

doi:10.15199/48.2016.12.38

Antena ultra-szerokopasmowa ze strukturą periodyczną

Streszczenie. Współczesne systemy transmisji bezprzewodowej wymagają coraz szerszego pasma celem przenoszenia szybkich strumieni danych. W takich systemach powstaje konieczność stosowania anten o ultra szerokim paśmie prac. W artykule przedstawiono mikropaskową antenę charakteryzującą się strukturą periodyczną i posiadającą własności metamateriałowe, której pasmo pracy wynosi 10,8 GHz.

Abstract. Modern wireless communications systems require more and more wide band in order to transport fast data streams. In those systems it is necessary to use ultra-wide band antennas. In the article the microstrip antenna with metamaterial property has been presented. **The microstrip antenna with metamaterial property**

Słowa kluczowe: antena ultra szerokopasmowa, podłoże dielektryczne, metamateriał, antena mikropaskowa.

Keywords: ultra-wideband antenna, dielectric basis, metamaterial, microstrip patch antenna.

Wstęp

Anteny są kluczowym elementem bezprzewodowych systemów transmisyjnych. Parametry układu antenowego w znaczący sposób definiują jakość pracy tych systemów. Zakres częstotliwości, w których pracuje dany system bywa niejednokrotnie dużo większy niż pasmo pracy pojedynczej anteny, co wymaga używania kilku anten celem pokrycia całego pasma pracy systemu. Inną możliwością jest wykorzystanie anteny o paśmie pracy wymaganym przez system kosztem zysku energetycznego danej anteny.

W ciągu minionych lat anteny rozwijały się bez przerwy celem poprawy ich parametrów pracy z różnymi skutkami. Jednym z pozytywnie przyjętych form tego rozwoju okazały się anteny w postaci ścieżek drukowanych na laminatach (zwanych dalej antenami mikropaskowymi). W zasadzie każda klasyczna antena znalazła swoją interpretację w postaci mikropaskowej (Yagi, logo-periodyczna, dwu stożkowa itp.).

W sensie ogólnym antena mikropaskowa jest laminatem na podłożu dielektrycznym z wytrawionym na jego powierzchni promiennikiem. Do niewątpliwych zalet anten mikropaskowych należy łatwość i precyzję ich wykonania metodą wytrawiania lub frezowania. Dodatkowo ważną ich cechą jest niska cena wykonania i automatyczna integracja z obwodem drukowanym.

Każda antena wykonana w postaci obwodu drukowanego dziedziczy istotną cechę klasycznych rozwiązań ścieżek i obwodów mikropaskowych jaką jest wąskie pasmo pracy. Pasma pracy obwodów mikropaskowych jest funkcją wielu zmiennych. Podstawowe z nich to:

- efektywna przenikalność elektryczna dielektryka ϵ_{eff} ,
- wymiary geometryczne dielektryka,
- grubość warstwy metalizacji,
- wymiary geometryczne projektowanej ścieżki.

Istotne jest też w jaki sposób zostaje doprowadzony sygnał do promiennika, gdyż każde zaburzenie geometrii i materiału otoczenia wpływa na efektywność całego obwodu.

Definicja pasma pracy anteny

Pasmem pracy liniowego obwodu elektronicznego nazywa się zakres częstotliwości, w których transmitancja tego obwodu nie odbiega od maksimum o więcej niż 3dB.

W przypadku anten taka definicja nie może być zastosowana wprost ze względu na to, że w ich przypadku w grę wchodzi parametry, które nie są uwzględniane w teorii obwodów takie jak zmiana kształtu charakterystyki promieniowania i zmiany impedancji. Pasma pracy anteny można zatem zdefiniować jako zakres częstotliwości, w którym jeden lub kilka parametrów charakterystycznych dla

anten nie ulega zmianie. Najczęściej brany pod uwagę parametrem do opisanie pasma pracy jest zmiana impedancji Z_{in} , wraz z którą zmienia się współczynnik fali stojącej WFS (Voltage Standing Wave Ratio) i/lub straty odbiciowe R_L (Return Loss), gdzie:

$$(1) \quad WFS = \frac{(1+|\Gamma|)}{(1-|\Gamma|)}$$

$$(2) \quad R_L = 20\log(|\Gamma|)$$

$$(3) \quad \Gamma = \frac{(Z_{\text{in}} - Z_L)}{(Z_{\text{in}} + Z_L)}$$

Przy czym Z_L jest impedancją fidera doprowadzającego sygnał do anteny. Typowo w teletransmisji $Z_L = 50\Omega$. W ramach niniejszego artykułu pasmo pracy anteny zostanie zdefiniowane jako zakres częstotliwości, w których straty odbiciowe są mniejsze od -10 dB lub ekwiwalentnie, w których $WFS \leq 2$.

Metody poszerzania pasma pracy anteny

Obecnie istnieje kilka metod poszerzania pasma pracy anten na podłożu dielektrycznym, spośród których najistotniejszymi są:

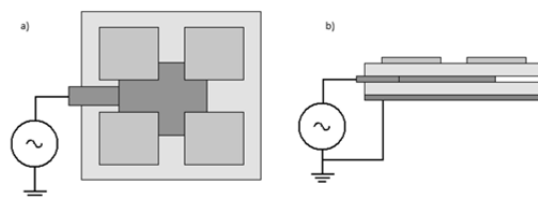
1. - obniżenie współczynnika dobroci,
2. - użycie układu dopasowania impedancji,
3. - użycie dodatkowych elementów rezonansowych.

Metody 1 i 3 są metodami najbardziej inwazyjnymi jeżeli chodzi o zmiany charakterystyk promieniowania anten.

W metodzie 1 rozważa się największe zmiany materiałowe w stosunku do projektu pierwotnego uwzględniające:

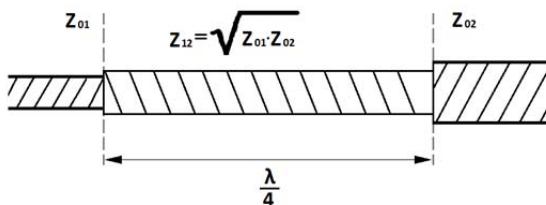
- zmiany kształtu elementu promieniującego,
- zmiany grubości laminatu,
- zmiany typu laminatu (zmiana ϵ_{eff}).

W metodzie elementów rezonansowych do projektu promiennika dokłada się dodatkowe łaty rezonansowe. Mogą być ułożone na wspólnej płaszczyźnie względem promiennika lub na stosie z promiennikiem (w przypadku możliwości zastosowania płytek wielowarstwowych. Dokładanie łat najbardziej sprawdza się w układach antenowych, gdzie cały układ skupiony jest na jednym laminacie, a łaty rezonansowe mogą pracować na więcej niż jeden element promieniujący.



Rys. 1. Metoda rezonatorowa a) widok od góry, b) z boku

Metoda dopasowania impedancji polega na uwzględnieniu w projekcie układu dopasowania impedancji między fiderem i elementem promieniującym. O ile zmiany materiałowe i zmiany w kształcie promiennika nie są w tej metodzie konieczne to najczęściej rozmiary płytki ulegają zwiększeniu, gdyż układ dopasowania to pasywny układ mikrofalowy w postaci drukowanej. W najprostszym przypadku będą to klasyczne rozwiązania w postaci transformatora $\lambda/4$, pętli pół falowej lub linii pół falowej (rys. 2). Przewagą metody dopasowania impedancji jest brak zmian w charakterystyce promieniowania anteny.



