



Antena z elektronicznie sterowaną wiązką na pasmo S

BRONISŁAW STEC, MIROSŁAW CZYŻEWSKI, ADAM SŁOWIK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki,
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, adam.slowik@wat.edu.pl

Streszczenie. We współczesnych rozwiązaniach urządzeń radioelektronicznych anteny ze sterowaną elektronicznie wiązką antenową, mimo swojej złożoności układowej, są rozwiązaniem coraz częściej wykorzystywanym. Główną ich zaletą jest możliwość bardzo szybkiej zmiany kierunku maksymalnego promieniowania, przy zachowaniu dobrych parametrów kierunkowych.

Oprócz samej konstrukcji anteny, w takich rozwiązaniach niezwykle ważny jest układ formowania wiązki. Najczęściej sterowany jest on cyfrowo, poprzez komputer lub dedykowany układ cyfrowy, z poziomu programowego. Często układ ten decyduje o parametrach całej anteny.

Przedstawiona antena została zaprojektowana na pasmo S, na potrzeby zastosowania jej w radarze do lokalizacji istot żywych, umieszczonych za zasłonami typu ściana. Jej konstrukcja umożliwia ustalenie kierunku maksymalnego promieniowania dla pięciu położenia kątowych, pokrywając całkowity sektor obserwacji ok. 100° w azymucie. Wiązka w elewacji posiada stałą szerokość listka głównego, wynoszącą ok. 35° .

Elektroniczne sterowanie zapewnia bardzo szybki obrót wiązki w kącie azymutalnym, w czasie poniżej $1 \mu\text{s}$. Antena pracuje szerokopasmowo, z pasmem pracy około 500 MHz.

Struktura elementów promieniujących wraz z układem rozdziału mocy i dopasowania została wykonana w technologii niesymetrycznych linii paskowych na laminacie FR4.

Układ formowania wiązki zrealizowany został w oparciu o elektroniczne przełączniki mikrofalowe oraz linie opóźniające, wprowadzające odpowiednie opóźnienia fazowe. Stanowi on integralną część anteny.

Słowa kluczowe: telekomunikacja, antena sterowana elektronicznie, antena planarna, układ formowania wiązki antenowej

1. Wstęp

Konstrukcje anten z elektronicznie sterowaną wiązką należą do najnowocześniejszych rozwiązań. Elektroniczne sterowanie może odbywać się na kilka sposobów, jednak bardzo popularnym rozwiązaniem jest pobudzenie poszczególnych

elementów promieniujących sygnałami odpowiednio opóźnianymi w fazie, w ten sposób wykorzystuje się zalety antenowych szyszków fazowanych, najczęściej liniowych, ale w niektórych rozwiązaniach również cylindrycznych.

Rozwiązania anten planarnych znane są od połowy XX wieku, jednak brak odpowiednio wydajnych środków obliczeniowych powodował, że ich konstrukcja była kłopotliwa na etapie projektowania. Ich opis teoretyczny jest złożony i skomplikowany. Dopiero rozwój technik obliczeniowych i metod numerycznych spowodował pojawienie się dużej liczby rozwiązań anten planarnych, początkowo w zastosowaniach wojskowych i specjalnych, a później również w większości zastosowań komercyjnych.

Anteny planarne cechują się: nieskomplikowaną konstrukcją, prostą produkcją, niskim kosztem jednostkowym, możliwością szybkiego uzyskania gotowego wyrobu w oparciu o projekt, względnie niewielkimi rozmiarami i umiarkowanymi parametrami.

Projektowanie anten planarnych jeszcze niedawno było domeną wybranych ośrodków naukowych i konstrukcyjnych. Obecnie powszechne wykorzystanie programów symulacyjnych, bazujących np. na metodach elementów skończonych, powoduje, że każda osoba, dysponująca odpowiednim przygotowaniem zawodowym, może zaprojektować własną, niezbyt skomplikowaną antenę, wytrawić ją chemicznie bądź wyciąć mechanicznie na laminacie i uzyskać gotowy produkt. Jakość uzyskanej w taki sposób anteny zależy od dokładności przyjętego modelu, jakości użytych materiałów i dokładności wykonania samej anteny. Takie anteny nie odbiegają zbytnio pod względem parametrów od rozwiązań komercyjnych, dostępnych na rynku.

