

## Układ antenowy na bazie anten mikropaskowych dla systemu 5G

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono układ antenowy umożliwiający kształtowanie wielowiązkowej charakterystyki promieniowania. Układ antenowy został zaprojektowany na bazie anten mikropaskowych, w których łata promieniująca zbudowana została w geometrii fraktalnej. Wykorzystano fraktal o nazwie „wyspa Minkowskiego” (Minkowski Island). Otrzymana antena pracuje na częstotliwości 3.6 GHz co odpowiada zakresowi pasma gigahercowego systemu 5G telefonii komórkowej. Dzięki zastosowanej geometrii fraktalnej uzyskano symetryczną charakterystykę promieniowania w płaszczyźnie E oraz H. Dodatkowo zastosowano reflektor płaski co skutecznie zminimalizowało listki tylne w charakterystyce promieniowania. Na bazie tych anten zbudowano układ antenowy składający się z 4 anten. Charakterystyki promieniowania otrzymanego układu antenowego mają charakter wielowiązkowy co może być wykorzystane w systemie 5G w antenach inteligentnych oraz adaptacyjnych.

**Abstract.** In the work the antenna array has been presented enabling the formation of the multibeam radiation pattern. The antenna array was designed of microstrip antennas in which patches have the fractal geometry. The Minkowski Island fractal has been adopted. The designed antenna works at the frequency of 3.6 GHz what answers to the range of the band of the 5G system of the cellular telephony. Thanks to applied fractal geometry one obtained the symmetrical radiation pattern in the plane E and H. Additionally one applied the flat reflector what effectively minimized rear beams in the radiation pattern. On the basis of these antennas one built the antenna array composed of 4 antennas. Radiation patterns of the received antenna array have multibeam characters what can be used in the system 5G in smart and adaptive antennas. (**The antenna array based on microstrip antennas for 5G system**)

**Słowa kluczowe:** system 5G, układy antenowe, antena mikropaskowa, fraktal.

**Keywords:** system 5G of cellular telephony, antenna array, microstrip antenna, fractal.

### Wprowadzenie

Ciągły wzrost zapotrzebowania na bezprzewodowe przesyłanie informacji wynikający z rozwoju technologicznego, a także wzrostu populacji ludzkiej sprawia, że systemy bezprzewodowe muszą się cechować szybką transmisją danych oraz jak najmniejszym czasem opóźnienia. Obecnie szeroko stosowany system LTE oraz jego poprzednie generacje nie są w stanie w dłuższej perspektywie zapewnić tak wygórowanych parametrów transmisji.

W celu zapewnienia możliwości wykorzystania całego wachlarza usług bezprzewodowych producenci opracowali i powoli wdrażają system piątej generacji 5G. Prędkość przesyłu danych w sieci 5G jest o około 1000 razy większa niż w sieci LTE i jest to odpowiedź na rosnące potrzeby rynku telekomunikacyjnego [6].

Dla sieci 5G przewidziano 3 zakresy częstotliwości a mianowicie:

- pasmo dolne, zwane też pasmem megahercowym: 600 – 700 MHz,
- pasmo środkowe (pasmo gigahercowe): 3,4 – 3,8 GHz,
- pasmo wysokie (pasmo milimetrowe): 26 – 28 GHz.

Pasmo 600 MHz – 700 MHz z uwagi na długość fali ( $\lambda = 40\text{--}50$  cm) charakteryzuje się dużym zasięgiem, a sygnały są relatywnie słabo pochłaniane przez występujące w terenie przeszkody. Wobec tego można wykorzystywać je do pokrycia większej powierzchni terenu, takich jak na przykład obszary wiejskie czy tereny podmiejskie.

Częstotliwości w paśmie 3,4 GHz – 3,8 GHz ( $\lambda = 7,9\text{--}8,8$  cm) wyróżniają się możliwościami zapewnienia usługi większej liczbie użytkowników w związku z dużą pojemnością pasma. Pasma to będzie cechować się dobrym pokryciem terenu i może być wykorzystane w terenach silnie zurbanizowanych.

