

doi:10.15199/48.2023.06.15

Zastosowanie procesu błędzenia losowego z ruchomą barierą do syntezy profili planarnych anten ultraszerokopasmowych

Streszczenie. W niniejszym artykule opisano sposób wykorzystania procesu błędzenia losowego z ruchomą barierą do wyznaczenia nowego kształtu anteny. Trajektoria błędzenia losowego na płaszczyźnie jest rodzajem fraktala stochastycznego. Narzucenie na nią ograniczeń i analiza rozkładu prawdopodobieństwa napotkania bariery przez trajektorię błędzenia losowego, prowadzi do uzyskania krzywych gładkich, o przebiegu zależnym od zmienności przyjętej bariery. Krzywe te mają szereg interesujących cech, które w szczególności można wykorzystać w technice antenowej. W artykule opisano sposób uzyskania wymienionych krzywych, zastosowanie ich do syntezy nowego kształtu anteny, wyniki badań symulacyjnych i pomiarów oraz podstawowe parametry zrealizowanego modelu anteny. Charakteryzuje się ona niewielkimi rozmiarami i ultraszerokim pasmem pracy.

Abstract. An application of random walks process with a general moving barrier to find a new shape of antenna is described in the paper. The trajectory of 2D random walks is a kind of stochastic fractal. The set of specific moving barrier and analysis of probability distribution of facing the barrier by the random walks process allows to obtain a smooth curves depends on the barrier shape. The curves have a number of interesting features and inter alia can be applied to fix the outlines of new antenna shapes. The way to obtain the curves and their application in the antenna technology is shown in the paper. The simulation and measurement results of manufactured exemplary model were also described. The model has compact construction and ultrawideband characteristics. (An application of random walks process with a general moving barrier to design of ultrawideband antennas).

Słowa kluczowe: błędzenie losowe z ruchomą barierą, zastosowanie fraktali w technice antenowej, antena sierpowa, anteny ultraszerokopasmowe,

Keywords: random walks process with a general moving barrier, fractal applications in antenna technology, sieckle antenna, ultrawideband antennas

Wstęp

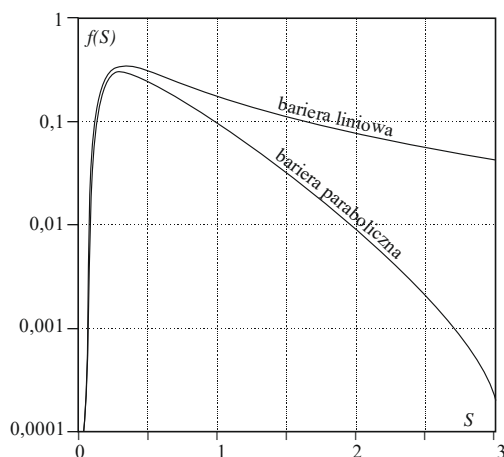
Ponad 120 letnia historia rozkwitu technik radiowych nieodłącznie związana jest z rozwojem anten. Do dnia dzisiejszego opracowano tysiące ich konstrukcji o różnorodnych geometriach i właściwościach. Na każdą antenę można spojrzeć jak na pewien czasoprzestrzenny zbiór dipoli elementarnych (dipoli Hertza), które generują fale elektromagnetyczne. Wzajemna interferencja tych fal determinuje najistotniejsze parametry radiacyjne anteny, zaś przestrzenne usytuowanie dipoli jej własności elektryczne i geometrię. Związek geometrii konkretnej anteny z jej parametrami elektrycznymi i radiacyjnymi jest zwykle bardzo złożony i tylko w najprostszymi przypadkach daje się go ująć w ścisłą formę analityczną. Przy większej złożoności geometrycznej wymienione parametry anteny mogą być określone tylko przy zastosowaniu metod numerycznych. Okazują się one bardzo skuteczne, o ile znana jest choćby przybliżona geometria anteny. Znalazienie zupełnie nowego kształtu promiennika jest coraz trudniejsze i często wymaga zastosowania nieszablonowego podejścia. Wydaje się, że znaczne możliwości w tym zakresie tkwią jeszcze w konstrukcjach dwu i trójwymiarowych. Pierwsze z wymienionych skupiają ostatnio uwagę konstruktorów, przede wszystkim z uwagi na korzystne cechy użytkowe, zwłaszcza w sprzęcie mobilnym, a także mniejsze wymagania na moc obliczeniową potrzebną do symulacji. Przeznaczone do tego celu specjalistyczne oprogramowanie umożliwia często optymalizację geometrii wybranego typu anteny pod kątem uzyskania pożądanych parametrów. Nowych kształtów poszukuje się zazwyczaj pośród różnego rodzaju obiektów geometrycznych takich jak krzywe wielomianowe, wykładnicze, potęgowe, logarytmiczne, a także krzywe parametryczne i fraktale [np. 1-3]. Ostatnie z wymienionych są przykładem wykorzystania metod iteracyjnych, które często prowadzą do zupełnie nowych kształtów. W technice antenowej wykorzystuje się na ogół fraktale deterministyczne, znacznie rzadziej eksplorowane są fraktale stochastyczne.