Wspomniane wyżej cechy powodują, że anteny planarne są obecnie powszechnie wykorzystywane w większości zastosowań telekomunikacyjnych.

W przypadku wybranych systemów, gdzie niezbędne jest uzyskanie wysokich, często wysublimowanych parametrów, jak szerokie pasmo pracy, duży zysk energetyczny, wąska wiązka główna, bardzo niski poziom listków bocznych, anteny na podłożu dielektrycznym ustępują pola specjalnym rozwiązaniom anten. Pewnym kierunkiem jest sięganie po szyski fazowane, najczęściej dwuwymiarowe, które znacznie poprawiają parametry kierunkowe w stosunku do anten pojedynczych, jednak rozwiązania te nie są konkurencyjne w stosunku do np. anten parabolicznych.

Szyski antenowe niosą ze sobą możliwość nie tylko kształtowania wiązki kierunkowej, lecz także możliwość sterowania jej położeniem w przestrzeni, zarówno w sposób mechaniczny, jak i najczęściej stosowany elektroniczny.

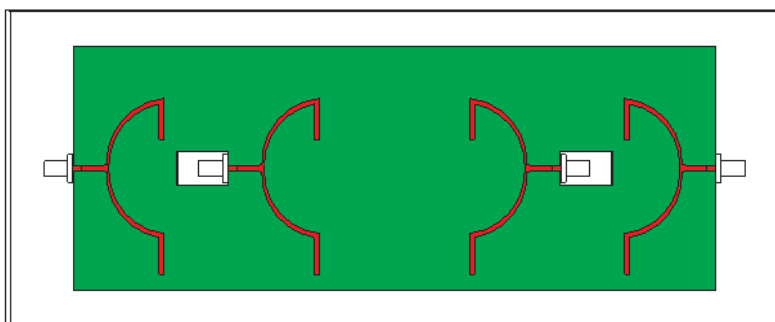
Użycie układu sterowania wiązką, opartego na przełącznikach elektronicznych, współpracujących z układem wypracowania odpowiednich opóźnień fazowych, daje możliwość elektronicznego sterowania położeniem wiązki antenowej w płaszczyźnie pionowej i poziomej. Szybkość działania takiego rozwiązania zależy bezpośrednio od szybkości samych przełączników, ale także od szybkości działania układu wytwarzającego sygnały sterujące — najczęściej cyfrowego. Takie rozwiązanie określa się cyfrowym sterowaniem wiązką. Rozwiązania z elektronicznym sterowaniem

wiązką są dedykowane jedynie dla specjalistycznych aplikacji, ze względu na złożoność całego systemu i stosunkowo duży koszt przełączników mikrofalowych bądź sterowanych cyfrowo przesuwników fazy.

2. Opis konstrukcji anteny

Do konstrukcji anteny wykorzystano projekt szyku antenowego o stałym kącie promieniowania, zrealizowany na laminacie o grubości 1,5 mm. Konieczność niewielkich wymiarów anteny wymusiła ograniczenie liczby dipoli do czterech par dipoli [1, 3, 8].

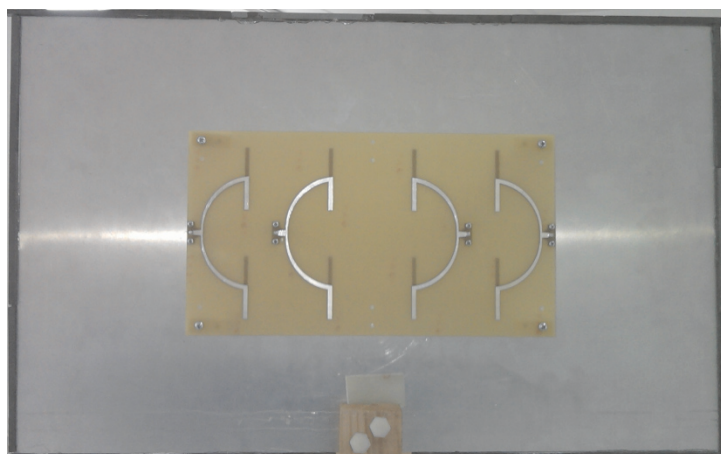
W celu uzyskania dobrych parametrów kierunkowych szyku, przy zachowaniu stosunkowo małej powierzchni promienników, a więc również niewielkiej liczbie elementów promieniujących, zastosowano reflektor płaski. Wymiary reflektora są kompromisem między zakładanymi parametrami kierunkowymi a możliwościami gabarytowymi całej anteny. Aby zminimalizować listki boczne o charakterze dyfrakcyjnym, w realizacji anteny zastosowano materiały tłumiące, umieszczone po bokach anteny. Poglądowy schemat rozmieszczenia promienników na laminacie przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia elementów promieniujących na laminacie dla omawianej anteny

