenie ma przypadek, gdy amplitudy prądów we wszystkich źródłach są jednakowe, a fazy tworzą postęp arytmetyczny

$$A_1 = A_2 = \dots = A_N = 1$$

$$\vartheta_n = (n-1)\vartheta$$



Rys. 2-25. Liniowy układ antenowy

Wprowadzając nową zmienną

$$u = \frac{1}{2}(kd \cos \Theta + \vartheta) = \frac{\pi d}{\lambda} \cos \Theta + \frac{\vartheta}{2} \quad (2-149)$$

oraz zmieniając granice sumowania w zależności (2-148) możemy wyrażenie na charakterystykę promieniowania jednorodnego układu liniowego przedstawić w postaci uogólnionej

$$f(u) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2nu} \right| \quad (2-150)$$

Sumę w wyrażeniu (2-150) możemy obliczyć jako sumę N wyrazów postępu geometrycznego z ilorzem e^{j2u} ; otrzymujemy wówczas

$$f(u) = \left| \frac{\sin Nu}{\sin u} \right| \quad (2-151)$$

Wyrażenie (2-151) dla $u = 0$ osiąga wartość maksymalną równą N . Unormowaną uogólnioną charakterystykę promieniowania dla liniowego układu antenowego otrzymamy więc dzieląc wyrażenie (2-151) przez N

$$F(u) = \left| \frac{\sin Nu}{N \sin u} \right| \quad (2-152)$$

Funkcja $\sin Nu / N \sin u$ jest funkcją periodyczną z okresem π i symetryczną w stosunku do $u = 0$. Ma ona główne maksima przy $u = 0; \pm\pi; \pm 2\pi; \dots$; między maksimami występuje $(N-1)$ miejsc zerowych leżących w punktach $u = \pm \frac{n}{N} \pi$; $\pm \left(\pi + \frac{n}{N} \pi\right)$; $\pm \left(2\pi + \frac{n}{N} \pi\right)$; \dots , przy czym $n = 1, 2, \dots, N-1$ oraz $N-2$ listków bocznych, których położenia określa równanie $N \operatorname{tg} u_m = \operatorname{tg} Nu_m$. Poziom listków bocznych zmniejsza się przy oddalaniu od każdego głównego maksimum osiągając najmniejszą wartość w środku odległości między głównymi maksimami. Poziom listków bocznych określa w przybliżeniu następująca zależność:

$$F_{b \max} \approx \frac{1}{N \sin \frac{2n+1}{2N} \pi}, \quad n = 1, 2, \dots, N-2 \quad (2-153)$$

Przykład uogólnionej charakterystyki promieniowania układu liniowego złożonego z 8 źródeł pokazano na rys. 2-26. *Rzeczywistą albo widzialną charakterystykę promieniowania* układu przedstawia ta część charakterystyki uogólnionej, dla której zmienna u leży w granicach wyznaczonych zmianami kąta Θ od 0 do 180°

$$-\frac{\pi d}{\lambda} + \frac{\vartheta}{2} \leq u \leq \frac{\pi d}{\lambda} + \frac{\vartheta}{2} \quad (2-154)$$