Wykorzystanie procesu błędzenia losowego do generacji geometrii anten

Analiza błędzenia losowego znalazła zaskakująco wiele zastosowań począwszy od einsteinowskiego opisu ruchów Browna poprzez modelowanie procesów ekonomicznych aż po badanie zjawisk kosmologicznych. Błędzenie losowe jest procesem stochastycznym polegającym na przemieszczaniu się, z określonym krokiem, z ustalonego bieżącego położenia do wybranego losowo położenia kolejnego. W ogólności wybór położenia w każdym kroku jest zdeterminowany wyłącznie położeniem bieżącym i nie zależy od historii błędzenia. W najprostszym przypadku rozkład prawdopodobieństwa przemieszczeń jest gaussowski z określoną wariancją $\sigma^2 = S$. Wprowadzenie ruchomej bariery opisanej funkcją $B(S)$ nakłada na błędzenie losowe ograniczenie. Prawdopodobieństwo, że proces błędzenia przekroczy po raz pierwszy narzuconą barierę w przedziale $(S, S + dS)$ reprezentuje funkcja $f(S)dS$, zaś prawdopodobieństwo, że bariera ta zostanie przekroczona o wartość δ funkcja $P(\delta, S)d\delta$. Wielkość $f(S)$ jest określana mianem rozkładu prawdopodobieństwa pierwszego przejścia. Z ogólnych własności błędzenia losowego wiadomo, że przekroczenie przezeń zadanej bariery o wartość δ jest zdarzeniem pewnym, co pozwala zapisać równanie:

$$(1) \quad \int_0^S f(S') dS' + \int_{-\infty}^{B(S)} P(\delta, S) d\delta = 1.$$

Wielkość S jest tu w zasadzie wariancją gęstości fluktuacji δ odpowiednio wygładzonej filtrem o określonym promieniu (malejącym wraz ze wzrostem S). Rozwiązaniem tego równania jest rozkład prawdopodobieństwa pierwszego przejścia. Rozkład ten jest funkcją ciągłą zależną od wybranego przebiegu bariery. Na rys. 1. pokazano przebieg $f(S)$ dla przypadku bariery opisanej funkcjami liniową i paraboliczną. Szczegółowe przykłady obliczeń można znaleźć w [4].

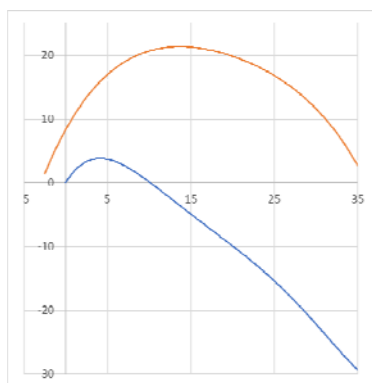


Rys. 1. Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa pierwszego przejścia dla dwóch różnych barier liniowej i parabolicznej [4]

Znalezienie rozkładu $f(S)$ na drodze analitycznej jest dość żmudne nawet dla bariery liniowej. W przypadku barier o nieliniowym przebiegu funkcję tę można w zasadzie znaleźć tylko na drodze obliczeń numerycznych. Krzywe $f(S)$ mają szereg interesujących własności matematycznych. Przede wszystkim charakteryzują się szybkim przyrostem wartości dla małych argumentów. Wartości funkcji są zawsze unormowane do 1, co ułatwia późniejsze skalowanie. Własności te można wykorzystać do określania konturów antypodalnych anten planarnych zasilanych bezpośrednio równoległymi liniami dwupaskowymi. Tego rodzaju zasilanie ma szereg zalet i umożliwia naturalne, ultraszerokopasmowe dopasowanie anteny do zewnętrznej linii transmisyjnej.