Antena cechuje się charakterystyką stałą w płaszczyźnie pionowej oraz przestrzeganą elektronicznie w płaszczyźnie poziomej. Sygnały podawane są na poszczególne pary promienników poprzez złącza SMA oraz linie koncentryczne poprowadzone przez otwory w reflektorze. Taka konfiguracja doprowadzeń pozwala na minimalizację wpływu dodatkowych elementów na parametry szyku. Z tego samego powodu elementy sterowania wiązką: blok przełączników oraz linii opóźniających, umieszczone zostały za reflektorem płaskim [3, 8].

Wymiary struktury promieniującej wynoszą 27 cm × 15 cm, jednak konieczność zastosowania reflektora płaskiego i materiałów tłumiących spowodowała zwiększenie wymiarów całego układu około dwukrotnie [8].



Rys. 2. Widok realizacji anteny z dużym reflektorem płaskim podczas próbnych pomiarów

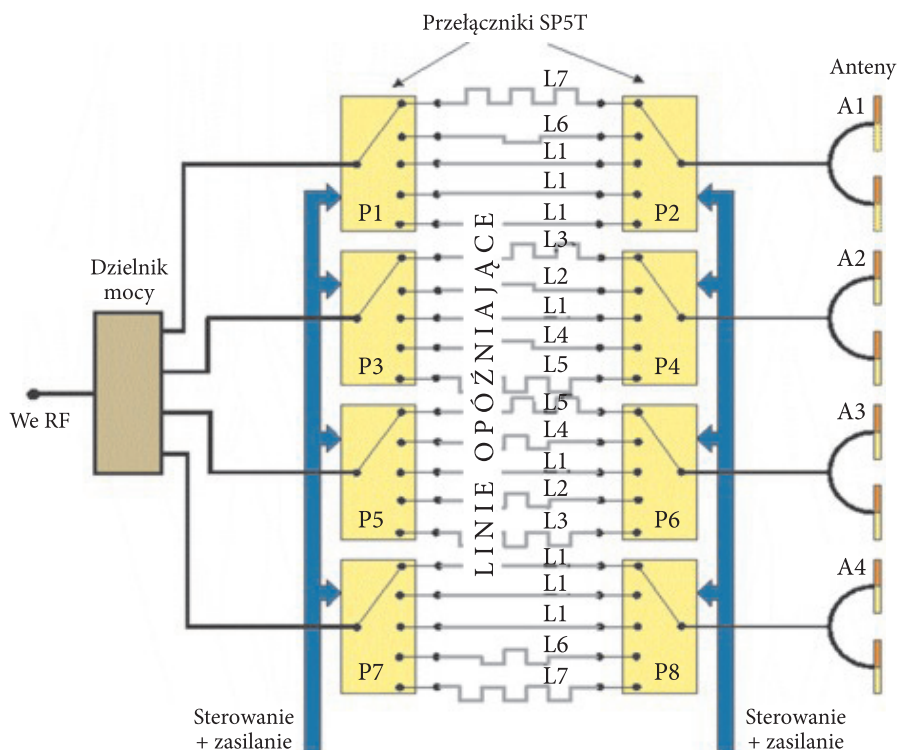
3. Układ sterowania wiązką antenową

Ważnym elementem całego systemu antenowego jest blok sterowania wiązką antenową. Sterowanie takie obecnie zawsze realizowane jest elektronicznie, poprzez odpowiednią konfigurację dzielników mocy, przełączników, przesuwników fazy oraz wzmacniaczy/tłumików korygujących amplitudy sygnałów podawanych na poszczególne elementy promieniujące. Często blok sterowania wiązki nazywa się układem formowania wiązki antenowej.