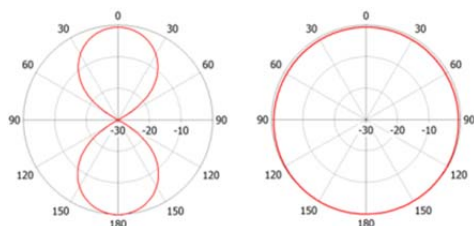
Częstotliwości powyżej 26 GHz ( $\lambda < 11$  mm), ze względu na bardzo mały zasięg fal milimetrowych, mogą być wykorzystywane głównie tam, gdzie najbardziej istotna jest szybkość transmisji oraz minimalne opóźnienie.

Kolejną, istotną różnicą w porównaniu do poprzednich systemów telefonii komórkowej będzie forma emisji promieniowania elektromagnetycznego. W systemie 5G anteny nadawczo-odbiorcze będą antenami „inteligentnymi” (z ang. smart antennas) emitującymi promieniowanie w postaci wielu wąskich wiązek umożliwiających łączność tylko z określonym abonentem. Wąskie wiązki promieniowania będą nadsłuchiwać za abonentem. Aby umożliwić ukształtowanie promieniowania w postaci wielu wiązek trzeba zastosować układy antenowe. Zgodnie z teorią promieniowania układów antenowych ilość jednoczesnych wiązek promieniowania, ich szerokość kątową w przestrzeni oraz możliwości przemieszczania zależą między innymi od ilości elementarnych źródeł, jak również od przesunięcia fazowego między nimi. W takim przypadku pasmo dolne ze względu na znaczne rozmiary anten raczej nie będzie wykorzystywane do wielowiązkowej emisji. Efekty te można z powodzeniem wdrożyć dla pasma środkowego i wysokiego.

Obecnie w łączności bezprzewodowej jako anteny nadawczo-odbiorcze stosowane są głównie anteny dipolowe [7]. Dla takich anten w celu uzyskania wysokiej sprawności i dobrego zysku kierunkowego trzeba zapewnić aby długości dipoli odpowiadały połowie długości fali. Anteny dipolowe, choć powszechnie wykorzystywane w łączności bezprzewodowej, oprócz wąskiego pasma pracy posiadają jeszcze drugą niedogodność, a mianowicie charakteryzują się odmiennymi charakterystykami w dwóch ortogonalnych płaszczyznach, tj. w płaszczyźnie E i H – rys.1. To sprawia, że realizacja łączności w płaszczyźnie H jest dookólna natomiast w płaszczyźnie E tylko w określonym zakresie kątów. Ten aspekt ma również znaczne negatywne implikacje w przypadku budowy układów antenowych z wykorzystaniem takich anten jako elementów układu antenowego.

W pracy w celu uzyskania podobnych charakterystyk promieniowania w obu ortogonalnych płaszczyznach zaproponowano antenę mikropaskową z łata promieniującą zbudowaną na bazie geometrii fraktalnej. W takim

przypadku można uzyskać podobną charakterystykę promieniowania w obu płaszczyznach.



Rys. 1. Charakterystyka promieniowania anteny dipolowej: w płaszczyźnie E – rys. lewy, w płaszczyźnie H – rys. prawy

### Układy antenowe

Układy antenowe nazywane również szykami fazowanymi umożliwiają uzyskanie wielowiązkowej charakterystyki promieniowania dzięki interferencji fal emitowanych z wszystkich anten będących elementami układu antenowego. Z tego warunku wynika, że aby zachodziła interferencja fal wskazanym jest aby amplituda dochodzących fal nie była bliska zeru, jak to mam miejsce w przypadku anteny dipolowej w płaszczyźnie E.

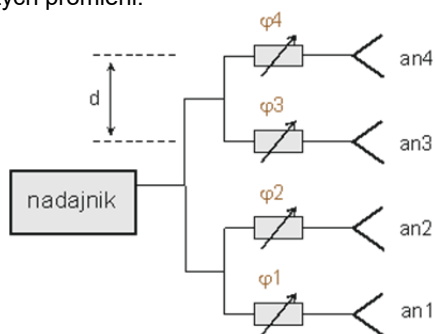
Zgodnie z teorią układów antenowych charakterystyka promieniowania takiego układu  $F_{UA}(\theta)$  jest iloczynem charakterystyki promieniowania pojedynczej anteny  $F(\theta)$  oraz współczynnika nazywanego mnożnikiem układu  $FM(\theta)$  [3, 7], zgodnie z zależnością:

$$(1) \quad (F_{UA}(\theta) = F(\theta)FM(\theta))$$

Mnożnik układu  $FM(\theta)$  określa rozkład promieniowania układu antenowego złożonego ze źródeł izotropowych czyli takich dla których charakterystyka promieniowania  $F(\theta) = 1$ . Ogólne wyrażenie na mnożnik układu antenowego daje się sprowadzić do następującej analitycznej postaci.

