

Synteza profilu planarnej anteny ultraszerokopasmowej z zastosowaniem procesu błądzenia losowego z ruchomą barierą liniową

Streszczenie. W numerze 6/2023 Przeglądu Elektrotechnicznego (doi:10.15199/48.2023.06.15) opisany został sposób wykorzystania wyników analizy procesu błądzenia losowego z ruchomą barierą do wyznaczenia nowych kształtów anten planarnych. Uzyskana przy wykorzystaniu bariery parabolicznej i opisana tam antena wykazuje szereg interesujących właściwości. W trakcie poszerzonych analiz stwierdzono, że również rozkład prawdopodobieństwa obliczony dla bariery liniowej pozwala na syntezę oryginalnej anteny. W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i pomiarów zrealizowanego modelu tejże anteny. Charakteryzuje się ona niewielkimi rozmiarami i ultraszerokim pasmem pracy.

Abstract. In the 6/2023 issue of *Electrotechnical Review* (doi:10.15199/48.2023.06.15) an application of random walk process with a general moving barrier to find a new shape of planar antennas has been described. The antenna presented there obtained for parabolic barrier has a number of interesting features. However, during an extensive analysis it was noted that also shape obtained for linear barrier has very interesting antenna properties. In the current paper the results simulation and measurement of a new manufactured exemplary antenna model were described. The model has also compact construction and ultrawideband characteristics. (**Synthesis of a new planar antenna shape applying random walks process with a general moving linear barrier**).

Słowa kluczowe: błądzenie losowe z ruchomą barierą liniową, zastosowanie fraktali w technice antenowej, anteny ultraszerokopasmowe, **Keywords:** random walks process with a general moving linear barrier, fractal applications in antenna technology, ultrawideband antennas

Wstęp

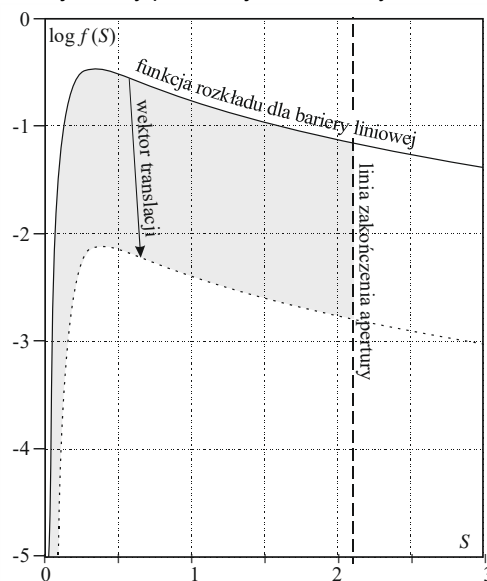
Analiza procesu błądzenia losowego znalazła cały szereg zastosowań w matematyce, informatyce, fizyce, chemii, biologii, a także w ekonomii czy nawet kosmologii [1, 2, 3]. Do licznych przykładów zastosowań autorzy niniejszego artykułu dorzucili także technikę antenową opisując w pracy [4] wykorzystanie błądzenia losowego z ruchomą barierą do znajdowania profili anten planarnych o nowym kształcie. Wykorzystano tam analizę rozkładu prawdopodobieństwa pierwszego przejścia tego procesu przez określoną ruchomą barierę. Końcowym rezultatem tej analizy są funkcje opisujące ten rozkład. Ich przebieg zależy od kształtu bariery i ma kilka interesujących cech, które czynią je przydatnymi do konstrukcji antypodalnych anten planarnych zasilanych liniami paskowymi. Należą do nich ekstremalnie szybki przyrost wartości funkcji dla małych argumentów oraz stosunkowo łagodne ich zmiany po przekroczeniu punktu przegięcia.

