

Sposób kształtowania charakterystyki kierunkowej w szyku antenowym z modulacją czasową oraz szyk antenowy z modulacją czasową.

Przedmiotem wynalazku jest sposób kształtowania charakterystyki kierunkowej w szyku antenowym z modulacją czasową, oraz szyk antenowy z modulacją czasową, stosowany zwłaszcza do modulacji czasowej w szykach antenowych składających się z różnych rodzajów promienników, takich jak na przykład: dipole, anteny mikropaskowe, anteny szczelinowe.

Znany jest sposób kształtowania charakterystyki kierunkowej w szyku antenowym z modulacją czasową polegający na okresowym włączaniu i wyłączaniu elementów szyku antenowego, co pozwala osiągnąć podobne rezultaty kształtowania wiązki jak w przypadku szyku fazowanego. Charakterystyczną właściwością tego sposobu jest istnienie harmoniczných na częstotliwościach równych wielokrotności częstotliwości przełączania. Na każdej z harmoniczných otrzymuje się charakterystykę kierunkową o innym kształcie.

Znany sposób kształtowania wiązki na częstotliwościach harmoniczných polega na okresowym włączaniu i wyłączaniu promienników $1^{(n)}$, które są rozmieszczone równomiernie w formie szyku liniowego. W wyniku okresowego włączania i wyłączania, odebrane sygnały są modulowane przez przebieg prostokątny. Jak to jest przedstawione w Shanks, H. "A new technique for electronic scanning."

IRE Transactions on Antennas and Propagation, 9.2 (1961): 162-166, wiązkę szyku z modulacją czasową, jako funkcję czasu t i kąta obserwacji θ , opisuje wzór (1), w którym f_0 – częstotliwość mikrofalowa, N – liczba promienników w szyku liniowym, $k=2\pi f_0/c$ – liczba falowa, c – prędkość światła, d – odległość pomiędzy promiennikami, $M_n(t)$ – funkcja modulująca sygnały odebrane/nadane na n -tym promienniku.

$$F(\theta, t) = e^{j2\pi f_0 t} \sum_{n=1}^N M_n(t) e^{j(n-1)kd \sin \theta} \quad (1)$$

Funkcje modulujące $M_n(t)$ są okresowe o tym samym okresie T_p oraz przyjmują wartość „1” dla stanu WŁĄCZONY oraz „0” dla stanu WYŁĄCZONY. Pozwala to zastosować rozwinięcie funkcji okresowej w szereg Fouriera i przedstawić wiązkę w dziedzinie częstotliwości zgodnie ze wzorem (2), gdzie h – numer harmonicznego rozwinięcia funkcji modulującej w szereg Fouriera, a_{nh} – amplituda zespolona h -tej harmonicznego na n -tym promienniku.

$$F(\theta, t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} e^{j2\pi(f_0 + hf_p)t} \sum_{n=1}^N a_{nh} \cdot e^{j(n-1)kd \sin \theta} \quad (2)$$

Zgodnie z (2) widmo sygnału po modulacji czasowej składa się z nieskończonej liczby wstęp bocznych (harmonicznym). Kształtowanie charakterystyki kierunkowej wiązki na każdej z harmonicznym jest możliwe poprzez zmianę zespolonych amplitud a_{nh} , które zależą od kształtu funkcji modulującej $M_n(t)$. Charakterystykę kierunkową na harmonicznym kształtuje się przez odpowiedni dobór czasów przełączania, które mogą być dobrane niezależnie dla każdego przełącznika.

Znany jest wg Li, Gang, et al. "A novel electronic beam steering technique in time modulated antenna array." *Progress In Electromagnetics Research* 97 (2009): 391-405. szyk antenowy z modulacją czasową uwidoczniony na rysunku. Ten szyk antenowy z

modulacją czasową o rozmiarze N elementów składa się z liniowego układu promienników $1^{(n)}$, równomiernie rozmieszczonych, podłączonych poprzez przełączniki dwuwrotowe $2^{(n)}$ do sieci zasilającej $3'$, gdzie $n=1\dots N$. W ten sposób przełączniki przełączają między promiennikiem a obciążeniem. Przełącznik dwuwrotowy $2^{(n)}$ jest przełącznikiem dwustanowymi - w stanie WŁĄCZONY włącza promiennik $1^{(n)}$, a w stanie WYŁĄCZONY wytraca moc mikrofalową poprzez zwarcie z dopasowanym obciążeniem, które znajduje się wewnątrz obudowy przełącznika. Takim przełącznikiem jest na przykład element elektroniczny SKY13347-360LF produkowany przez firmę Skyworks Inc.