Rys. 2. Transformator $\lambda/4$

Z pośród wymienionych metod wydaje się, że najlepszą metodą obniżenia współczynnika strat odbiciowych jest metoda dopasowania impedancji. Impedancja wejściowa projektowanej anteny mikropaskowej może być modelowana przez rezonansowy układ RLC. W konsekwencji (dla anten o promienniku w kształcie prostokąta) do poprawy charakterystyki impedancyjnej można wykorzystać klasyczne metody projektowania filtrów odpowiednio dobierając rząd filtru, ilość sekcji, oraz parametry R,L,C. Niestety każda z wymienionych technik nie jest bez zarzutów. Zdarza się, że wykorzystanie pojedynczego sposobu nie poszerza pasma pracy w sposób dostateczny, a połączone rozwiązania nawet jeżeli pozwalają je uzyskać powodują jednak zmiany w charakterystyce promieniowania. Dodatkowo nie są to rozwiązania uniwersalne i muszą być projektowane dla każdego systemu z osobna. Efektywne poszerzenie pasma dla wyżej opisanych metod nie przekracza średnio 40%. Każda z metod poszerzania pasma powiększa jednak strukturę anteny, co w obliczu techniki dążącej do miniaturyzacji nie jest cechą pożądaną. Nowe właściwości – nie pogarszające charakterystyki promieniowania i nie wymagające zmian geometrii projektowanej anteny oferuje zastosowanie w technice linii mikropaskowych efektu metamateriałowego.

Metamateriały

Metamateriałem nazywa się struktury o właściwościach nie występujących w naturze. Ich teoria została opracowana w latach sześćdziesiątych XX wieku przez rosyjskiego naukowca Wiktora Gieorgijewicza Wiesielago (ros. *Виктор Георгиевич Веселаго*). Do niezwykłych własności metamateriałów należą ujemna przenikalność elektryczna ϵ i magnetyczna μ . Z tego powodu nazwano je materiałami „lewo-skrętnymi” w przeciwieństwie do klasycznych materiałów i zjawisk spełniających zasadę prawej dłoni („pravo skrętnych”).

W klasycznych materiałach wektor pola elektrycznego \vec{E} tworzy z wektorem pola magnetycznego \vec{H} płaszczyznę, która jeżeli ułożona jest poziomo w przestrzeni to wektor falowy \vec{k} i wektor Pointinga \vec{S} symbolizujący kierunek rozchodzenia się fali ułożone są prostopadłe do płaszczyzny EH i skierowane w górę. Spełnione są więc zależności:

$$(4) \quad \vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

$$(5) \quad \vec{S} \parallel \vec{k}$$

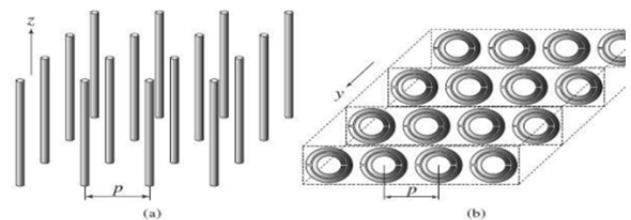
W metamateriałach natomiast wektor falowy i Pointinga ułożone są względem siebie antyrównolegle, natomiast wektorowy zapis tego zjawiska przedstawia się następująco:

$$(6) \quad \vec{S} = -\vec{E} \times \vec{H}$$

$$(7) \quad \vec{S} \uparrow \vec{k}$$

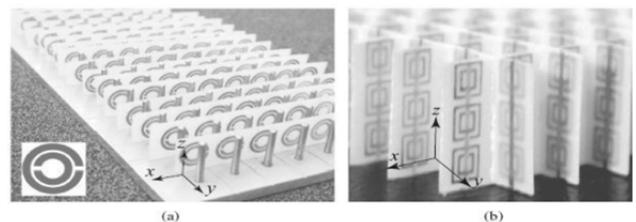
W konsekwencji w metamateriałach prędkość fazowa fali (produkt iloczynu skalarnego wektora falowego i wektora Pointinga) będzie ujemna i fala będzie się propagować na powrót w kierunku źródła fali. Prędkość fazowa będzie skierowana antyrównolegle do prędkości grupowej fali.

Teorie Wiesielago zostały potwierdzone eksperymentalnie w drodze konstrukcji dwu różnych układów mających właściwości osobno ujemnej przenikalności elektrycznej i ujemnej przenikalności magnetycznej. Układy te były zrealizowane w postaci metalowych prętów [4] i szeregu rezonatorów pierścieniowych [5].



Rys. 3. Elementy metamateriałowe a) prętowe, b) pierścieniowe z [4]

Połączenie obu układów umożliwiło powstanie konstrukcji zachowujących parametry obu poprzednich rozwiązań. Zaproponowane przez Shelbyego [6] rozwiązania pokazano na Rys. 4.