$$(2) \quad FM(\theta) = [1 + e^{-j(\psi)} + e^{-j(2\psi)} + \dots + e^{-j(n\psi)}]$$

gdzie  $\psi$  jest fazą promieni poszczególnych anten, a  $n$  jest ilością anten w układzie antenowym. Dodatkowo, w celu uzyskania określonej wielowiązkowej charakterystyki w torach zasilających umieszczane są przesuwniki faz  $\varphi_n$  (rys.2) a niekiedy również podzespoły modyfikujące amplitudy tych promieni.



Rys. 2. Symboliczny schemat układu antenowego z przesuwnikami fazy ( $\varphi_n$ )

Z zależności (1) wynika, że największa możliwość kształtowania charakterystyki promieniowania układem antenowym występuje wtedy gdy poszczególne anteny są izotropowe ( $F(\theta) = 1$ ). Z kolei na kierunkach gdzie charakterystyka promieniowania poszczególnych anten jest zbliżona do zera wtedy skuteczność kształtowania charakterystyki układu antenowego jest słaba. Mimo wszystko ta własność może być wykorzystana do „wycięcia” charakterystyki na „niechcianych” kierunkach. Docelowo

układ antenowy powinien zapewnić pracę w sektorze  $120^\circ$  co jest typowym zakresem pracy anten na stacjach bazowych. Na kierunkach listka tylnego oraz listków bocznych charakterystyka promieniowania powinna mieć znacznie mniejsze wartości aniżeli na listku głównym.

### Fraktalna antena mikropaskowa

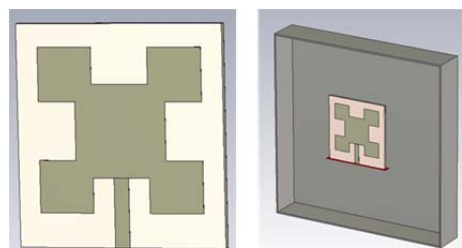
Klasyczna antena mikropaskowa z prostokątną łąką promieniującą charakteryzuje się, w dużej mierze, polaryzacją E, z pomniejszeniem poziomów promieniowania w płaszczyźnie H. W celu uzyskania jednakowych charakterystyk promieniowania w obu płaszczyznach opracowano antenę mikropaskową na bazie geometrii fraktalnej.

Termin „fraktal” został przestawiony jako pierwszy przez B. Mandelbrota [4]. Badania były prowadzone wcześniej, lecz dopiero Mandelbrot uporządkował i usystematyzował charakterystykę fraktali. Zakres obszarów w, których swoje zastosowanie znajdują fraktale jest bardzo szeroki. Ze względu na swoje specyficzne właściwości fraktale stały się obiektem badań pod kątem projektowania i implementowania miniaturowych anten. Główną cechą fraktali jest „samo podobieństwo”. Oznacza to, że są one podobne we wszystkich skalach [2]. Fraktale to geometryczne kształty, które można podzielić na części i kopiować dowolną ilość razy każda pomniejszona kopia będzie podobna do początkowego fraktala.

W pracy do zaprojektowania łąki promieniującej zaadaptowano fraktal nazywany „wyspa Minkowskiego”. Fraktal ten zaprezentowany przez niemieckiego matematyka Hermana Minkowskiego. Inicjatorem fraktala Minkowskiego jest kwadrat, w celu wykonania pierwszej iteracji każdy z boków musi zostać podzielony na trzy równe odcinki. W miejscu środkowego odcinka należy wykonać wcięcie z przyjętą głębokością i usunąć nowo powstały prostokąt. Widok zerowej (zerowa iteracja) oraz pierwszej iteracji fraktala Minkowskiego przedstawiono na rys.3.