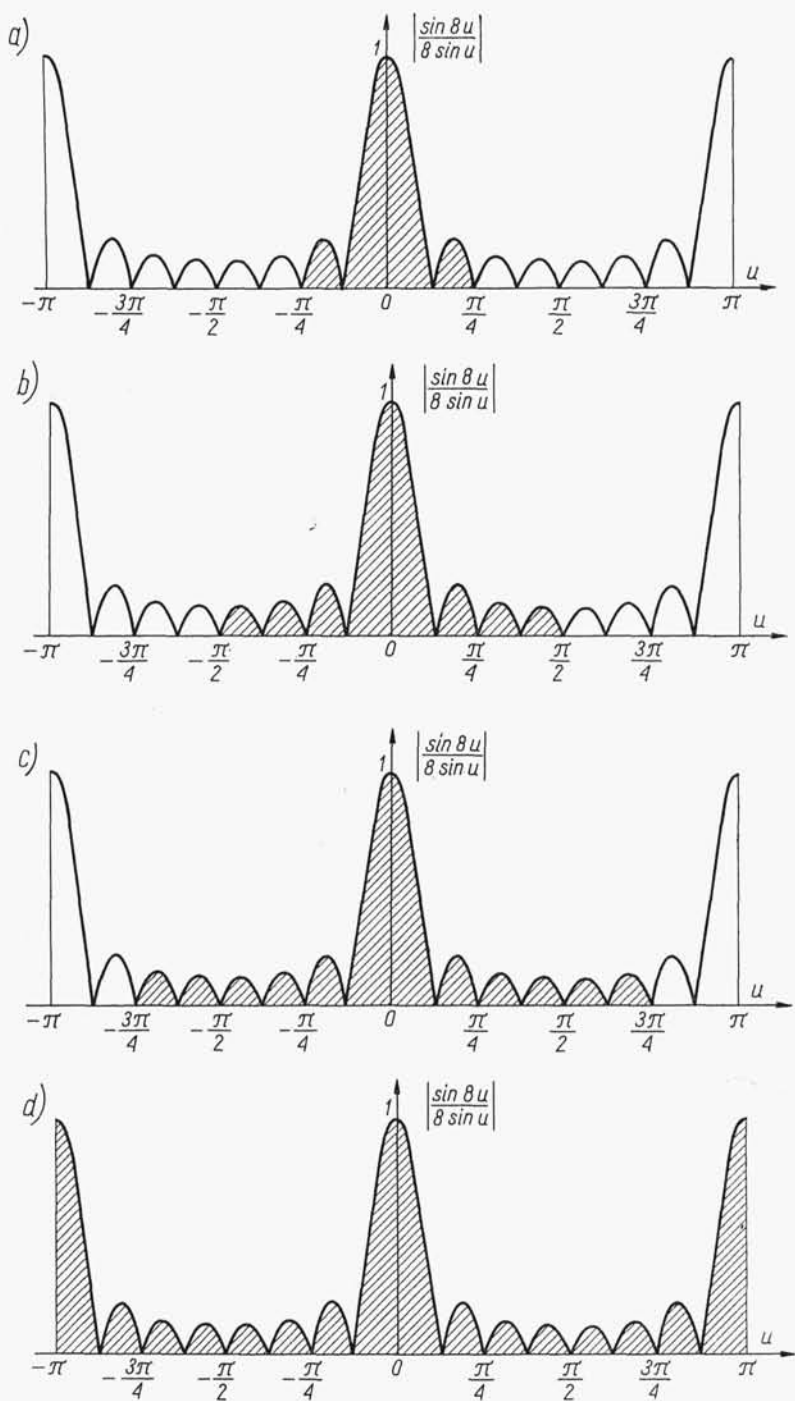
Na rysunku 2-26 zakresowano tę część uogólnionej charakterystyki, która odpowiada charakterystyce rzeczywistej przy współfazowym pobudzeniu źródeł ($\vartheta = 0$) i różnych odległościach między źródłami.

Charakterystyczną cechą układów współfazowych jest występowanie głównego listka dla $u = 0$ ($\Theta = 90^\circ$), co odpowiada kierunkowi prostopadłemu do osi układu. Z tego powodu układy współfazowe nazywamy *układami z promieniowaniem poprzecznym*. Jeśli odległość między elementami jest mniejsza od długości fali, to w charakterystyce promieniowania układu występuje tylko jeden listek główny (rys. 2-26a, b, c). Jeśli natomiast $d \geq \lambda$, to w charakterystyce promieniowania pojawiają się *wtórne maksima dyfrakcyjne*, tzw. *listki układu* odpowiadające wartościom $u = \pm\pi; \pm 2\pi; \dots$ (rys. 2-26d).