Wadą znanego szyku antenowego z modulacją czasową jest wytracanie mocy w trakcie stanu WYŁĄCZONY, oraz ograniczenie pasma przenoszenia do wartości częstotliwości przełączania.

Celem wynalazku jest uniemożliwienie wytracania mocy w stanie WYŁĄCZONY oraz dwukrotne poszerzenie pasma przenoszenia i uzyskanie efektu odchylenia wiązki.

Istota sposobu według wynalazku polega na tym, że stan każdego z przełączników zmienia się po upływie czasu równemu połowie okresu przełączania, sekwencyjnie, kolejno po sobie i opóźnia się o wartość Δt tak, że po modulacji, widma amplitudowe dwóch sygnałów z jednej pary są jednakowe, natomiast widma fazowe różnią się o $180^\circ \cdot h$, gdzie h jest numerem harmonicznej.

Istota szyku antenowego według wynalazku polega na tym, że promienniki usytuowane są w dwóch szykach liniowych, parami i każda para połączona jest siecią zasilającą poprzez przełącznik trójwrotowy. Promienniki w parze usytuowane są prostopadle do osi szyku.

Promienniki stanowią szyk anten mikropaskowych nadrukowanych bądź wytrawionych na prostokątnej płytce dielektrycznej, która jest oddzielona od płytki dielektrycznej warstwą przewodzącą z wytrawionymi

szczelinami. Pod płytką dielektryczną znajduje się równoległa do par promienników sieć zasilająca, zaś na spodzie warstwy dielektrycznej, w miejscach rozgałęzienia sieci zasilającej, umieszczone są trójwrotnikowe przełączniki.

Wynalazek jest bliżej przedstawiony przykładowo na podstawie rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schematycznie szyk antenowy, fig. 2 przedstawia szyk antenowy jako strukturę paskową w rzucie aksonometrycznym, fig. 3 przedstawia sygnały modulujące w czasie dla kolejnych promienników szyku, fig. 4 przedstawia unormowane widmo amplitudowe i widmo fazowe sygnału na pierwszym promienniku z pary po modulacji, fig. 5 przedstawia unormowane widmo amplitudowe i widmo fazowe sygnału na drugim promienniku z pary po modulacji, fig. 6 przedstawia unormowane widmo amplitudowe i widmo fazowe sygnału na drugim promienniku z pary po modulacji i kompensacji fazy, fig. 7 przedstawia unormowane widmo amplitudowe i widmo fazowe sumy sygnałów na wyjściu przełącznika, fig. 8 przedstawia zmianę fazy na harmonicznym spowodowaną przesunięciem $\Delta t = 0.05T_p$, fig. 9 przedstawia odchylenie wiązek na pierwszej dodatniej harmonicznym, gdy opóźnienie przełączania wynosi 10% ($\Delta t = 0.1T_p$), a fig. 10 - odchylenie wiązek na pierwszej dodatniej harmonicznym, gdy opóźnienie przełączania wynosi 30% ($\Delta t = 0.3T_p$).

Zgodnie ze sposobem stan każdego z przełączników poprzez przełączanie zmienia się po upływie czasu równemu połowie okresu przełączania, sekwencyjnie i opóźnia się o wartość Δt , tak jak jest to przedstawione na fig. 3. Opóźnienie zmiany stanu ma charakter sekwencyjny, co znaczy że przełączniki zmieniają stan kolejno po sobie, czyli przełącznik $2^{(n+1)}$ jest opóźniony o Δt względem przełącznika $2^{(n)}$, przełącznik $2^{(n+2)}$, jest opóźniony o $2\Delta t$, względem $2^{(n)}$ itd. W

szczególным przypadku $\Delta t=0$ wszystkie przełączniki zmieniają stan w tym samym momencie. W ten sposób moduluje się sygnału mikrofalowego przebiegiem prostokątnym tak, że po modulacji, widma amplitudowe dwóch sygnałów z jednej pary są jednakowe, natomiast widma fazowe będą się różnić o $180^\circ \cdot h$, gdzie h jest numerem harmoniczej, czyli np. dla częstotliwości pierwszej harmoniczej ($h = 1$) sygnały modulujące są w przeciwfazie. Odchylenie wiązki jest proporcjonalne do opóźnienia czasu zmiany stanu na kolejnych przełącznikach Δt .