Rys. 3. Inicjator (rys. lewy) oraz pierwsza iteracja fraktala Minkowskiego

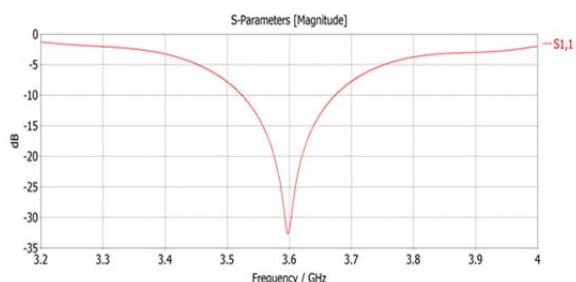


Rys. 4. Widok anteny z geometrią fraktala Minkowskiego (rys. lewy) oraz widok tej anteny z reflektorem (rys. prawy)

Antena mikropaskowa została zbudowana na bazie laminatu FR4, z geometrią fraktala Minkowskiego pierwszej iteracji. Widok górnej strony anteny (tzw. łąka promieniująca) została przedstawiona na rys. 4. Spód tej anteny (masa) jest litą metalową powierzchnią, jak w klasycznych antenach mikropaskowych. Wymiary fraktala zostały określone w ramach optymalizacji częstotliwości rezonansowej równej 3,6 GHz.

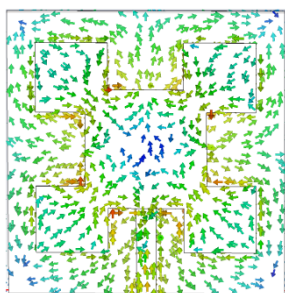
W celu uzyskania charakterystyki sektorowej  $120^\circ$  za anteną umieszczono reflektor półfalowy. Widok anteny mikropaskowej w wolnej przestrzeni oraz z reflektorem półfalowym przedstawiono na rys.4.

Geometria anteny umożliwia uzyskanie częstotliwości rezonansowej równej 3,6 GHz co dokumentuje w Współczynnik odbicia S11 przedstawiony na rys.5.



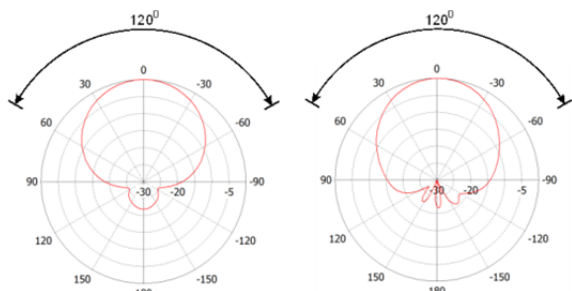
Rys. 5. Współczynnik odbicia anteny z geometrią fraktalną

Fraktale znalazły szerokie zastosowanie w technice antenowej umożliwiając przepływ prądów po znacznie dłuższej drodze. W niniejszej pracy fraktal Minkowskiego umożliwił uzyskanie symetrycznego rozptyłu prądów, niezbędnego do uzyskania symetrycznej charakterystyki promieniowania. Rozkład prądów płynących po promieniującej łacie oraz ekranie przedstawiono na rys.6.



Rys. 6. Rozkład prądów płynących po łacie oraz ekranie

Dzięki symetrycznemu rozkładowi prądów przedstawiona antena z reflektorem płaskim posiada bardzo podobną charakterystykę promieniowania w obu ortogonalnych płaszczyznach (tj E oraz H) – rys.7.



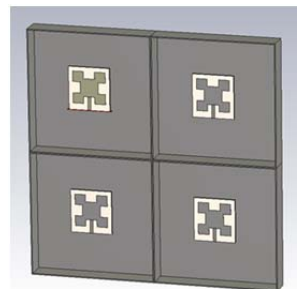
Rys. 7. Charakterystyka promieniowania fraktalnej anteny mikropaskowej z reflektorem płaskim: w płaszczyźnie E – rys. lewy, w płaszczyźnie H – rys. prawy

Rysunek 7 przedstawia charakterystykę promieniowania anteny fraktalnej z reflektorem płaskim w 2 ortogonalnych płaszczyznach, tj. w płaszczyźnie E oraz H. Charakterystyki te mają bardzo podobne kształty co pozwoli na symetryczne kształtowanie charakterystyki promieniowania układu antenowego złożonego z takich anten. Na rysunku tym zaznaczono zakres sektorowej pracy czyli  $120^\circ$ . Taka

antena charakteryzuje się bardzo niskim poziomem listków tylnych, tj. poniżej  $-20$  dB.