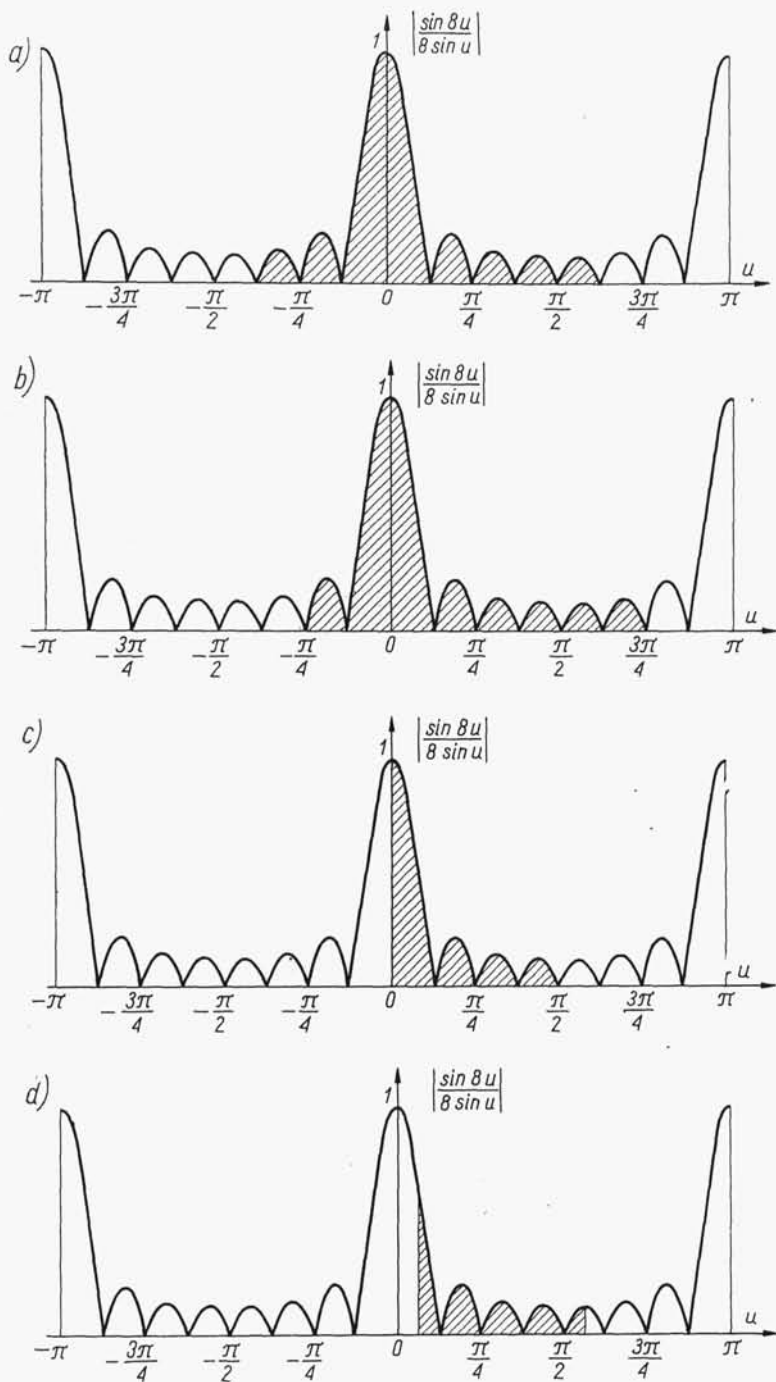
Jeśli elementy układu są pobudzane z jednostajną progresją fazy ($\vartheta \neq 0$), to kierunek maksymalnego promieniowania ulega odchyleniu od normalnej do osi układu i może być wyznaczony z zależności

$$\Theta_m = \arccos \left(-\frac{\vartheta \lambda}{2\pi d} \right) \quad (2-155)$$

Zależność kierunku maksymalnego promieniowania od różnicy faz między źródłami jest wykorzystywana do elektrycznego sterowania wiązki [9, 18, 54]. W szczególności gdy przesunięcie fazy między źródłami jest równe opóźnieniu fazy, jakiego doznaje fala przebywając drogę równą odległości między nimi, to kierunek maksymalnego promieniowania pokrywa się z osią układu. Mówimy wówczas o *układzie z promieniowaniem osiowym*.



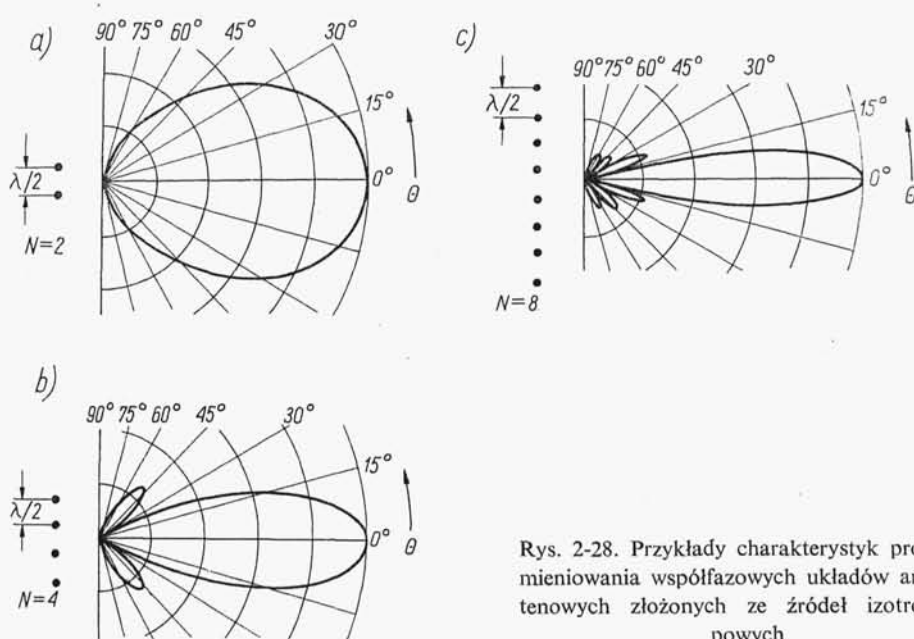
Rys. 2-26. Uogólniona charakterystyka promieniowania liniowego układu antenowego złożonego z 8 źródeł izotropowych. Część zakreskowana odpowiada rzeczywistej charakterystyce promieniowania ($0 \leq \theta \leq \pi$) układu współfazowego dla różnych odległości między źródłami: a) $d = 0,25 \lambda$; b) $d = 0,5 \lambda$; c) $d = 0,75 \lambda$ d) $d = \lambda$