Jak to jest przedstawione na fig. 1 sztyk antenowy jest sztykiem planarnym o wymiarze $2 \times N$ promienników $1^{(1,1)} - 1^{(1,2)}, 1^{(2,1)} - 1^{(2,2)}, \dots, 1^{(N,1)} - 1^{(N,2)}$, gdzie N – dowolna liczba całkowita określająca ilość promienników wzdłuż osi sztyku OY. Promienniki $1^{(1,1)} - 1^{(1,2)}, 1^{(2,1)} - 1^{(2,2)}, \dots, 1^{(N,1)} - 1^{(N,2)}$ są rozmieszczone parami wzdłuż osi sztyku OY. Każda para promienników jest prostopadła do osi sztyku OY i jest połączona z parą wrót przełącznika $2^{(n)}$ i z siecią zasilającą 3 poprzez trzecie wrota mikrofalowe trójwrotowych przełączników $2^{(n)}$, gdzie $n = 1 \dots N$. W ten sposób przełączniki $2^{(n)}$ przełączają między parą promienników $1^{(1,1)} - 1^{(1,2)}, 1^{(2,1)} - 1^{(2,2)}, \dots, 1^{(N,1)} - 1^{(N,2)}$. Jeden z promienników w parze $1^{(1,1)} - 1^{(1,2)}, 1^{(2,1)} - 1^{(2,2)}, \dots, 1^{(N,1)} - 1^{(N,2)}$ jest podłączony do odpowiadającego mu trójwrotowego przełącznika $2^{(n)}$ poprzez przesuwnik fazy $4^{(n)}$.

Jak to jest przedstawione na fig. 2 podstawowy układ promienników w parach $1^{(1,1)} - 1^{(1,2)}, 1^{(2,1)} - 1^{(2,2)}, 1^{(3,1)} - 1^{(3,2)}, 1^{(4,1)} - 1^{(4,2)}$ stanowi sztyk anten mikropaskowych nadrukowanych bądź wytrawionych na prostokątnej płytce dielektrycznej 5. Płytkę dielektryczną 5 może być wykonana z laminatu ceramiczno-teflonowego, na przykład produkowanego przez firmę Rogers, lub innego dowolnego materiału o właściwościach odpowiednich dla danego zakresu pracy anteny. Pod płytką dielektryczną 5 znajduje się równoległa do sztyku anten

mikropaskowych płytka dielektryczna 6, która może być wykonana z laminatu ze szkła epoksydowego, takiego jak na przykład laminat FR4 o kącie stratności δ równym 0,02 i przenikalności elektrycznej ϵ_r wynoszącej 4,3, produkowanego przez firmę Isola GmbH. Płytkę dielektryczną 5 jest oddzielona od płytki dielektrycznej 6 warstwą przewodzącą 7 z wytrawionymi szczelinami $g^{(1,1)} - g^{(1,2)}$, $g^{(2,1)} - g^{(2,2)}$, $g^{(3,1)} - g^{(3,2)}$, $g^{(4,1)} - g^{(4,2)}$. Na spodniej stronie 9 płytki dielektrycznej 6 znajduje się równoległa do szyku anten mikropaskowych, w postaci par promienników $1^{(1,1)} - 1^{(1,2)}$, $1^{(2,1)} - 1^{(2,2)}$, $1^{(3,1)} - 1^{(3,2)}$, $1^{(4,1)} - 1^{(4,2)}$, sieć zasilająca 3. Sieć zasilająca 3 stanowi dzielnik mocy nadrukowany bądź wytrawiony na spodniej stronie płytki dielektrycznej 6. Promienniki $1^{(1,1)} - 1^{(1,2)}$, $1^{(2,1)} - 1^{(2,2)}$, $1^{(3,1)} - 1^{(3,2)}$, $1^{(4,1)} - 1^{(4,2)}$ zasilane są z przeciwległych krawędzi, co realizuje kompensację fazy odpowiadającą przedstawionym na fig. 1. przesuwnikom $4^{(1)}, \dots, 4^{(N)}$. Na spodzie warstwy dielektrycznej 6, w miejscach rozgałęzienia sieci zasilającej 3, zamocowane są trójwrotowe przełączniki $2^{(1)}, 2^{(2)}, 2^{(3)}, 2^{(4)}$. Przełączniki te są elementami elektronicznymi pracującym w paśmie częstotliwości obejmującym co najmniej pasmo przenoszenia anteny, które mogą być wykonane w technologii GaAs, tak jak na przykład element elektroniczny Skyworks AS186-302. Do gniazda 9 typu SMA, można podłączyć niepokazany na rysunku kabel nadawczy lub odbiorczy służący do nadawania lub odbioru sygnału.

