



Wykorzystanie technologii druku 3D do konstrukcji anten planarnych

MACIEJ CZERWIŃSKI, MATEUSZ PASTERNAK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
00-908 Warszawa, mateusz.pasternak@wat.edu.pl

Streszczenie. W pracy analizowano przydatność technologii druku 3D do konstrukcji podłoży antenowych o zadanej przenikalności elektrycznej. Parametr ten, jak wiadomo, ma silny wpływ na parametry anten planarnych. Zastosowanie druku 3D pozwala na dość swobodny dobór wartości przenikalności elektrycznej w granicach pomiędzy wartością dla powietrza i materiału litego. Dobór taki można realizować poprzez zmianę tworzywa wykorzystywanego do druku 3D oraz sposób wypełniania objętości podłoża. Wyniki symulacji i wstępnych pomiarów wskazują, że idea druku podłoży antenowych może być interesująca z konstrukcyjnego punktu widzenia. Przedmiotem opisanej w artykule pracy było wykonanie symulacji wybranych własności anten planarnych na podłożach drukowanych, a następnie realizacja pomiarów z wykorzystaniem wykonanych modeli laboratoryjnych. Porównanie otrzymanych wyników numerycznych z wartościami uzyskanymi w trakcie pomiarów jest źródłem informacji o stosowalności standardowych technik symulacyjnych w odniesieniu do podłoży drukowanych o dość skomplikowanej ażurowej strukturze.

Słowa kluczowe: materiały elektroniczne, podłoża anten planarnych, zastosowania druku 3D

DOI: 10.5604/01.3001.0014.2799

1. Wstęp

Intensywny rozwój technologii druku przestrzennego (3D) sprawił, że jest ona coraz częściej wykorzystywana do prototypowania i modelowania specyficznych obiektów na potrzeby różnych dziedzin nauki i techniki. Dostępność wielu rodzajów tworzyw daje obecnie dużą elastyczność nie tylko w kształtowaniu geometrii przestrzennej tychże obiektów, lecz także ich struktury materiałowej. Anteny planarne są dziś jednym z częściej wykorzystywanych rodzajów promienników fal

elektromagnetycznych. Ich popularność wynika z prostoty realizacji i stosunkowo niewielkich rozmiarów, co przekłada się także na niskie koszty wykonania. Postępujący proces ograniczania wymiarów urządzeń elektronicznych oraz rosnące wymogi ich mobilności powodują, że tego rodzaju anteny stają się wręcz bezkonkurencyjne. Głównym czynnikiem wpływającym na charakterystykę częstotliwościową promieniowania anten planarnych, oprócz geometrii promienników, są właściwości elektryczne ich podłoża. Podejmuje się wiele prób, które mają na celu uzyskanie podłoży o minimalnej stratności, a jednocześnie wysokiej stabilności i wytrzymałości mechanicznej. Sprawność promieniowania anten planarnych oraz szerokość ich pasma pracy silnie zależą od przenikalności elektrycznej podłoża. W wielu zastosowaniach dąży się do maksymalnego zbliżenia elektrycznych własności podłoża do własności próżni poprzez obniżanie gęstości podłoża [1].

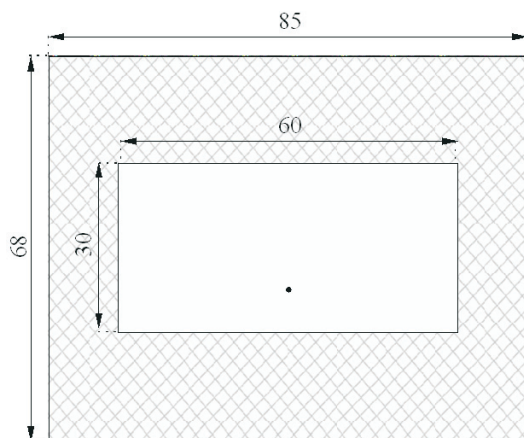
2. Wpływ struktury materiałowej podłoża na anteny planarne