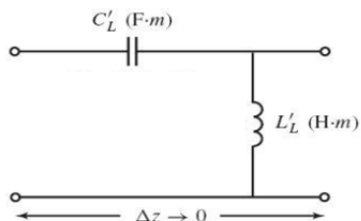


Rys. 4. Struktury Shelbyego a) przestrzenna b) planarna z [6]

Zaprojektowano i skonstruowano układy spełniające założenia ujemnego ϵ i ujemnego μ w postaci płytki z osadzonymi cienkimi ścieżkami o charakterze pojemnościowym i rezonatorami rozdzielno-pierścieniowymi (ang. split ring resonators). Niestety rezonatory w układach mikrofalowych dla sygnałów zmodulowanych nawet o stosunkowo niewielkim paśmie powodują zniekształcenia. Ich pasmo pracy może zostać zwiększone, ale kosztem dobroci co powoduje zwiększenie strat. Z tego powodu sygnał zmodulowany nie może być efektywnie transmitowany przez medium rezonansowe.

Dużo korzystniej z praktycznego punktu widzenia przedstawia się możliwość zsyntetyzowania właściwości metamateriałowych w postaci linii mikropaskowej. Efekt taki uzyskano dzięki połączeniu klasycznej prawo skrętnej konstrukcji pojemnościowej i indukcyjnej. Szereg takich sekcji stanowi ścieżkę spełniającą własności lewo skrętne.

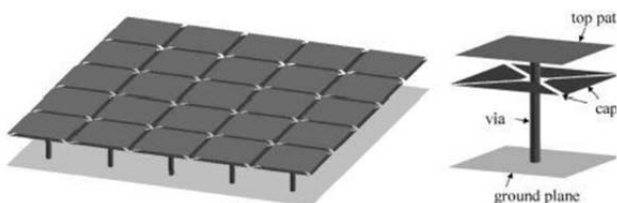
Schemat elementarnej sekcji przedstawiono na rys. 5. Struktura periodyczna takich sekcji (komórek) może być efektywnym medium jeżeli rozmiar geometryczny takiej komórki jest mniejszy niż długość fali transmitowanej przez to medium. W ogólności rozmiar takiej komórki powinien być mniejszy niż $\lambda/4$.



Rys. 5. Schemat elementarnej ścieżki metamateriałowej

Praktyczna realizacja takiej ścieżki jest możliwa przez klasyczne elementy mikrofalowe na niesymetrycznej linii mikropaskowej w postaci kondensatora palczastego i cewki zwartej na końcu.

Innym rozwiązaniem ścieżki mikrofalowej spełniającej założenia lewoskrętności jest struktura typu „grzybek” (rys. 6), wymagająca jednak płytki drukowanej o kilku warstwach.



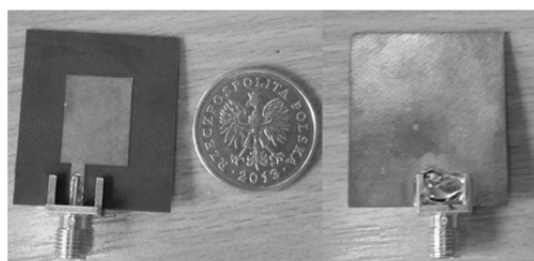
Rys. 6. Wielowarstwowe struktury anten mikropaskowych

Tego typu struktury i ich modyfikacje zapewniły redukcję wymiaru ścieżki zbudowanej za ich pomocą o ponad 60% i poszerzenie pasma pracy do 60%.

Projekt mikropaskowej anteny metamateriałowej

W artykule badana antena będzie zbudowana na płytce jednowarstwowej ale posiadająca strukturę periodyczną, rys. 8. Antena ta zostanie odniesiona do anteny klasycznej z prostokątną łata promieniującą przedstawioną na rys. 7. Obie konstrukcje mają te same wymiary geometryczne i zbudowane są na tym samym laminacie Rogers RT5880.