Niestety nie można podać ściślej recepty na wybór konkretnych barier i zakresu zmienności argumentów uzyskanych krzywych, które nadawałyby się do konstrukcji anten. Konieczne jest tu doświadczenie i pewna biegłość w posługiwaniu się oprogramowaniem symulacyjnym. Należy jednak zaznaczyć, że mając konkretny kształt wyjściowy można na drodze numerycznej poszukiwać jego różnych modyfikacji pod kątem poprawy określonych parametrów anteny.

W niniejszej pracy zastosowano dwie bariery paraboliczne o parametrach z przedziału (0, 1) wyznaczając krzywe $f(S)$ o kształtach zilustrowanych na rys. 2.



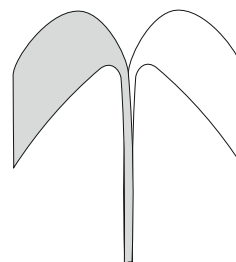
Rys. 2. Uzyskane krzywe rozkładu prawdopodobieństwa pierwszego przejścia dla dwóch barier parabolicznych

Otrzymane krzywe można aproksymować wielomianami. W tym wypadku są to wielomiany piątego stopnia (kolejno dla górnej i dolnej krzywej z rys. 2):

$$(2) -3 \cdot 10^{-7} x^5 - 3 \cdot 10^{-5} x^4 + 3,5 \cdot 10^{-3} x^3 - 0,145 x^2 + 2,369 x + 8,349$$

$$(3) 5 \cdot 10^{-6} x^5 - 0 \cdot 10^{-4} x^4 + 2 \cdot 10^{-2} x^3 - 0,363 x^2 + 2,106 x + 0,0421$$

Funkcje te wyznaczają granice jednego z promienników anteny zilustrowanej na rys. 3. Drugi z promienników otrzymuje się poprzez lustrzane odbicie i odpowiednią translację pierwszego (o szerokość linii paskowej i grubość podłoża).



Rys. 3. Geometria anteny opisanej krzywymi (2) i (3)

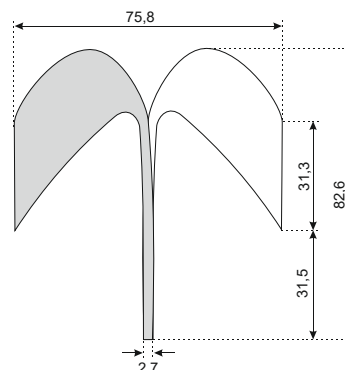
Otrzymaną geometrię należy następnie przeskalować celem uzyskania pożądanej dolnej częstotliwości granicznej pasma pracy, przy czym wymaga to dobrania wartości translacji krzywych w sposób umożliwiający bezpośrednie dołączenie ich do linii dwupaskowej o szerokości zdeterminowanej przenikalnością elektryczną wybranego podłoża, jego grubością oraz grubością metalizacji. Górną częstotliwość graniczną pasma pracy anteny determinują własności stratne wybranego podłoża dielektrycznego.

Zaprezentowana geometria przypomina antenę sierpową, której kształt był pierwotnie inspirowany wyglądem ostrza tegoż narzędzia. Podobną antenę opisano w [5], gdzie przyjęty arbitralnie kształt poddano modyfikacjom przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego. Kształt otrzymany w niniejszej pracy ma jednak tę zaletę, że nie zawiera załamań, dzięki czemu można go aproksymować wielomianem niskiego stopnia. To z kolei umożliwia proces optymalizacji przy zastosowaniu wybranego komercyjnego oprogramowania symulacyjnego.

Wyniki symulacji numerycznej

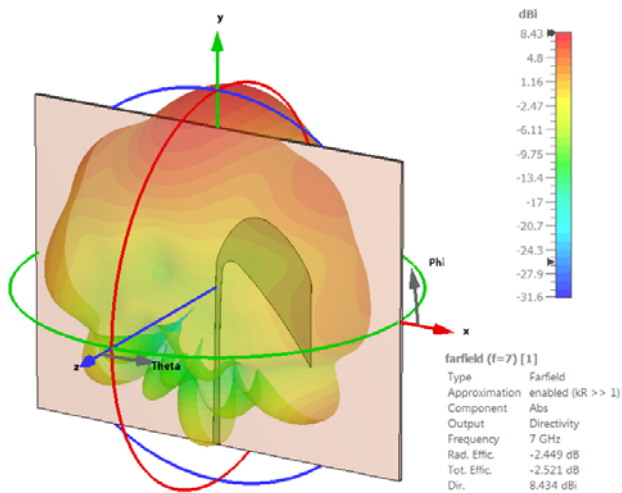
Opisaną antenę poddano symulacji w pakiecie CST STUDIO SUITE przyjmując jako podłoże stratny laminat FR-4. Pakiet CST po wprowadzeniu kształtu i rodzaju podłoża umożliwia skalowanie anteny, a następnie symulację jej charakterystyk z wykorzystaniem jednej z zaimplementowanych metod numerycznych. W tym wypadku zastosowano metodę FDTD. Pakiet ten umożliwia ponadto optymalizację kształtu pod kątem uzyskania pożądanych parametrów.