W omawianej antenie sterowanie położeniem wiązki zrealizowano, wykorzystując szybkie przełączniki mikrofalowe oraz linie opóźniające, pełniące rolę przesuwników fazy. Z każdą parą dipoli współpracuje para pięciopozycyjnych przełączników, między które włączono po pięć linii opóźniających o odpowiednio dobranych długościach. W ten sposób uzyskuje się pięć położen azymutalnych wiązki antenowej.

Do budowy układu sterowania wykorzystano pięciopozycyjne szerokopasmowe przełączniki mikrofalowe typu PE42451 firmy Peregrine Semiconductor, zapewniające szybkie przełączanie przy dobrej izolacji wrót wyjściowych. Możliwość sterowania cyfrowego przełączników ułatwia zarządzanie pracą anteny z poziomu warstwy programowej komputera. Ważnym elementem układu sterowania są linie opóźniające, zrealizowane w postaci półsztywnych linii koncentrycznych, włączonych między przełącznikami. Sygnał wejściowy z generatora rozdzielany jest do czterech par przełączników poprzez dzielnik mocy. W ten sposób cztery pary dipoli są pobudzane odpowiednio opóźnionymi sygnałami.

Same układy przełączników są umieszczone na płytkach PCB, bez żadnych obudów lub innych elementów zabezpieczających je mechanicznie i elektrycznie. Dzięki temu przełączniki można było rozmieścić w konfiguracji zajmującej znacznie mniej



Rys. 3. Schemat ideowy układu sterowania wiązką antenową

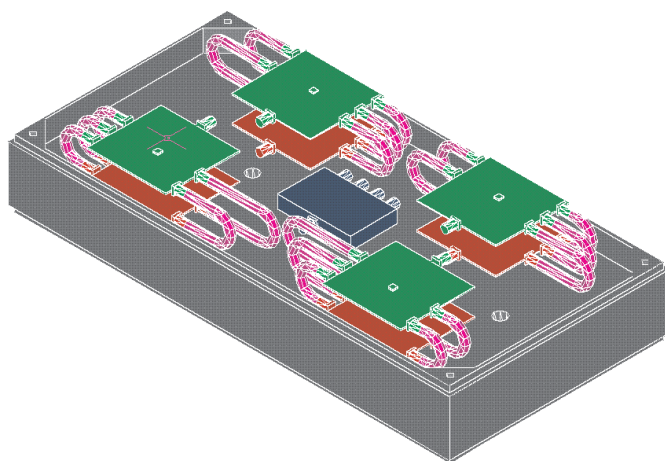
miejsca, niż gdyby każdy z nich posiadał oddzielną obudowę. Niestety mimo tych zabiegów, kubatura całego bloku przełączników i tak jest znaczna i przekracza swoją powierzchnią powierzchnię ekranu anteny. Ze względu na możliwość zakłócania pracy przełączników przez sygnały zewnętrzne, blok przełączników umieszczono w obudowie z aluminium. Wyniki pomiarów anteny w rzeczywistych warunkach wskazują jednoznacznie na poprawność przyjętego rozwiązania.

Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcie anteny wraz z dołączonym do niej blokiem sterowania. Struktura promieniująca wraz z ekranem umieszczona jest w dielektrycznej obudowie, do której dołączony jest blok sterowania ekranowany obudową z duraluminium. Razem oba bloki tworzą pojedynczy moduł antenowy. Sygnał w.cz. podawany jest na antenę poprzez złącze SMA, a napięcia zasilania i sygnały sterujące poprzez złącze szeregowo RS232. Oba złącza, zarówno mikrofalowe, jak i zasilające i sterowania, umieszczono w bocznych ściankach metalowej obudowy bloku sterowania.

Elementy bloku sterowania rozmieszczono w obudowie tak, by jak najlepiej wykorzystać dostępną objętość. Większość miejsca zajmują przełączniki mikrofalowe oraz linie koncentryczne, ze względu na minimalne promienie gięcia linii półsztynnych i dużą ich liczbę.