Stan każdego trójwrotowego przełącznika $2^{(n)}$ zmienia się okresowo w taki sposób, że każdy z promienników w parze $1^{(1,1)} - 1^{(1,2)}$, $1^{(2,1)} - 1^{(2,2)}$, $\dots, 1^{(N,1)} - 1^{(N,2)}$, jest aktywny dokładnie przez długość czasu równą połowie okresu przełączania, czyli współczynnik wypełnienia prostokątnej funkcji modulującej wynosi 50%. Zgodnie z teorią transformaty Fouriera, widmo przebiegu prostokątnego o współczynniku wypełnienia 50% nie zawiera parzystych harmonicznych, co dwukrotnie

zwiększa odstęp pomiędzy harmonicznymi oraz w rezultacie dwukrotnie zwiększa pasmo przenoszenia systemu. Po modulacji, widma amplitudowe dwóch sygnałów z jednej pary są jednakowe, natomiast widma fazowe będą się różnić o $180^\circ \cdot h$, gdzie h jest numerem harmoniczej, czyli są w przeciwfazie, co przedstawiono na fig. 4 oraz fig. 5. Z tego powodu, korzystnym jest zastosowanie przesuwników fazy $4^{(n)}$ o stałej wartości przesunięcia fazy 180° w celu kompensacji różnicy faz wynikającej z przełączania, co skutkuje kształtem widma przedstawionym na fig. 6. Zsumowanie sygnałów z obu promienników w parze powoduje, że nieparzyste harmoniczne dodają się synfazowo, a składowa nośna zostaje wytłumiona jak tak przedstawiono na fig. 7.

Na nieparzystych harmonicznymi zachodzi możliwość odchylenia wiązki szyku antenowego. Chociaż wszystkie przełączniki zmieniają stan okresowo co pół okresu przełączania, to zmiana stanu na kolejnych przełącznikach zachodzi z pewnym opóźnieniem Δt . Zgodnie z władnością transformaty Fouriera, opóźnienia w dziedzinie czasu odpowiada przesunięciu fazowemu w dziedzinie częstotliwości. Zwiększenie Δt powoduje, że zmienia się faza harmonicznymi sygnału modulującego. Na przykład, jeżeli $\Delta t = 0.05T_p$, to zmiana fazy na każdej z harmonicznymi $\Delta\phi_h = -18^\circ \cdot h$, co przedstawiono na fig. 8. Zgodnie z teorią szyków fazowanych odchylenie wiązki jest tym większe, im większa jest wartość różnicy fazy na kolejnych promiennikach. W przypadku szyku z modulacją czasową według wynalazku, odchylenie wiązki jest tym większe, im większa jest wartość Δt . Odchylenie wiązki uzyskane za pomocą wynalazku zostało zmierzone dla dwóch przypadków: $\Delta t = 0.1T_p$ co odpowiada progresji fazy na pierwszej harmoniczej $\Delta\phi_1 = -36^\circ$ i odchyleniu wiązki w kierunku $\theta = 13^\circ$, oraz $\Delta t = 0.3T_p$ co odpowiada progresji fazy na pierwszej harmoniczej $\Delta\phi_1 = -108^\circ$ i odchyleniu wiązki

w kierunku $\theta=40^\circ$. Uzyskane odchylenie wiązki zostało zobrazowane na fig. 9 oraz fig. 10.

Prof. dr hab. inż. Andrzej
Kowalski
Instytut Fizyki