Wymiary anteny dla wybranej dolnej częstotliwości jej pasma pracy wynoszącej 2 GHz przedstawione zostały na rys. 4.



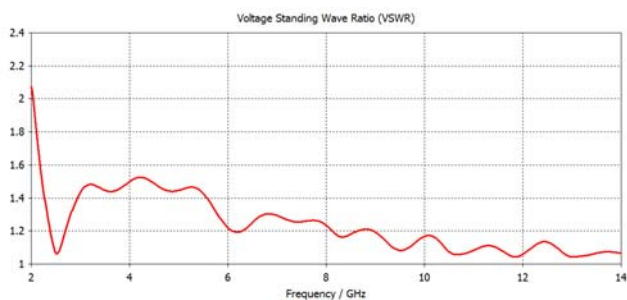
Rys. 4. Przyjęte do symulacji wymiary anteny w [mm]

Otrzymana trójwymiarowa charakterystyka promieniowania powyższej anteny dla częstotliwości 7 GHz przedstawiona została na rys. 5.



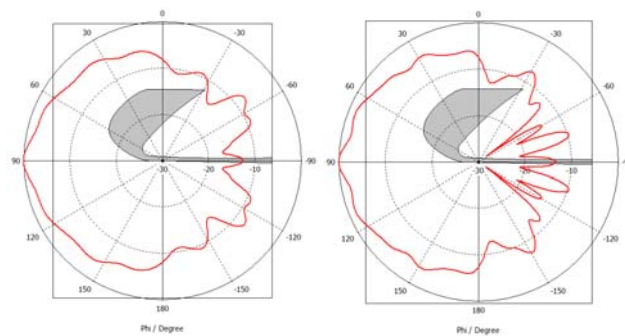
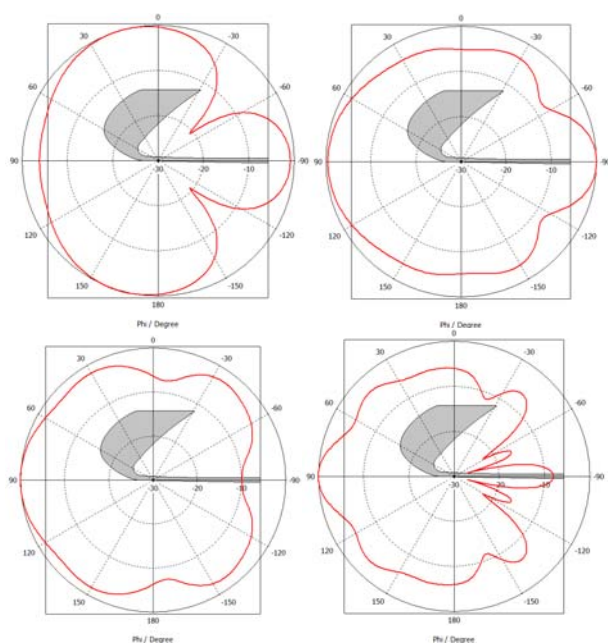
Rys. 5. Trójwymiarowa charakterystyka promieniowania dla częstotliwości 7 GHz otrzymana w wyniku badań symulacyjnych modelu

Wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych dla tego modelu w postaci charakterystyki napięciowego współczynnika odbicia (WFS) w zakresie częstotliwości od 2 do 14 GHz oraz charakterystyk promieniowania w płaszczyznach horyzontalnej (H) oraz wertykalnej (V) dla wybranych częstotliwości z ww. pasma, przedstawione zostały kolejno na rys. 6 ÷ 8.