Antena opisana w cytowanej już pracy [4] została uzyskana przy zastosowaniu dwóch barier parabolicznych. We wnioskach sformułowanych w tejże pracy wyrażono tezę, że interesujące rezultaty, z punktu widzenia techniki antenowej, można też uzyskać dla barier o innym przebiegu niż paraboliczny. Prace w tym zakresie trwają, należy jednak zaznaczyć, że napotykają one poważne trudności przy analitycznych próbach rozwiązania odpowiednich równań całkowych dla barier będących krzywymi stopnia wyższego od 2. Jak się wydaje znalezienie odpowiednich funkcji rozkładu będzie możliwe jedynie przy zastosowaniu metod numerycznych, co czyni proces poszukiwania nowych kształtów mniej uniwersalnym i bardziej żmudnym. W trakcie analiz zauważono jednak, że interesującą konstrukcją anteny można otrzymać także dla ruchomej bariery liniowej. O ile w przypadku bariery parabolicznej należało wyznaczyć dwa brzegi, to w przypadku bariery liniowej wystarczy uzyskać tylko jeden z nich. Dokonując następnie prostych translacji tego brzegu można otrzymać cały poszukiwany kontur. Do ustalenia optymalnej wartości translacji oraz miejsca zakończenia geometrii anteny (zwanej tutaj linią zakończenia apertury) niezbędne jest jednak wykorzystanie symulacji numerycznych, które istotnie usprawniają badanie

wpływu wzajemnego położenia brzegów anteny na najważniejsze jej charakterystyki. W niniejszym artykule opisano kształt i podstawowe własności uzyskanej anteny. Obok ultraszerokiego pasma pracy posiada też ona takie zalety jak prostota zasilania, mała wrażliwość na błędy realizacji i względna łatwość przeskalowania jej geometrii na niższy zakres częstotliwości.

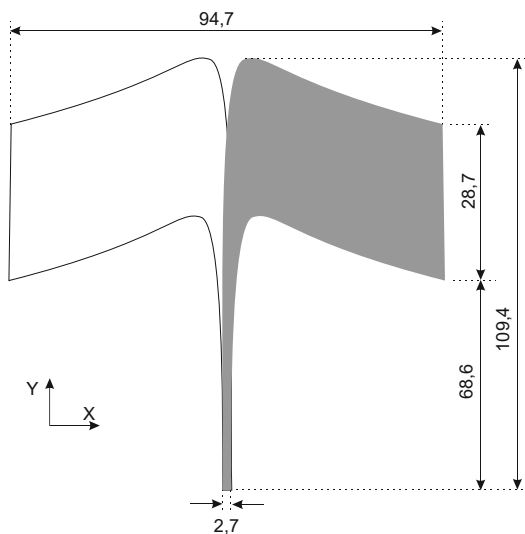
Synteza kształtu

Analiza błądzenia losowego oraz sposób jej implementacji do syntezy anten zostały szczegółowo opisane w cytowanych we wstępie pracach [3] i [4]. Rozkład prawdopodobieństwa pierwszego przejścia procesu błądzenia losowego przez ruchomą barierę liniową oraz sposób jego wykorzystania do konstrukcji konturu jednego z promienników antypodalnej anteny planarnej zilustrowany został na rys. 1.



Rys. 1. Krzywa rozkładu prawdopodobieństwa pierwszego przejścia dla ruchomej bariery liniowej oraz sposób uzyskania całego konturu jednego z promienników anteny

Wektor translacji oraz linię zakończenia apertury używano w procesie symulacji w pakiecie CST STUDIO SUITE przyjmując jako podłoże laminat FR-4 o ustalonych stratach. Program symulacyjny umożliwia zmiany wymienionych parametrów geometrycznych i obserwację ich wpływu na obliczane charakterystyki anteny. Parametry te optymalizowano pod kątem minimalizacji częstotliwości granicznej dolnej oraz uzyskania jak najmniejszych wartości współczynnika odbicia w symulowanym paśmie pracy. Cała antena ma budowę antypodalną, co oznacza, że drugi z promienników jest odpowiednio przesuniętym lustrzanym odbiciem pierwszego, ulokowanym po przeciwnej stronie podłoża. Tego typu sposób zasilania jest znany głównie z zastosowań w antenach typu Vivaldi [5]. Kontur uzyskanej anteny oraz jej wymiary dla wybranej dolnej częstotliwości granicznej jej pasma pracy wynoszącej 3,5 GHz ilustruje rys. 2.