Rys. 2-27. Wpływ przesunięcia fazowego na charakterystykę promieniowania liniowego układu antenowego złożonego z 8 źródeł izotropowych. Część zakreskowana odpowiada rzeczywistej charakterystyce promieniowania ($0 \leq \Theta \leq \pi$): a) $d = 0,5 \lambda$, $\vartheta = \frac{\pi}{4}$; b) $d = 0,5 \lambda$, $\vartheta = \frac{\pi}{2}$; c) $d = 0,25 \lambda$,

$$\vartheta = \frac{\pi}{2}; \text{ d) } d = 0,25 \lambda, \vartheta = \frac{5\pi}{8}$$

Rzeczywista charakterystyka promieniowania układu z jednostajną progresją fazy nie jest symetryczna względem kierunku $u = 0$ (rys. 2-27). Przy znacznych odchyleniach głównej wiązki od kierunku normalnego do osi układu wiązka ulega poszerzeniu. Występowanie wtórnych maksimów dyfrakcyjnych (listków układu) zależy od długości i przesunięcia fazy między źródłami. Aby zapewnić jednowiązkową charakterystykę promieniowania dla dowolnych przesunięć fazowych, odległość między źródłami powinna być znacznie mniejsza od połowy długości fali. W rzeczywistych układach antenowych odległość ta może być większa, bowiem część listków



Rys. 2-28. Przykłady charakterystyk promieniowania współfazowych układów antenowych złożonych ze źródeł izotropowych

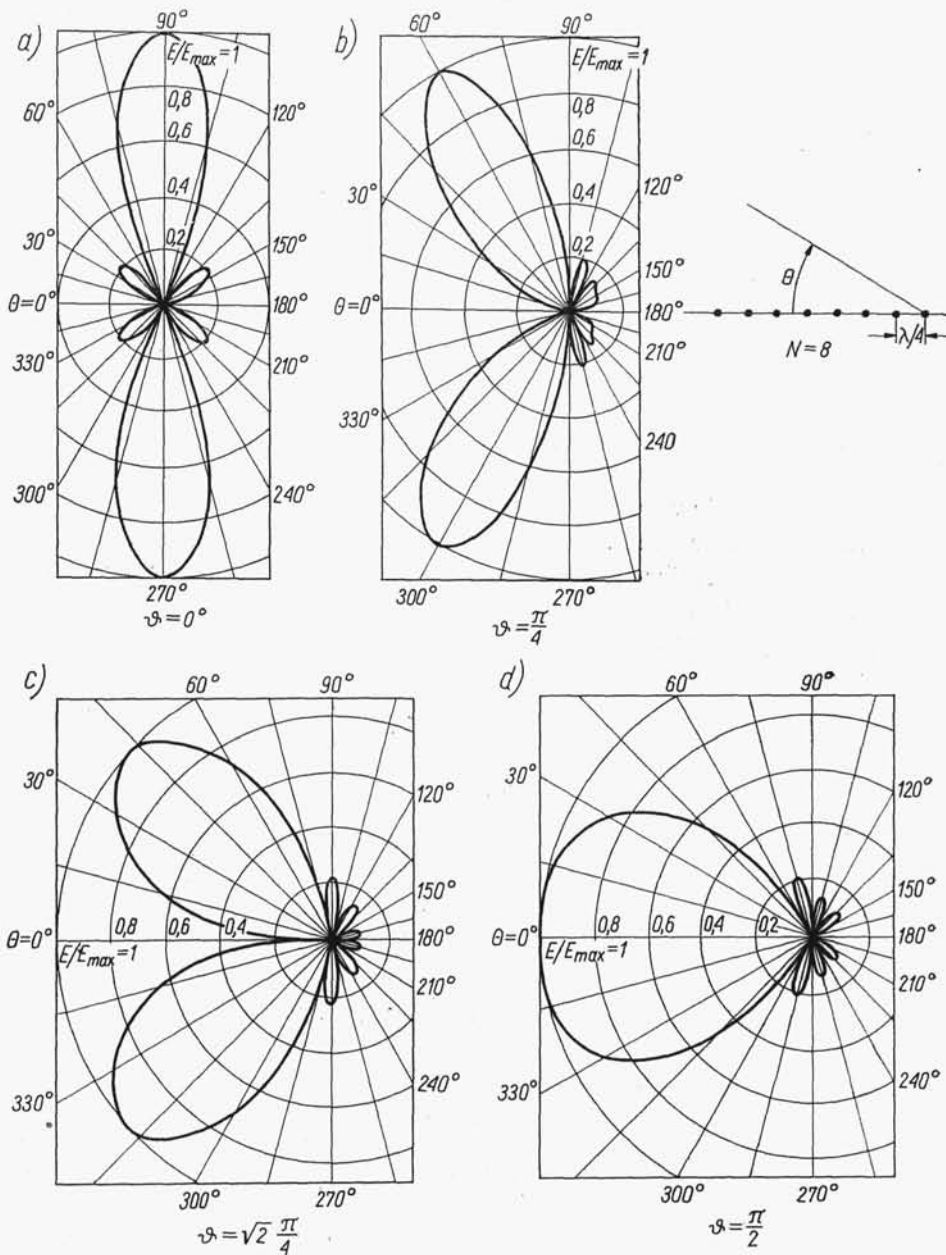
układu ulega stłumieniu wskutek kierunkowej charakterystyki promieniowania pojedynczego elementu.