Rys. 4. Zdjęcia anteny wraz z blokiem sterowania wiązką podczas próbnych pomiarów

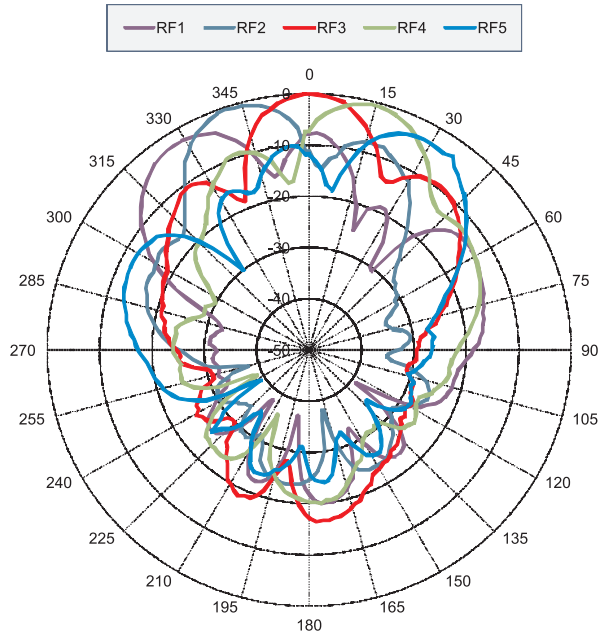


Rys. 5. Pogładowy rysunek przedstawiający rozmieszczenie elementów bloku sterowania wiązką antenową

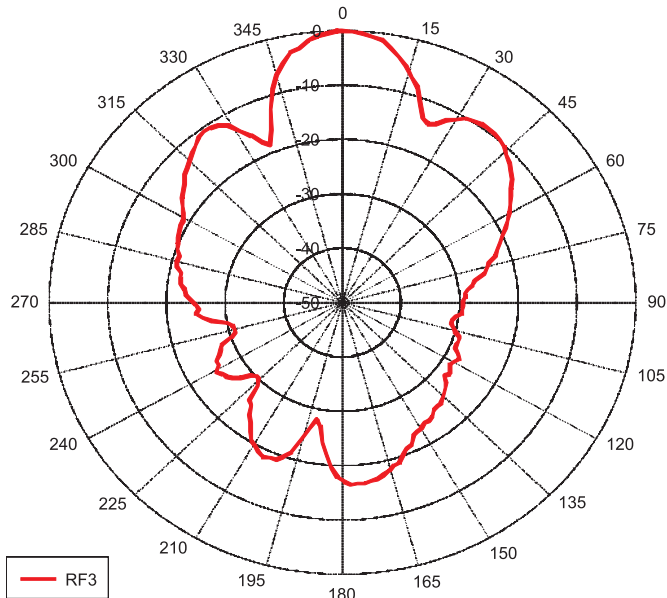
4. Wyniki pomiarów

W celu weryfikacji wyników symulacji, przyjętych założeń oraz sprawdzenia pracy układu sterowania wiązką badanej anteny zostały wykonane próbne pomiary charakterystyk kierunkowych anteny w poszczególnych pozycjach wiązki antenowej. Wyniki pomiarów wykazały poprawność działania struktury sterującej pracą anteny. Przedstawiono je na rysunkach 6-9. Na rysunkach tych oznaczenia RF1-RF5 oznaczają poszczególne położenia wiązek, przy czym RF1 jest wiązką maksymalnie skręconą w lewo, natomiast RF5 — maksymalnie skręconą w prawo, wiązka RF3 jest skierowana w kierunku 0° , co odpowiada kierunkowi na wprost.

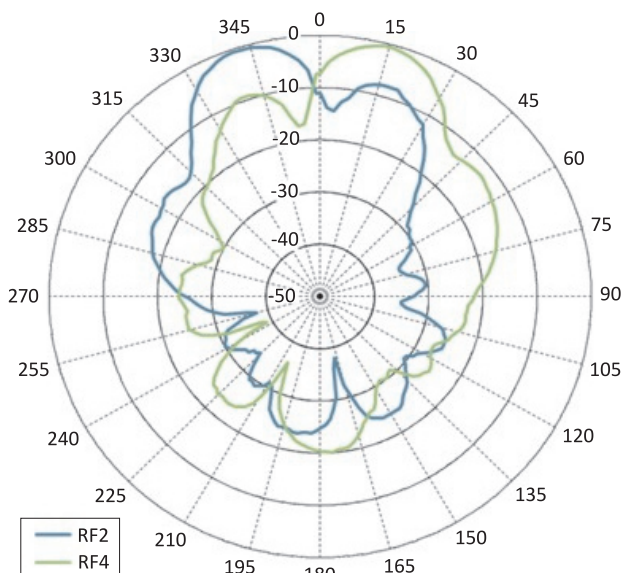
Wyniki pomiarów potwierdziły uzyskane wyniki symulacji. Wraz ze wzrostem kąta skręcenia charakterystyki, zarówno w lewo, jak i prawo od kierunku na wprost, obserwuje się niewielki spadek zysku kierunkowego, sięgający 2-3 dB względem zysku na kierunku maksymalnego promieniowania. Ponadto wraz ze wzrostem