Na anteny planarne składają się płaskie podłoże oraz promiennik. Charakterystykę promieniowania takich struktur formuje się poprzez dobór geometrii promiennika, a także właściwości elektrycznych podłoża. Podłoże ma ponadto wpływ na sprawność promieniowania oraz pasmo pracy anteny. Analizując zależności pozwalające analitycznie wyliczyć częstotliwość pracy geometrycznie prostych kształtów, można stwierdzić, że częstotliwość pracy jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka współczynnika efektywnej przenikalności elektrycznej podłoża [2-6]. Przy zachowaniu wszystkich wymiarów fizycznych zakłada się, że elektryczna przenikalność efektywna podłoża zależna jest od jego właściwości materiałowych i geometrycznych. Znając tę zależność oraz mając możliwość zmieniania przenikalności elektrycznej, można w pewnych granicach formować charakterystykę częstotliwościową anteny poprzez zmianę parametrów elektrycznych podłoża. Można to osiągnąć, stosując materiały o dużej zawartości powietrza, np. gąbki, pianki i inne materiały o strukturze porowatej. Problemem w tym przypadku staje się wytrzymałość mechaniczna podłoża, która może okazać się zbyt niska [7].

3. Projekt anten

W celu sprawdzenia technicznej przydatności drukowanych podłoży antenowych oraz właściwości elektrycznych elementów realizowanych przy wykorzystaniu druku 3D zaprojektowano prosty promiennik prostokątny z przeznaczeniem do prób z różnymi podłożami. Promiennik zasilano półsztywną linią współosiową. Wybór promiennika wynikał z potrzeby zapewnienia powtarzalności geometrii anten. Projekt podłoża stworzono z wykorzystaniem oprogramowania do modelowania 3D,

następnie wykonano wydruki podłoża, wykorzystując poliaktyd (polikwas mlekowy) — PLA. Testom poddano wydruki zawierające w swej objętości 50, 40, 20, 10, 5 i 1% powietrza. Jako odniesienie przyjęto antenę wykonaną na podłożu z laminatu szklano-epoksydowego FR-4 o grubości 3 mm — takiej samej jak podłoża drukowane. Dielektryk wykorzystany jako podłoże anteny odniesienia został wybrany ze względu na jego szeroką dostępność i popularność. Przyjęta grubość druku podyktowana była potrzebą zapewnienia wystarczającej wytrzymałości mechanicznej. Jest ona także efektem istniejących wciąż ograniczeń techniki druku 3D. Promiennik został ułożony na środku podłoży. Wymiary podłoży oraz promiennika zostały pokazane na rysunku 1. Z powodu drobnych błędów wydruku powierzchnia zewnętrzna nie jest zbyt dobrze zespolona z podłożem. Gęstość podłoża regulowana była za pomocą zmiany geometrii wewnętrznego ażuru.



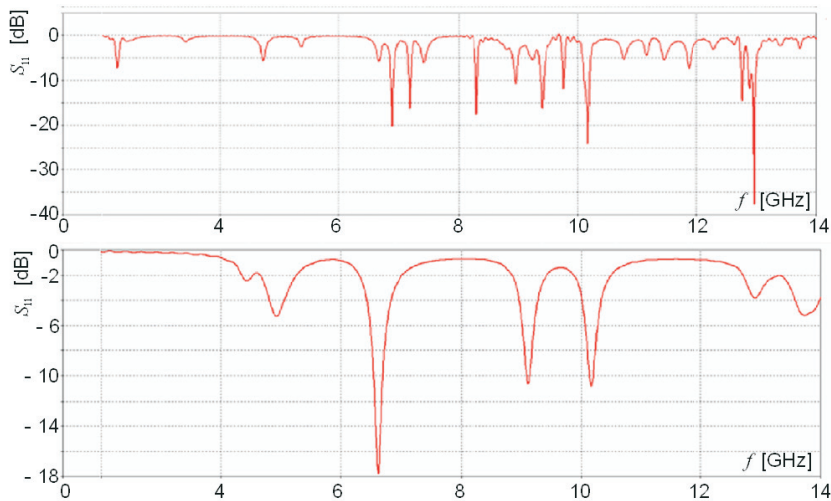
Rys. 1. Wymiary podłoża oraz promiennika anteny. Skala 1 : 1; kropką zaznaczono punkt zasilania

Wykonanie anten zostało poprzedzone wstępnymi badaniami symulacyjnymi zrealizowanymi w środowisku CST. Symulacje sporządzono dla dwóch materiałów: laminatu FR-4 w roli podłoża odniesienia oraz powietrza, do którego parametrów dąży się poprzez zastosowanie konstrukcji ażurowej o minimalnej osiągalnej gęstości. Symulacja przeprowadzona była w paśmie 1-14 GHz, co odpowiadało zakresowi planowanych pomiarów. Przykładowe wyniki symulacji charakterystyk częstotliwościowych współczynnika odbicia przedstawiono na rysunku 2.