W przypadku gdy przesunięcie fazy między źródłami przewyższa opóźnienie fazy, jakiego doznaje fala przebywająca drogę między nimi ($|\theta| > 2\pi d/\lambda$), rzeczywista charakterystyka promieniowania jest przesunięta w prawo w stosunku do kierunku $u = 0$ (rys. 2-27d). Układ promieniuje maksymalnie wzdłuż swojej osi, ale maksymalna wartość funkcji określającej charakterystykę jest mniejsza od jedności

$$F(u_{max}) < 1$$

Jednocześnie następuje zawężenie głównej wiązki promieniowania i wzrost kierunkowości układu. Zjawisko to nosi nazwę *superkierunkowości*. Towarzyszy mu szybki wzrost dobroci układu ograniczający praktyczne zastosowanie superkierunkowych układów antenowych [18].

Na rysunkach 2-28 i 2-29 przedstawiono przykłady charakterystyk promieniowania liniowych układów antenowych.



Rys. 2-29. Charakterystyka promieniowania liniowego układu antenowego złożonego z 8 źródeł izotropowych ($d = 0,25\lambda$) przy różnych przesunięciach fazowych między źródłami: a) $\varphi = 0$ (układ współfazowy); b) $\varphi = \frac{\pi}{4}$; c) $\varphi = \sqrt{2} \frac{\pi}{4}$; d) $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (układ promieniujący osiowo)

Przy analizowaniu charakterystyki promieniowania w otoczeniu listka głównego współfazowego układu antenowego złożonego z dużej liczby elementów można funkcję $\sin u$ występującą w mianowniku wzoru (2-151) zastąpić jej argumentem; otrzymujemy wówczas

$$f(u) \approx \left| \frac{\sin Nu}{Nu} \right| \quad (2-156)$$

Jeśli ponadto przez $Nd = L$ będziemy rozumieli *długość układu*, to wyrażenie (2-156) jest analogiczne do wyrażenia (2-118) uzyskanego dla równomiernie oświetlonej apertury prostokątnej. Szerokość głównej wiązki współfazowego, liniowego układu antenowego jest więc w przybliżeniu równa

$$\alpha \approx 0,88 \frac{\lambda}{L} = 0,88 \frac{\lambda}{Nd} \quad (2-157)$$

a poziom pierwszego listka bocznego wynosi $-13,2$ dB. Przy odchyleniu wiązki od kierunku normalnego do osi układu jej szerokość zwiększa się w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalnie do wartości $\sin \Theta_m$.