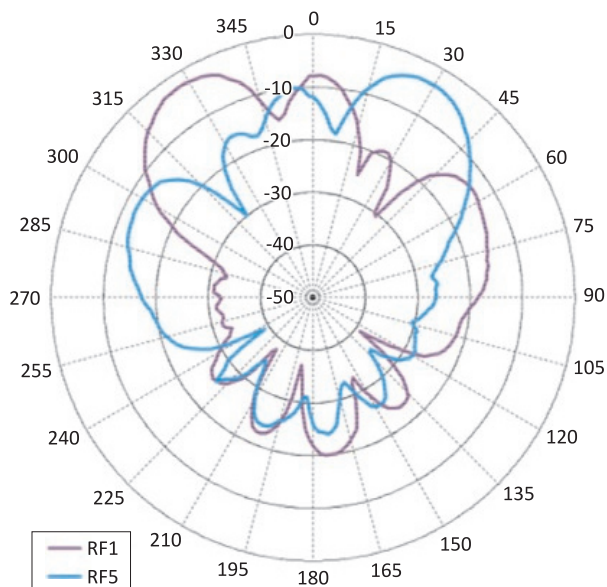
Rys. 6. Unormowane charakterystyki promieniowania badanej anteny dla wszystkich pięciu położenia wiązki głównej



Rys. 7. Unormowana charakterystyka promieniowania układu antenowego dla wiązki 3 — kierunku 0°



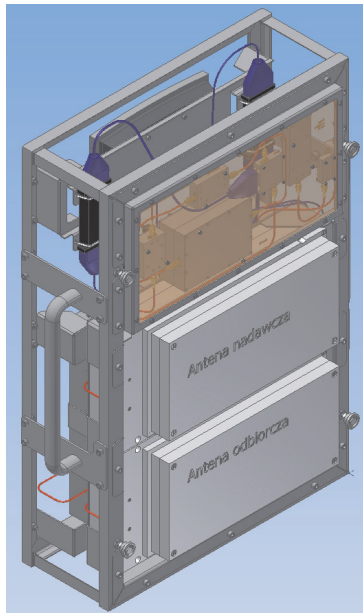
Rys. 8. Unormowane charakterystyki promieniowania anteny dla wiązek 2 i 4



Rys. 9. Unormowane charakterystyki promieniowania anteny dla wiązek 1 i 5

skręcenia od kierunku maksymalnego promieniowania wiązka główna ulega poszerzeniu, a poziomy listków bocznych rosną o ok. 4 dB.

Zaobserwowano pewną rozbieżność między pożądanymi a uzyskanymi kierunkami skręcenia wiązek na poszczególnych kierunkach. Przyjęto w założeniach, że



Rys. 10. Rysunek przenośnego radaru z zamontowaną anteną sterowaną elektronicznie