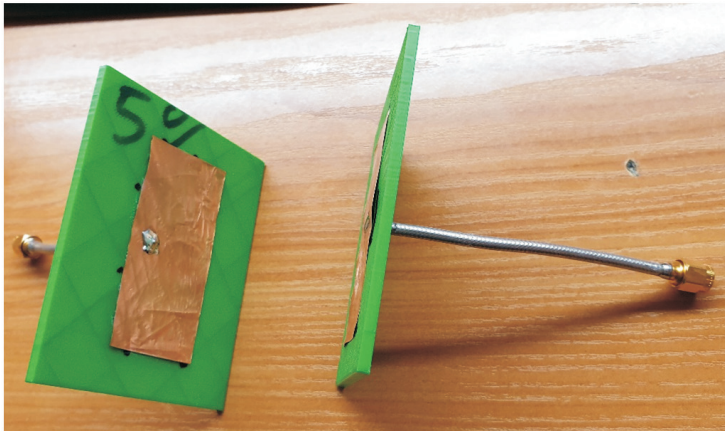
Wynik ten wyraźnie ilustruje wpływ podłoża na charakterystyki częstotliwościowe anten. Na rysunku widoczne są częstotliwości rezonansowe, jednak nie uwzględnia się ich przy dalszym procesie badawczym. Charakterystyki przygotowano symulacyjnie dla całego zakresu częstotliwościowego, natomiast końcowego porównania dokonuje się dla częstotliwości pracy. Różnice spowodowane są istnieniem

strat oraz własnościami rezonansowymi wybranego do testów dielektryka. Pewien wpływ mają także niedokładności modelu numerycznego.

Wygląd ukończonych anten przedstawiony jest na rysunku 3.



Rys. 2. Wyniki symulacji charakterystyk częstotliwościowych anten. U góry przedstawiono charakterystykę dla badanego laminatu FR-4, na dole dla powietrza



Rys. 3. Gotowe anteny z widoczną wewnętrzną strukturą azurową

4. Wyniki badań

Przeprowadzono badania mające na celu weryfikację rezultatów symulacji komputerowych oraz teoretycznych założeń wcześniej zaprojektowanych anten. Badania odbyły się dwuetapowo. Pierwszy etap zakładał sprawdzenie przenikalności elektrycznej wydrukowanych podłoży metodą kondensatorową. Pomijając zjawiska brzegowe, pojemność kondensatora płaskiego ma wartość:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}, \quad (1)$$

gdzie S jest powierzchnią okładek, zaś d dystansem pomiędzy nimi, zaś iloczyn $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ opisuje bezwzględną przenikalność elektryczną dielektryka znajdującego się pomiędzy okładkami. Znając parametry geometryczne okładek, łatwo można wyznaczyć przenikalność elektryczną ośrodka znajdującego się pomiędzy nimi. Ważne było wykonanie wystarczająco dokładnych pomiarów pojemności. W tym celu wykorzystano mostek pomiarowy oraz okładki wykonane z miedzianej blachy grubości 0,2 mm przylegającej do mierzonego dielektryka. Wykonano pięć serii pomiarowych, każda z nich została poprzedzona kalibracją mostka. Obliczone za pomocą wzoru (1) wartości przenikalności elektrycznej uśredniono. Wyniki prezentuje tabela 1.