Kierunkowość liniowego współfazowego układu antenowego może być obliczona w ogólnym przypadku dowolnego rozkładu amplitud. Przyjmując we wzorze (2-148) $\vartheta_n = 0$ i podstawiając go do zależności (1-9) otrzymujemy po wykonaniu całkowania i uporządkowaniu [3, 18]

$$D = \frac{\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N A_m A_n}{\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N A_m A_n S_{mn}} \quad (2-158)$$

przy czym

$$S_{mn} = \frac{\sin[kd(m-n)]}{kd(m-n)}$$

Jeśli odległość między źródłami jest równa $\lambda/2$, to wyrażenie (2-158) sprowadza się do postaci

$$D = \frac{\left[\sum_{n=1}^N A_n \right]^2}{\sum_{n=1}^N A_n^2} \quad (2-159)$$

a jeśli ponadto wszystkie amplitudy są jednakowe, to kierunkowość jest równa liczbie źródeł

$$D = N \quad (2-160)$$

Korzystając z wprowadzonego poprzednio pojęcia długości układu możemy jego kierunkowość wyrazić w następującej postaci:

$$D = 2 \frac{L}{\lambda} \quad (2-161)$$

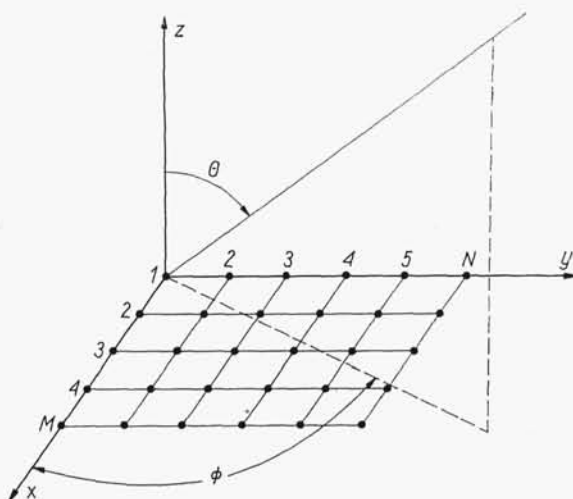
Dzieląc zależność (2-161) przez 1,64 otrzymujemy wyrażenie na zysk energetyczny układu współfazowego w odniesieniu do dipola półfalowego

$$G_{\lambda/2} \approx 1,22 \frac{L}{\lambda} \quad (2-162)$$

Wzór (2-162) daje dostatecznie dobre dla praktyki przybliżenie również w tych przypadkach, w których odległość między elementami różni się od $\lambda/2$.

2.4.2. PROSTOKĄTNY UKŁAD ANTENOWY

Rozważmy układ antenowy złożony z MN źródeł izotropowych rozmieszczonych w wierzchołkach prostokątnej siatki leżącej w płaszczyźnie xy (rys. 2-30).



Rys. 2-30. Prostokątny układ antenowy

Układ taki możemy uważać za układ liniowy złożony z M źródeł, z których każde jest układem liniowym złożonym z N źródeł. Zgodnie z zasadą przemnażania charakterystyk, mnożnik płaskiego układu prostokątnego możemy zapisać w postaci

$$F(\Theta, \Phi) = \left| \frac{\sin Mu_1}{M \sin u_1} \frac{\sin Nu_2}{N \sin u_2} \right| \quad (2-163)$$

przy czym:

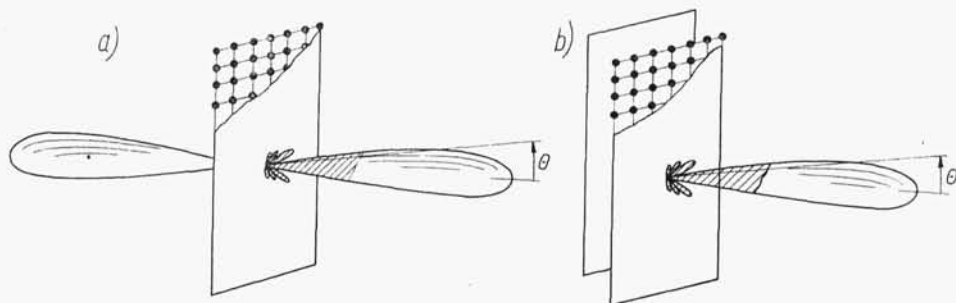
$$u_1 = \frac{\pi d_1}{\lambda} \sin \Theta \cos \Phi + \frac{\vartheta_1}{2};$$

$$u_2 = \frac{\pi d_2}{\lambda} \sin \Theta \sin \Phi + \frac{\vartheta_2}{2};$$

d_1 — odległość między źródłami mierzona wzdłuż osi x ;

d_2 — odległość między źródłami mierzona wzdłuż osi y .