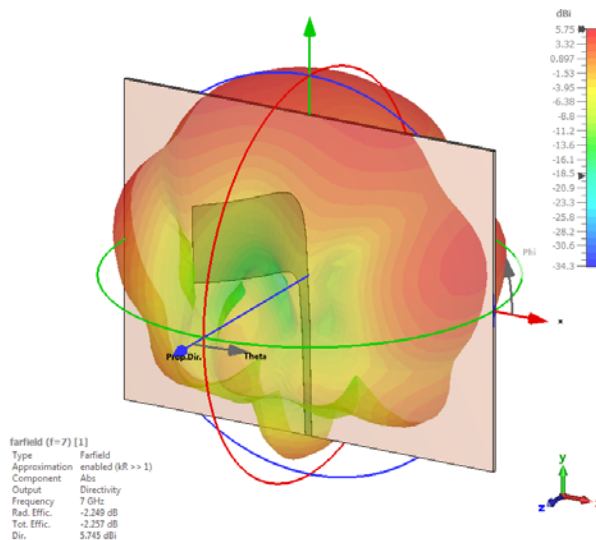
Rys. 2. Kontur oraz wymiary uzyskanej anteny w [mm]

Jedno z ramion anteny można zmodyfikować poprzez dodanie zbieżnego liniowego bądź wykładniczego transformatora planarnego dopasowującego linię paskową do złącza mikrofalowego, jeśli takie ma być dołączone do anteny. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że różnice charakterystyk pomiędzy wersjami z transformatorem i bez niego są stosunkowo niewielkie. Przekonano się jednak, że transformator poprawia charakterystyki odbiciowe zrealizowanych modeli laboratoryjnych anten. Zastosowany w tym przypadku transformator liniowy miał długość 20 mm.

Wyniki symulacji numerycznej

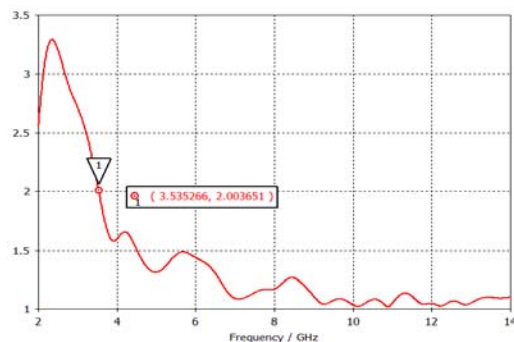
Opisany kształt anteny oraz wybrane podłoże wprowadzono do symulatora CST, co pozwoliło na jego optymalizację z wykorzystaniem jednej z dostępnych w tym środowisku metod numerycznych. Zastosowano tym wypadku metodę FDTD. Zaprezentowane na rys. 2. wymiary anteny uzyskane zostały uzyskane w procesie optymalizacji składowej wektora translacji skierowanej wzdłuż osi anteny (oś Y) oraz linii zakończenia apertury. Ustalenie tych wartości pozwoliło na obliczenie dolnej częstotliwości granicznej jej pasma pracy. Poprzeczna składowa wektora translacji (oś X) wyznacza szerokość zasilającej linii mikropaskowej i zależy od rodzaju laminatu i wybranej impedancji charakterystycznej linii. Podany tu wymiar 2,7 mm dla linii dwupaskowej na podłożu FR4 zapewnia impedancję charakterystyczną równą 50 Ω.

Na rys. 3 zamieszczono trójwymiarową charakterystykę promieniowania dla częstotliwości 7 GHz stanowiącej częstotliwość środkową badanego pasma.