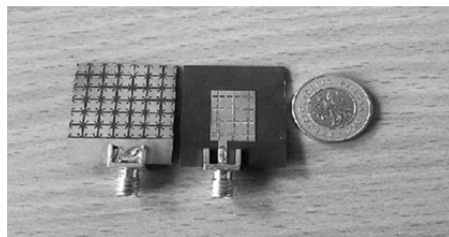
Fider zasilający ma wymiary 2.4mm na 8mm. Łata promieniująca ma wymiary 28mm na 32mm. Grubość warstwy izolacyjnej wynosi 0.787mm.



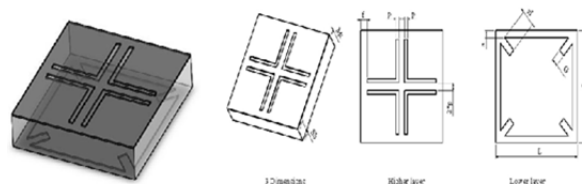
Rys. 7. Klasyczna antena mikropaskowa

Widok periodycznej anteny mikropaskowej posiadającej strukturę periodyczną oraz mającej własności metamateriałowe przedstawiono na rys. 8.

Obie strony badanej anteny periodycznej pokrywają cyklicznie powtarzający się wzór komórki według schematu przedstawionego na rys. 9.

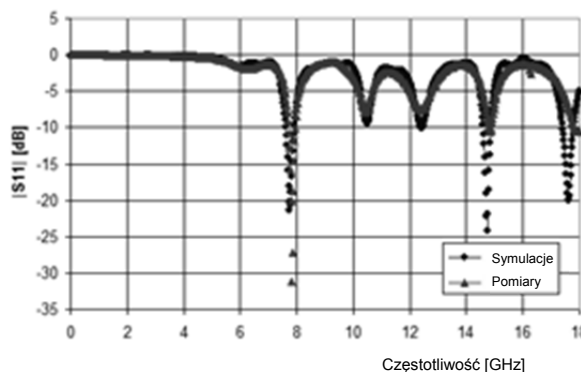


Rys. 8. Antena mikropaskowa o strukturze periodycznej

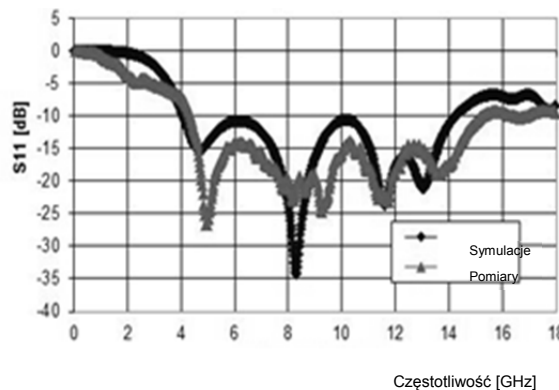


Rys. 9. Wzór pojedynczej komórki

Obie struktury, klasyczną i periodyczną, zasymulowano w środowisku CST Studio. Po wykonaniu rzeczywistych anten dokonano pomiarów ich parametrów w komorze bezodbiciowej. Zmierzono m.in. charakterystyki promieniowania, oraz współczynnik odbicia S11 obrazujący straty odbiciowe.



Rys.10. Wartości współczynnika S11 dla anteny klasycznej (jako odniesienie) w funkcji częstotliwości; kolorem granatowym zaznaczono wartości otrzymane drogą symulacji komputerowej a kolorem czerwonym wartości zmierzone.

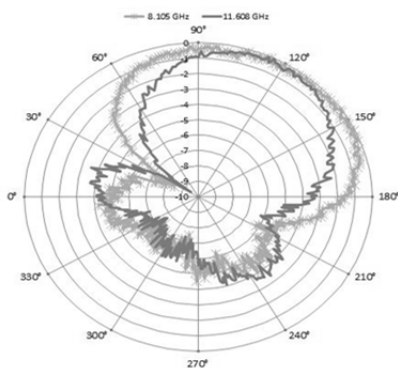


Rys. 11. Wartości współczynnika S11 dla badanej anteny metamateriałowej ze strukturą periodyczną w funkcji częstotliwości; kolorem granatowym zaznaczono wartości otrzymane drogą symulacji komputerowej a kolorem zielonym wartości zmierzone.