TABELA 1

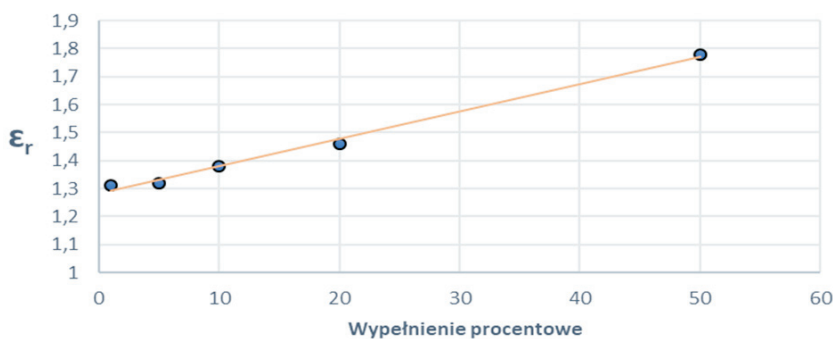
Wyniki pomiaru wartości efektywnej przenikalności elektrycznej względnej dla podłoży drukowanych

nr serii podłoże	1	2	3	4	5	Średnia
FR-4	3,56	3,58	3,61	3,62	3,59	3,59
1%	1,30	1,31	1,32	1,31	1,32	1,31
5%	1,32	1,32	1,32	1,32	1,31	1,32
10%	1,37	1,39	1,37	1,38	1,38	1,38
20%	1,47	1,46	1,45	1,47	1,45	1,46
40%	1,36	1,37	1,37	1,38	1,37	1,37
50%	1,77	1,78	1,79	1,77	1,79	1,78
pianka polistyrenowa	1,19	—	—	—	—	1,19

Na uwagę zasługuje dość znaczna rozbieżność wartości względnej przenikalności elektrycznej pomiędzy podłożem z wypełnieniem 1% a podłożem wykonanym z polistyrenu spienionego, pomimo podobnej w obu przypadkach zawartości powierza. Najprawdopodobniej rozbieżność ta wynika z różnicy przenikalności

elektrycznej zastosowanych tworzyw. Polistyren w badanym zakresie częstotliwości zmienia ten parametr w granicach 2,4-2,7, podczas gdy dla poliaktydu waha się on pomiędzy wartościami 3,5-4,0.

Do porównań wykorzystano współczynniki uśrednione widoczne w ostatniej kolumnie tabeli 1. Podczas badań sprawdzono także wpływ sposobu wypełnienia podłoża na przenikalność elektryczną gotowego elementu. Seria zawiera zbyt mało punktów pomiarowych, aby poprawnie wyznaczyć zależność przenikalności od procentowego wypełnienia objętości, jednak wydaje się, że w rozpatrywanym zakresie częstotliwości zależność ta jest liniowa, co ilustruje rysunek 4.