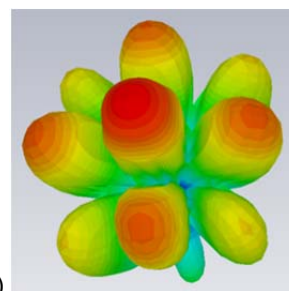
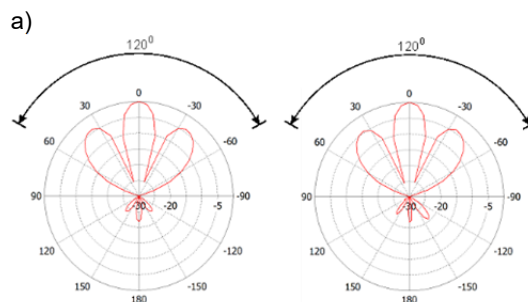
### Proponowany układ antenowy

Aby uzyskać wielowiązkową charakterystykę promieniowania zbudowano przykładowy układ antenowy. Układ zbudowano z 4 anten, po dwie w pionie i dwie w poziomie. Widok układu antenowego przedstawiono na rys. 8. Konstrukcja anten oraz reflektora pozwala budować układy antenowe zbudowane z dowolnej ilości elementarnych anten.



Rys. 8. Widok przykładowego układu antenowego złożonego z 4 anten elementarnych z reflektorami płaskimi

Wypadkowa charakterystyka promieniowania jest wynikiem interferencji fal ze wszystkich anten. Na kierunkach gdzie fale są w tej samej fazie następuje nakładanie się fal (sumowanie). Z kolei gdy fazy promieni są przeciwne wtedy natężenie pola elektromagnetycznego się zeruje, a charakterystyka promieniowania przyjmuje wartości zerowe. Na rys. 9 przedstawiono charakterystykę promieniowania układu antenowego złożonego z 4 anten, w konfiguracji jak na rys.8.



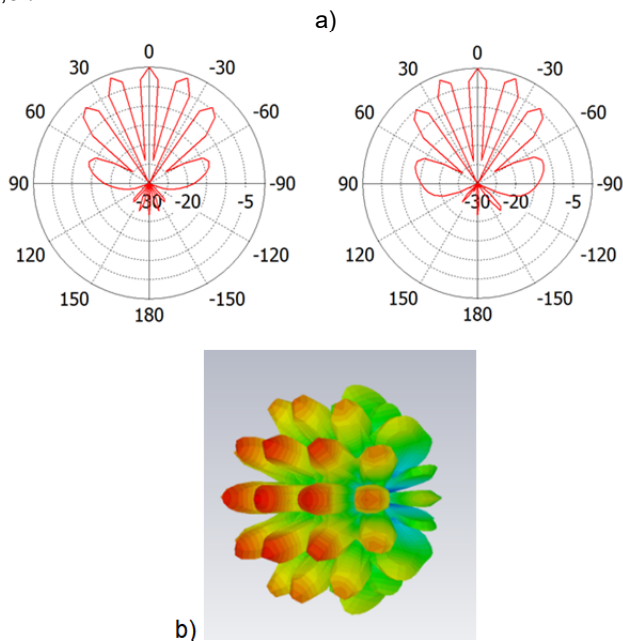
Rys. 9. Charakterystyka promieniowania układu antenowego z dwoma antenami w pionie i dwoma w poziomie; a) - w płaszczyźnie E – rys. lewy, w płaszczyźnie H – rys. prawy, b) charakterystyka w 3D.