kierunki skręcenia wiązek będą wynosić kolejno: -40° , -20° , 0° , 20° , 40° , natomiast uzyskane kąty wynoszą odpowiednio: -37° , -17° , 0° , 15° , 32° . Zamiast oczekiwanego sektora obserwacji ok. 100° uzyskano nieco węższy, bo wynoszący około 90° . Wynika to wprost z niedoszacowania długości linii opóźniających, które muszą być nieco dłuższe od obliczonych i fizycznie zrealizowanych. Jednak oprócz tej różnicy, pozostałe parametry są zgodne z wynikami uzyskanymi wcześniej, zarówno na etapie symulacji jak i pierwszych pomiarów. Na przedstawionych charakterystykach widać pełną symetrię między charakterystykami skręconymi w prawo i w lewo od kierunku głównego, zatem nie występowały czynniki zewnętrzne wpływające na kształt mierzonych charakterystyk. W kolejnym egzemplarzu anteny uwzględniono konieczne niewielkie poszerzenie obserwowanego sektora poprzez odpowiednie wydłużenie linii opóźniających.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono konstrukcję, parametry i wyniki pomiarów anteny z elektronicznie sterowaną wiązką na pasmo S. Antena posiada wiązkę sterowaną w jednej płaszczyźnie. Ważnym elementem składowym anteny jest układ sterowania wiązką, zrealizowany w oparciu o pięciopozycyjne przełączniki mikrofalowe oraz linie opóźniające. Dzięki temu możliwe jest sterowanie położeniem wiązki antenowej

w oparciu o sygnały cyfrowe. Sterowanie takie zrealizowano drogą programową, w oparciu o komputer sterujący, za pośrednictwem portu RS232, położeniem wiązki. W ten sposób sterowanie może odbywać się całkowicie automatycznie, zgodnie z przyjętym algorytmem zmian, lub też w trybie ręcznym.

Uzyskane wyniki pomiarów potwierdzają poprawność przyjętych rozwiązań. Charakterystyka anteny jest symetryczna. Układ sterowania wiązką umożliwia ustawienie jednego z pięciu położenia wiązki w sektorze obserwacji ok. 90° . Zmniejszenie się nieco sektora obserwacji uwzględniono w kolejnym egzemplarzu anteny, poprzez niewielkie wydłużenie linii opóźniających.

Antena została z powodzeniem zastosowana w radarze — lokalizatorze istot żywych, umieszczonych za przesłonami, wykorzystującym ciągły sygnał szumowy. Stwierdzono poprawną pracę anteny, a w szczególności układu sterowania, który bezproblemowo współpracował z programem zarządzającym pracą radaru.

LITERATURA

- [1] J. HUANG, *The finite ground plate effect on the microstrip antenna radiation pattern*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-31, July 1983, 649-653.
- [2] R.C. JOHNSON, *Antenna engineering handbook*, third edition, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [3] H.E. KING, J.L. WONG, *An experimental study of balun-fed open-sleeve dipole in front of metallic reflector*, IEEE Transactions on Antennas and propagation, AP-20, March 1972, 201-204.
- [4] D.M. POZAR, *Microwave engineering*, third edition, John Wiley & Sons, New York, 2005.
- [5] W.F. RICHARDS, Y.T. LO, D.D. HARRISON, *An improved theory for microstrip antennas and applications*, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, AP-29, January 1981, 38-46.
- [6] W.L. STUTZMAN, G.A. THIELE, *Antenna theory and design*, 2-nd edition, John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [7] H.J. VISSER, *Array and phased array antenna basics*, John Wiley & Sons, New York, 2005.
- [8] B. STEC, A. JEZERSKI, M. CZYŻEWSKI, A. SŁOWIK, *4-elementowy fazowany szyk antenowy na pasmie S*. IV Konferencja Naukowa UISR'11, Rynia 16-17.11.2011, CD-ROM.

B. STEC, M. CZYŻEWSKI, A. SŁOWIK

Electronically steered antenna for S-band

Abstract. The electronically steered antennas are nowadays much often used in modern telecommunication systems, despite much more complicated circuit structure. The most important merit is very rapid mainlobe direction turning, with good directional parameters maintain. This one is steered digitally, using computer or dedicated digital circuit, from programming level. Often, this circuit decides about the parameters of the whole antenna system.

The described antenna was designed to work in S-band, for using it in radar for localization of living human through the wall.

The mainlobe direction can be set for five angle values, covering angle sector about 100° in the azimuth plane. In elevation plane, the mainlobe width has fixed value of about 35° .

Electronically steering lets very quickly mainlobe turning in elevation, in time below $1 \mu\text{s}$. The antenna works wideband, with about 500-MHz band.

The radiating elements structure with power distribution and matching network in the microstrip line technology on the FR4 substrate was made.

Beamforming network, basing on the microwave electronic switches and delay lines, was made. This one is digitally steered and it is an integral part of the whole antenna system.

Keywords: telecommunication, electronically steered antenna, planar antenna, antenna beamforming network