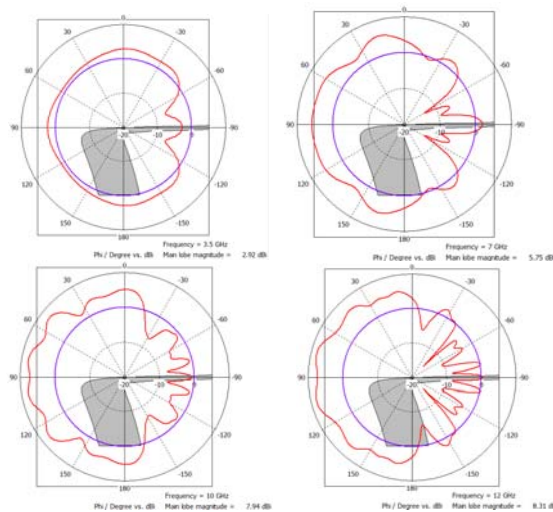
Rys. 3. Obliczona w symulatorze CST trójwymiarowa charakterystyka promieniowania anteny dla częstotliwości 7 GHz

Wyniki pozostałych badań symulacyjnych tego modelu, w postaci przebiegów współczynnika odbicia (WFS) w zakresie częstotliwości od 2 do 14 GHz oraz charakterystyk promieniowania w zaznaczonych na rys. 3 płaszczyznach XY, XZ, YZ dla wybranych częstotliwości z obserwowanego pasma, przedstawione zostały kolejno na rys. 4 ÷ 7.

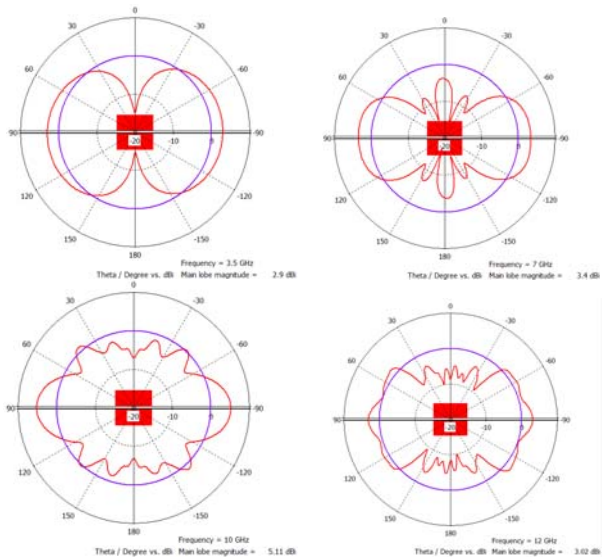


Rys. 4. Wyniki obliczeń numerycznych przebiegu WFS dla uzyskanej anteny

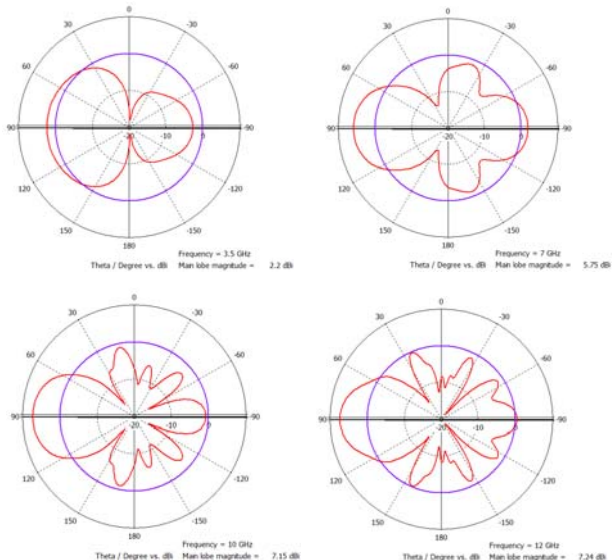
Otrzymany przebieg WFS jest typowy dla anten z falą biegnącą. Powyższy wykres otrzymano dla anteny wyposażonej w dodatkowy transformator dopasowujący.