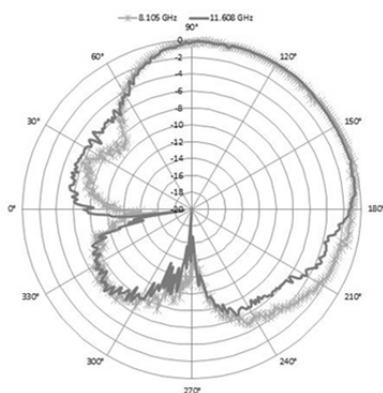
Badania szerokopasmowości anten (klasycznej oraz anteny z proponowaną strukturą periodyczną) przeprowadzono w wyniku analizy współczynnika odbicia S_{11} w funkcji częstotliwości. Otrzymane wartości przedstawiono na rys. 10 oraz 11. Przedstawione przebiegi obrazują dużą zgodność symulacji komputerowej z wartościami zmierzonymi dla realnych anten. Można również zauważyć (rys. 11), że dla periodycznej anteny uzyskano nawet lepsze wyniki (szersze pasmo) aniżeli można było to przewidzieć na drodze obliczeń.

Przyjmując zgodnie z definicją pasmo pracy anteny jako zdefiniowane dla częstotliwości, dla których wartości $S_{11} \leq -10$ dB należy stwierdzić, że mikropaskowa antena o strukturze periodycznej posiada pasmo ultra szerokie. Dla zmierzonych wartości S_{11} pasmo pracy anteny periodycznej zawiera się w granicach od 4,2 GHz do 15 GHz, co daje szerokość pasma pracy anteny równą 10,8 GHz.

Ważnym parametrem anteny jest kształt charakterystyki promieniowania. Na rys. 12 oraz 13 przedstawiono przykładowe charakterystyki promieniowania dla reprezentatywnych częstotliwości, a mianowicie 8,105 GHz oraz 11,608 GHz. W tych częstotliwościach antena charakteryzuje się dobrym dopasowaniem do wolnej przestrzeni (niska wartość współczynnika S_{11}). Na rys 12 oraz 13 przedstawiono charakterystyki promieniowania anteny wyznaczone drogą symulacji komputerowej oraz pomiarami realnej anteny. Wyniki przedstawiono dla płaszczyzn xz oraz xy .



Rys. 12. Charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie xz , dla częstotliwości 8,106 GHz kolorem zielonym, dla częstotliwości 11,108 GHz kolorem niebieskim



Rys. 13. Charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie xy , dla częstotliwości 8,106 GHz kolorem zielonym, dla częstotliwości 11,108 GHz kolorem niebieskim

Przedstawione na rys. 12 oraz 13 charakterystyki promieniowania anteny ze strukturą periodyczną pokazują, że kształt ich zmienia się w zależności od częstotliwości. Nie jest to dobra własność tej anteny, ale należy pamiętać, że konstruując anteną kierowano się przede wszystkim uzyskaniem maksymalnej szerokopasmowości.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono mikropaskową antenę ze strukturą periodyczną charakteryzującą się własnościami metamateriałowymi. Dla tej anteny uzyskano ultra szerokie pasmo pracy tj 10,8 GHz.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Roman Kubacki, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: roman.kubacki@wat.edu.pl;

mgr inż. Karol Rudyk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: karol.rudyk@wat.edu.pl;

dr inż. Salim Lamari, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: salim.lamari@wat.edu.pl

LITERATURA

- [1] Kubacki R., Anteny mikrofalowe, technika i środowisko, WKŁ (2009),
- [2] Zieniutycz W., Anteny podstawy polowe, WKŁ (2001),
- [3] Rosłonec S., Liniowe obwody mikrofalowe, WKŁ (1999),
- [4] Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Steward W.J., Low frequency plasmon in thin wire structures, J.Phys.: Condens. Matt., Vol. 10 no. 22 (1998),
- [5] Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Steward W.J., Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol 47, no 11 (1999),
- [6] Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S., Experimental verification of a negative index of refraction, Science, vol 292 (2001),