Przy współfazowym pobudzeniu wszystkich źródeł, kierunek maksymalnego promieniowania jest prostopadły do płaszczyzny układu. W charakterystyce promieniowania występują przy tym dwie jednakowe główne wiązki promieniowania mające kształt cygara (rys. 2-31a). W wielu praktycznych zastosowaniach wymagane jest promieniowanie jednokierunkowe, które można uzyskać przez umieszczenie układu antenowego obok płaskiego ekranu metalowego (rys. 2-31b). Działanie



Rys. 2-31. Charakterystyka promieniowania prostokątnego układu antenowego: a) bez reflektora; b) z reflektorem

ekranu można uwzględnić stosując metodę odbić zwierciadlanych. Zmieniając fazy prądów w źródłach można zmieniać położenie głównej wiązki promieniowania w przestrzeni. Należy przy tym pamiętać, że podobnie jak w przypadku układu liniowego, odchylaniu wiązki od kierunku normalnego do płaszczyzny układu towarzyszy wzrost jej szerokości.

2.4.3. UKŁADY ANTENOWE Z NIERÓWNOMIERNIE ROZMIESZCZONYMI ELEMENTAMI

Dotychczas rozważaliśmy układy antenowe, w których odległości między elementami były jednakowe. W przypadku układów antenowych o znacznych rozmiarach prowadzi to do bardzo dużej liczby elementów promieniujących i wiąże się z poważnym skomplikowaniem konstrukcji układu. W związku z tym wydaje się celowe rozpatrzenie możliwości zmniejszenia liczby elementów w układzie przy zachowaniu jego rozmiarów przez nierównomierne rozmieszczenie elementów. Badanie teoretyczne takich układów jest bardzo trudnym zagadnieniem, dotychczas w pełni nie rozwiązany [3, 18, 46]. Do analizy i syntezy *układów antenowych z nierównomiernie rozmieszczonymi elementami* stosuje się rozmaite metody; można je podzielić na następujące grupy: a) metody prób, do których należy zaliczyć metodę kolejnych przybliżeń, oraz metody wykorzystujące maszyny cyfrowe; b) metody wykorzystujące aproksymację mnożnika układu za pomocą szeregów i sprowadzenie do ekwiwalentnego układu jednorodnego; c) metody statystyczne.

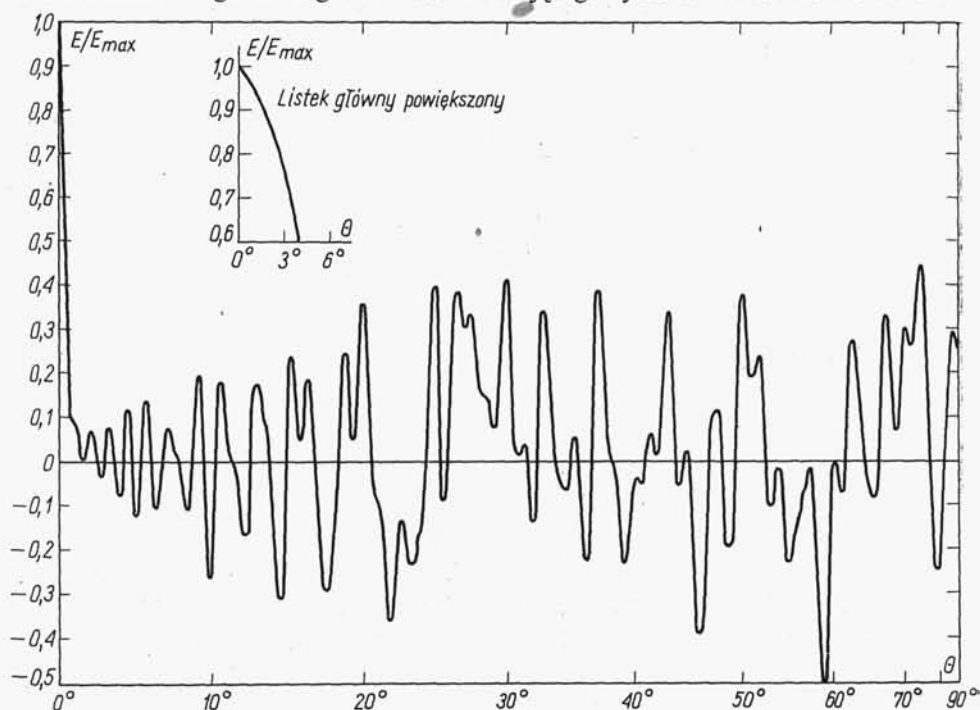
W układzie antenowym z nierównomiernie rozmieszczonymi elementami nie jest zachowana periodyczność mnożnika układu (w odniesieniu do uogólnionej współ-

rzędnej kątowej u) i dlatego ulegają likwidacji — a przynajmniej wyraźnemu zmniejszeniu — główne maksima dyfrakcyjne wyższych rzędów (listki układu). Dzięki temu układy antenowe z nierównomiernie rozmieszczonymi elementami charakteryzują się następującymi właściwościami:

- mniejszą liczbą elementów promieniujących w stosunku do układu jednorodnego o tych samych rozmiarach;
- szerszym zakresem częstotliwości i szerszym przedziałem tzw. przemiatania wiązki bez obawy pojawienia się maksimów dyfrakcyjnych wyższych rzędów;
- możliwością wpływania na poziom listków bocznych w określonych częściach charakterystyki promieniowania;
- uproszczeniem sposobu zasilania.

Zysk układu antenowego jest proporcjonalny do liczby elementów w układzie. Tak więc usunięcie z układu pewnej liczby elementów powoduje zmniejszenie zysku energetycznego nawet wówczas, gdy szerokość głównej wiązki promieniowania nie ulegnie zmianie. Jeśli więc szerokość głównej wiązki promieniowania nie ulega zmianie przy zmniejszaniu liczby elementów w układzie, to musi wzrastać średni poziom listków bocznych.

Jako przykład na rys. 2-32 przedstawiono charakterystykę promieniowania układu antenowego o długości 100λ zawierającego tylko 25 nierównomiernie roz-



Rys. 2-32. Charakterystyka promieniowania układu antenowego o długości 100λ złożonego z 25 nierównomiernie rozmieszczonych elementów promieniujących (według M. I. Skolnik: Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill, New York; zamieszczono za zgodą McGraw-Hill Book Company).

mieszczonych elementów, przy czym najmniejsza odległość między elementami wynosi 2λ [46]. Rozmieszczenie elementów jest symetryczne względem środka układu, a odległość między elementami wzrasta w miarę zbliżania się do jego brzegów. Szerokość głównej wiązki promieniowania omawianego układu wynosi $0,65^\circ$, podczas gdy szerokość głównej wiązki promieniowania układu jednorodnego o długości 100λ zawierającego 200 elementów odległych od siebie o $\lambda/2$ jest równa $0,51^\circ$. Jeśliby 25 elementów rozmieścić równomiernie wzdłuż apertury 100λ (odległość między elementami wyniosłaby wówczas 4λ), to szerokość głównej wiązki promieniowania tego układu byłaby prawie taka sama jak dla układu zawierającego 200 elementów, ale pojawiłyby się listki układu przy wartościach Θ równych: $\pm 14,5^\circ$; $\pm 30^\circ$; $\pm 48,5^\circ$ i $\pm 90^\circ$.

2.5. OGÓLNE ZASADY SYNTEZY CHARAKTERYSTYKI PROMIENIOWANIA

Często spotykamy się z zadaniem znalezienia rozkładu pola w aperturze, który wytwarzałby zadaną charakterystykę promieniowania. Zadanie to nosi nazwę *syntezy charakterystyki promieniowania* [33]. Ograniczymy nasze zainteresowania dla jednowymiarowej apertury liniowej o długości l . W p. 2.3.4 i 2.3.5 ustaliliśmy związek między charakterystyką promieniowania $f(u)$ a funkcją rozkładu pola w aperturze $g(p)$:

$$f(u) = \int_{-1}^1 g(p) e^{jup} dp \quad (2-164)$$

$$g(p) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(u) e^{-jup} du \quad (2-165)$$

przy czym:

$$p = \frac{2x}{l};$$

$$u = \frac{\pi l}{\lambda} \sin \Theta;$$

x — współrzędna punktu w aperturze.

Równanie (2-164) jest równaniem całkowym Fredholma pierwszego rodzaju ze względu na $g(p)$. W ogólnym przypadku, tj. przy dowolnie zadanej funkcji $f(u)$, równanie to nie jest rozwiązywalne. Rzeczywiście, jeżeli we wzorze (2-164) rozciągniemy granice całkowania od $-\infty$ do $+\infty$, to dla $|p| > 1$ musimy przyjąć $g(p) = 0$; ze wzoru (2-165) wynika natomiast, że przy dowolnie zadanej funkcji $f(u)$ funkcja $g(p)$ może przybierać wartości różne od zera również dla $|p| > 1$.

W związku z tym w praktyce zadowalamy się poszukiwaniem rozwiązań przybliżonych. W tym sensie zadanie syntezy charakterystyki promieniowania polega