Rys. 5. Wybrane wyniki badań symulacyjnych charakterystyk promieniowania w płaszczyźnie BY dla częstotliwości kolejno 3,5; 7; 10 i 12 GHz



Rys. 6. Wybrane wyniki badań symulacyjnych charakterystyk promieniowania w płaszczyźnie XZ dla częstotliwości kolejno 3,5; 7; 10 i 12 GHz



Rys. 7. Wybrane wyniki badań symulacyjnych charakterystyk promieniowania w płaszczyźnie YZ dla częstotliwości kolejno 3,5; 7; 10 i 12 GHz

Dla niższych częstotliwości antena ma charakterystykę o niewielkiej kierunkowości ze stosunkowo małym poziomem listka wstecznego. W miarę wzrostu częstotliwości charakterystyka ta staje się coraz bardziej kierunkowa z rosnącym udziałem listków bocznych i wstecznych. Dla częstotliwości ulokowanych w okolicach połowy analizowanego pasma charakterystyka ma trzy silniejsze kierunki promieniowania jeden zgodny z jej osią i dwa w kierunku ramion.

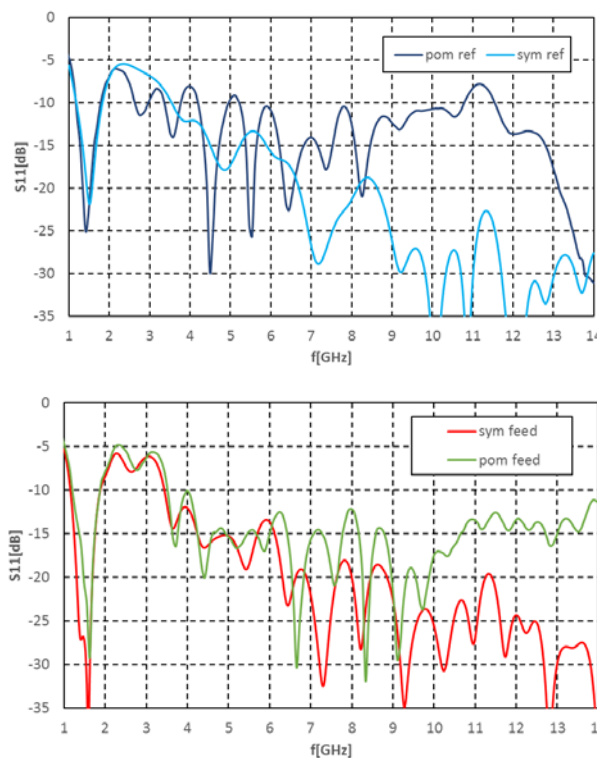
Modele laboratoryjne

W celu weryfikacji obliczeń numerycznych wykonane zostały dwa modele laboratoryjne pracujące na laminacie TSE-2 (typ FR-4) firmy IZO-ERG S. A. charakteryzującym się bardzo wysoką jednorodnością stałej dielektrycznej i tangensa kąta strat w dość szerokim zakresie częstotliwości oraz zwiększoną grubością folii miedzianej. Podstawowe dane tego podłoża opisano w [4]. Fotografia wykonanego modelu anteny z transformatorem zaprezentowana została na rys. 8.



Rys. 8. Fotografia jednego ze zrealizowanych modeli anteny (wersja z krótkim transformatorem)

Rezultaty pomiarów charakterystyk odbiciowych obydwu modeli wykazały dobrą zgodność z uzyskanymi wcześniej wynikami symulacji. Na rys. 9. przedstawione zostały przebiegi wartości modułu S_{11} symulowanych oraz zmierzonych w zakresie od 2 do 14 GHz. Do pomiaru charakterystyk wykorzystano analizator obwodów typu P9373B firmy Keysight, co ograniczyło górny zakres analizowanych częstotliwości do wartości 14 GHz.