Otrzymany układ antenowy pozwala kształtować wielowiązkową charakterystykę promieniowania. W analizowanym przypadku jest to 9 wiązek. Przy zastosowanej geometrii i konfiguracji usytuowania anten poszczególne wiązki w charakterystyce są wyraźnie ukształtowane i nie zachodzą na siebie. Dzięki temu poszczególne wiązki mogą realizować niezakłóconą

łączność z abonentami. Wiązki promieniowania są symetryczne w obu ortogonalnych płaszczyznach – rys. 9a. Zaproponowany układ antenowy kształtuje wszystkie wiązki promieniowania w typowym sektorze pracy stacji bazowej czyli 120°

### Układ antenowy fazowany

Przedstawiona powyżej wielowiązkowa charakterystyka promieniowania jest kształtowana przez układ antenowy współ-fazowy czyli bez dodatkowego wtrącania przesunięć fazowych na wejściu poszczególnych anten elementarnych. Zastosowanie przesuwników fazowych (rys.2) pozwala na uzyskanie większej ilości wiązek. Na rys. 10 przedstawiono charakterystykę promieniowania wzmiankowanego wyżej układu antenowego z dodatkowymi przesunięciami fazy  $1,5\lambda$ .



Rys. 10. Charakterystyka promieniowania układu antenowego z dodatkowym przesunięciem fazowym na wejściu każdej anteny; a) - w płaszczyźnie E – rys. lewy, w płaszczyźnie H – rys. prawy, b) charakterystyka w 3D.

Wprowadzenie dodatkowego przesunięcia fazy różnego  $1,5\lambda$  na wejściu poszczególnych anten pozwala na uzyskanie 49 niezależnych wiązek, przy czym w sektorze 120° otrzymano 25 wiązek. Podkreślić należy, że kształty niezależnych, nienakładających się na siebie wiązek otrzymuje się dla przesunięcia fazy będącego wielokrotnością połowy długości fali. Maksyma poszczególnych wiązek różnią się między sobą ale to nie jest problemem przy realizacji łączności. Bardziej istotnie

jest aby nie nachodziły na siebie. Istnienie wyraźnych kierunków zerowych, czyli kierunków na których charakterystyka przyjmuje wartości zerowe jest gwarancją poprawności realizacji łączności.

### Wnioski

W pracy przedstawiono układ antenowy umożliwiający kształtowanie wielowiązkowej charakterystyki promieniowania. Wielowiązkowe układy antenowe będą powszechnie wykorzystywane w systemie 5G telefonii komórkowej. Taki charakter pracy anten będzie podstawą pracy tzw anten inteligentnych. Anteny te umożliwią łączność z abonentami gdzie poszczególne wąskie wiązki promieniowania będą skierowane w stronę abonenta i będą podążać za ruchem terminala. Układy antenowe będą wykorzystywane również w tzw antenach adaptacyjnych, które będą mogły modyfikować swoją charakterystykę promieniowania do aktualnych potrzeb propagacyjnych, np. umożliwią minimalizację wartości charakterystyki promieniowania na „niepożądanych” kierunkach.

Zaproponowany układ antenowy zbudowany został z anten mikropaskowych bazujących na geometrii fraktalnej. Łata promieniująca ma geometrię fraktala Minkowskiego. Taka elementarna antena mikropaskowa dodatkowo z reflektorem płaskim umożliwia uzyskanie symetrycznych charakterystyk w płaszczyźnie E oraz H. Dzięki temu układ antenowy ma możliwość kształtowania wielowiązkowej charakterystyki promieniowania.

Praca została dofinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB 22 741.

**Authors:** prof. dr hab. inż. Roman Kubacki, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: roman.kubacki@wat.edu.pl; mgr inż. Karol Rudyk, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: karol.rudyk@wat.edu.pl.

### LITERATURA

- [1]. Bancroft R., *Microstrip and Printed Antenna Design*, New York 2009.
- [2] Kiani T., Karim B., *Fractal Antennas*, 2007.
- [3] Kubacki R., *Anteny mikrofalowe; technika i środowisko*, Warszawa, WKŁ, 2008.
- [4] Mandelbrot B., *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Co., 1982.
- [5] Moaiz T., Islam M., *Design and fabrication of a microstrip antenna for wi-max applications*, Blekinge Institute of Technology, 2008.
- [6] Ministerstwo Cyfryzacji, *Pole elektromagnetyczne a człowiek*, Warszawa 2019.
- [7] Szóstka J., *Fale i anteny*, Warszawa, WKŁ, 2001.