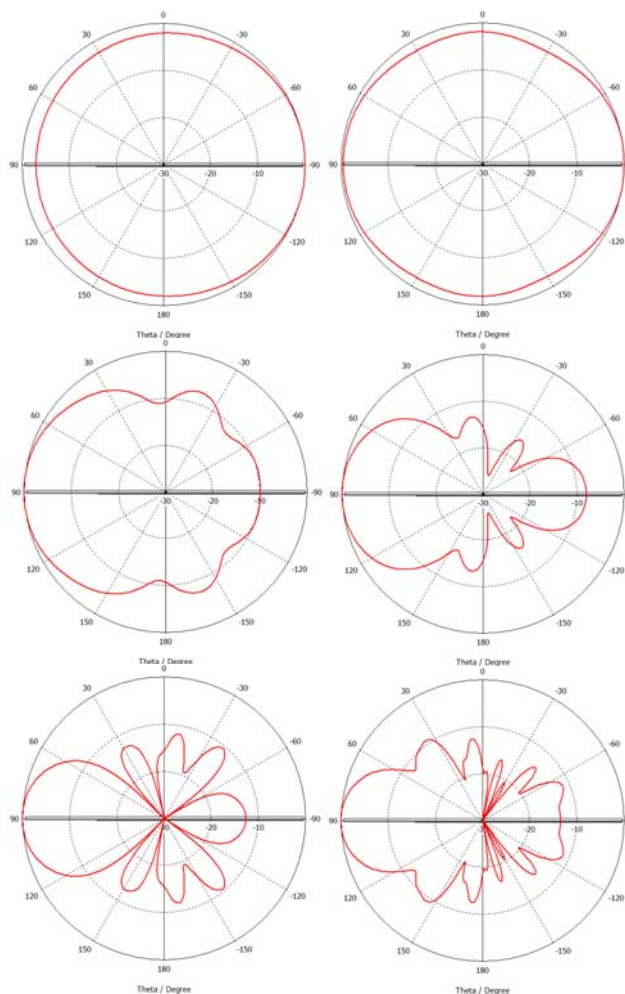


Rys. 6. Wyniki badań symulacyjnych charakterystyki WFS

Otrzymany WFS ma dość gładki przebieg, co jest cechą typową dla anten z falą bieżącą.



Rys. 7. Wyniki badań symulacyjnych unormowanych charakterystyk promieniowania w płaszczyźnie H dla częstotliwości kolejno 2,5; 3,5; 5; 7; 10 i 12 GHz



Rys. 8. Wyniki badań symulacyjnych unormowanych charakterystyk promieniowania w płaszczyźnie V dla częstotliwości kolejno 2,5; 3,5; 5; 7; 10 i 12 GHz

Dla niższych częstotliwości antena ma charakterystykę kwazi-hemisferyczną z wyraźnym listkiem wstecznym w płaszczyźnie H. W miarę wzrostu częstotliwości charakterystyka ta staje się bardziej kierunkowa z rosnącym udziałem listków bocznych.

Model laboratoryjny anteny

Antena została wykonana 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 zawarto w tab. 1.

Tab. 1. Wybrane parametry zastosowanego podłoża [6]

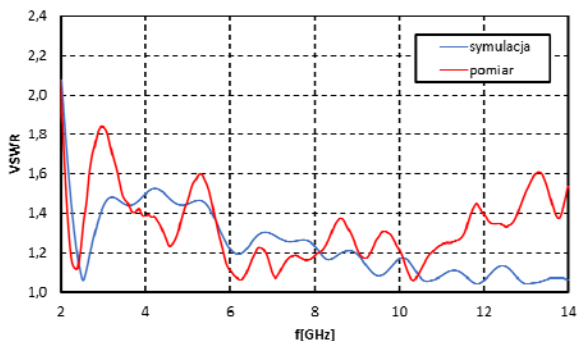
parametr	jedn.	wartość	uwagi
tangens kąta stratności	-	0,08	przy 1 GHz
przenikalność elektryczna	F/m	5,3	przy 1 GHz
wytrzymałość elektryczna	kV	30	prostopadle do warstw
	kV	25	równoległe do warstw
gęstość laminatu	g/cm ³	1,7 - 2,0	RH 60%
grubość laminatu	mm	1,5	
grubość folii miedzianej	mm	0,045	

Fotografia wykonanego modelu anteny zaprezentowana została na rys. 9.