Rys. 9. Porównanie symulowanych (sym) i zmierzonych (pom) przebiegów modułu S_{11} dla anteny bez transformatora (ref) i z transformatorem (feed)

O ile wyniki symulacji są dla wersji z transformatorem i bez transformatora dość podobne, o tyle charakterystyki zmierzone dla wykonanych laboratoryjnych modeli anten uwiadcniają przydatność transformatora. Wynika ona z reakcji wprowadzanych przez złącze mikrofalowe, szczególnie w zakresie wyższych częstotliwości. Dużo większe wartości modułu S_{11} w porównaniu do wyników symulacji dla wyższych częstotliwości wynikają ze wzrostu stratności zastosowanego podłoża (w symulacji uwzględniono straty dielektryczne na stałym poziomie).

Wnioski

Analiza rozkładu prawdopodobieństwa napotkania trajektorii błędzenia losowego na ruchomą barierę prowadzi do uzyskania krzywych opisujących kontury anten planarnych z falą bieżącą. Charakteryzują się one przede wszystkim stosunkowo zwartą konstrukcją i ultraszerokim pasmem pracy ograniczonym od dołu przez samą geometrię promienników, zaś od góry stratami wprowadzanymi przez podłoże dielektryczne. Cechy takie miała antena uzyskana wcześniej przy zastosowaniu barier parabolicznych, ma je także prezentowana w niniejszym artykule antena uzyskana dla bariery liniowej. Można przypuszczać, że będzie to także dotyczyć anten ograniczonych funkcjami otrzymanymi w wyniku analizy barier będących krzywymi wyższych stopni. Wstępne analizy wskazują, że z reguły funkcje takie bardzo szybko rosną dla małych argumentów, a po osiągnięciu punktu przegięcia mają przebieg o przeciwnym i znacznie łagodniejszym nachyleniu. Sprawia to, że są użyteczne do wyznaczania granic antypodalnych anten planarnych. Warto dodać, że tego rodzaju konstrukcje są podatne na różnego rodzaju dodatkowe modyfikacje poprawiające parametry anten, a zatem opisany tu kształt można traktować jako wyjściowy do dalszych modyfikacji. Anteny tego typu dobrze nadają się do pracy w szkach ultraszerokopasmowych chętnie stosowanych w radiowych systemach obrazujących [6].

Praca została sfinansowana w ramach UGB WAT nr 867.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Mateusz Pasternak,
Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki,
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908, Warszawa,
e-mail: mateusz.pasternak@wat.edu.pl
dr inż. Mirosław Czyżewski, adres jw.,
e-mail: miroslaw.czyzewski@wat.edu.pl;
mgr inż. Karol Drągowski, adres jw.,
e-mail: karol.dragowski@wat.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Weiss G. H., Random Walks and Their Applications: Widely used as mathematical models, random walks play an important role in several areas of physics, chemistry, and biology, *American Scientist*, 71, 1, 1983.
- [2] Xia f., Liu J., Nie H., i in., Random Walks: a Review of Algorithms and Applications, *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 4 (2), 2020.
- [3] Zhang J., Hui L., On random walks with a general moving barrier, *The Astrophysical Journal*, 641 (2006), No. 10, 641-646
- [4] Pasternak M., Drągowski K., Czyżewski M., Zastosowanie procesu błędzenia losowego z ruchomą barierą do syntezy profili planarnych anten ultraszerokopasmowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 99, nr 6, 2023.
- [5] Dvorsky M., Ganesh H. S., Prabhu S. S., Design and Validation of an Antipodal Vivaldi Antenna with Additional Slots, *Int. Journal of Antenna and Propagation*, article ID 7472186, 2019.
- [6] F. Parveen, P. Wahid, Design of Miniaturized Antipodal Vivaldi Antennas for Wideband Microwave Imaging of the Head, *Electronics*, 11(14), 2022.