Rys. 9. Fotografia modelu anteny

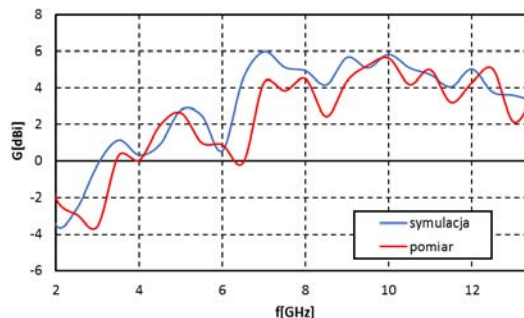
Rezultaty pomiarów charakterystyki odbiciowej wykazały dobrą zgodność z wynikami symulacji. Na rys. 10. przedstawione zostały przebiegi wartości VSW symulowanych i pomierzonych w zakresie od 2 do 14 GHz. Do pomiaru charakterystyki VSW wykorzystano analizator obwodów typu P9373B firmy Keysight, co ograniczyło górny zakres analizowanych częstotliwości do wartości 14 GHz.



Rys. 10. Porównanie symulowanego i zmierzonego VSWR modelu anteny

Większe wartości współczynnika fali stojącej w porównaniu do wyników symulacji w CST dla częstotliwości powyżej 10 GHz wynikają ze wzrostu stratności zastosowanego podłoża i właściwości przejścia z linii współosiowej na dwupaskową. W całym jednak badanym zakresie częstotliwości współczynnik fali stojącej nie przekracza wartości 2.

Zyski energetyczne wirtualnego i rzeczywistego modelu anteny dla badanego pasma częstotliwości, przedstawione zostały na rys. 11. Charakterystyka symulowana określona została na podstawie obliczonego w środowisku CST zysku tj. Gain (IEEE), zaś pomiary wykonano metodą porównawczą, wykorzystując do tego celu skalibrowaną pod względem zysku energetycznego antenę typu SAS-571 firmy A. H. Systems, pracującą w paśmie od 700 MHz do 18 GHz.



Rys. 11. Zysk energetyczny modelu anteny

Na podstawie przedstawionych na rys. 11 wyników badań symulacyjnych oraz bardzo zbliżonych do nich co do charakteru wyników pomiarów można stwierdzić, że zaproponowana struktura charakteryzuje się zyskiem energetycznym na poziomie pojedynczych dBi i nie odbiega pod tym względem znacząco od innych rozwiązań planarnych szerokopasmowych anten dipolowych. Rosnąca wraz z częstotliwością kierunkowość anteny, przy zachowaniu stałego poziomu zysku świadczy o malejącej sprawności wynikającej z zastosowania laminatu o relatywnie dużych stratach.

Wnioski

Analiza rozkładu prawdopodobieństwa napotkania trajektorii błędzenia losowego na ruchomą barierę, prowadzi do uzyskania krzywych gładkich, o przebiegu zależnym od przyjętej bariery. Krzywe te charakteryzują bardzo dużym nachyleniem dla małych argumentów, dzięki czemu dość łatwo można je wykorzystać do konstrukcji anten planarnych. Mogą mieć one zwartą konstrukcję i ultraszerokie pasmo pracy, które to cechy są zwykle bardzo korzystne z punktu widzenia zastosowań w mobilnych systemach radiowych. Anteny o takiej konstrukcji łatwo też łączyć w szyki antenowe. Geometria opisanej tu anteny została uzyskana w wyniku analizy przeprowadzonej dla bariery parabolicznej, jednak nic nie stoi na przeszkodzie aby w podany sposób wypróbować bariery o innych przebiegach.

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] Verma R. K., Srivastava D. K., Optimization and parametric analysis of slotted microstrip antenna using particle swarm optimization and curve fitting, *Intern. Journ. of Circuit Theory and App.*, 49 (2021), No. 7, 1868-1883
- [2] Pasternak M., Lambert-W function application for construction of antipodal Vivaldi-type antenna, *14th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecomm. and Computer Science, (TCSET 2018)*, 624-627
- [3] Dutca M., Morariu G., Morariu G., Machedon-Pisu M., Croitoru O., Logarithmic fractal segment antenna, *13th Intern. Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2012)*, 1266-1273
- [4] Zhang J., Hui L., On random walks with a general moving barrier, *The Astrophysical Journal*, 641 (2006), No. 10, 641-646
- [5] Chan C. H., Yeung S. H., Chan W. S., Man K. F., Genetic algorithm optimized printed UWB sickle-shape dipolar antenna with stable radiation pattern, *Microwave and Optical Technology Letters*, 49 (2007), No. 11, 2695-2697