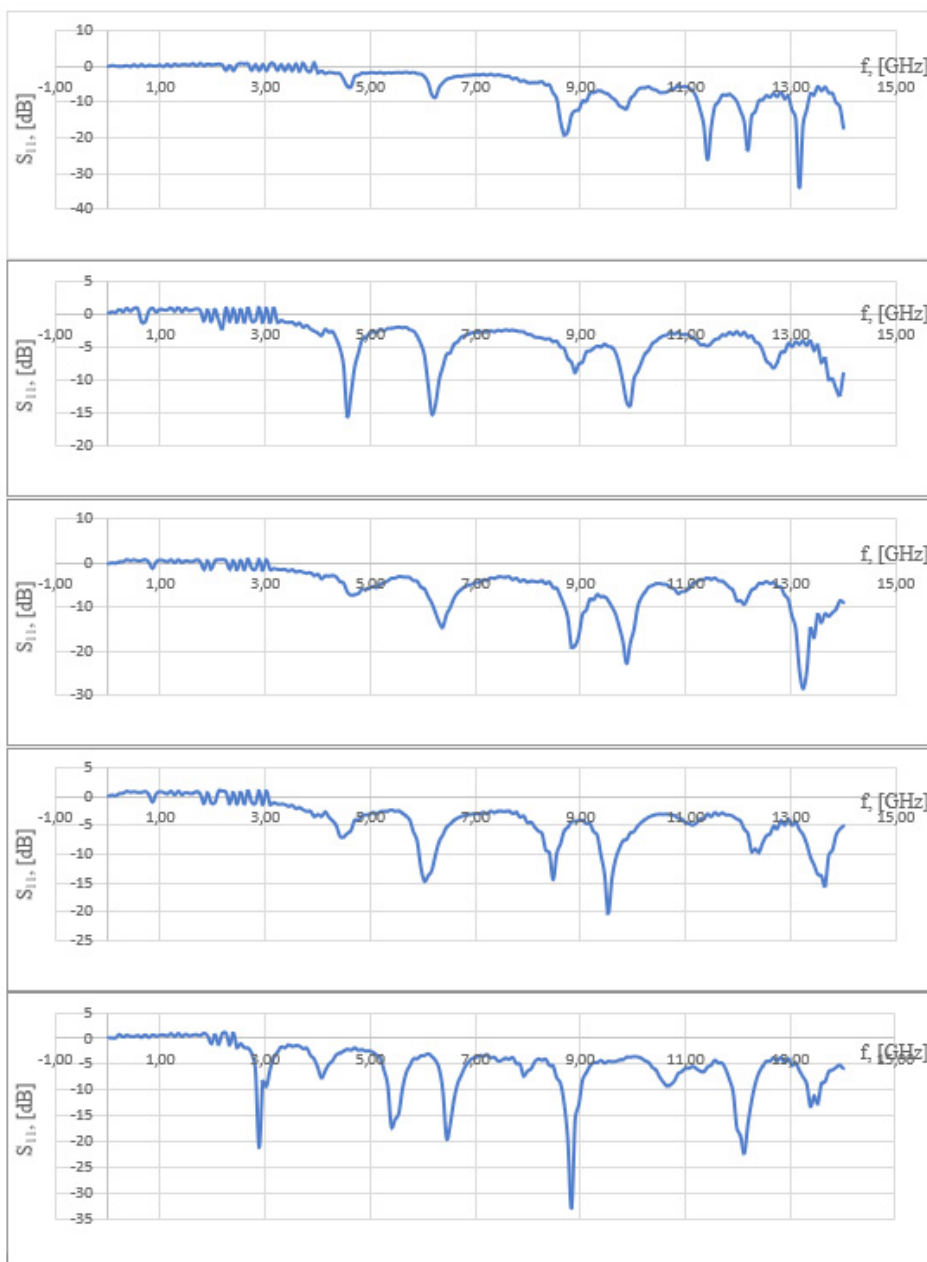


Rys. 4. Zależność przenikalności elektrycznej podłoża od wypełnienia

Podłoże o wypełnieniu 40% zostało odrzucone z powodu znacznych błędów wydruku, które ujawniły się w trakcie badań — masa podłoża była niezgodna z masą teoretyczną odpowiadającą metodzie wypełnienia.

Drugie badanie miało na celu sprawdzenie charakterystyk częstotliwościowych współczynnika odbicia uzyskanych anten. Do pomiarów wykorzystano przenośny wektorowy analizator obwodów pracujący w paśmie do 14 GHz. Zmierzone charakterystyki przedstawiono na rysunku 5.

Porównując antenę odniesienia oraz antenę o najmniejszym wypełnieniu, stwierdzono przesunięcie najbardziej efektywnego pasma pracy aż o 4 GHz. Wraz ze wzrostem wypełnienia następuje obniżanie wartości tego parametru. Porównując praktycznie uzyskane charakterystyki do tych symulowanych w środowisku CST, stwierdzono duże rozbieżności. Mogą one wynikać z kilku czynników, takich jak niedokładność wykonania anten, szczególnie dla małych wypełnień. Prawdopodobnie zasadniczy wpływ na wymienione rozbieżności miała niezgodność realnych parametrów geometrycznych podłoża z parametrami symulowanymi w środowisku. Oprogramowanie nie umożliwia wystarczająco precyzyjnego odtworzenia ażuru i w symulacji posłużono się uśrednioną wartością przenikalności. Tego rodzaju uśrednienie nie pozwala na uwzględnienie rezonansów struktury wypełnienia, które mogą zachodzić na wyższych częstotliwościach.



Rys. 5. Zmierzone charakterystyki częstotliwościowe serii anten. Kolejno dla podłoży o wypełnieniu 1%, 5%, 10%, 20% oraz dla FR-4

5. Podsumowanie

Przedstawione w artykule wyniki badań potwierdzają techniczną przydatność technologii druku 3D do realizacji podłoży anten planarnych i zachęcają do dalszych eksperymentów w tym zakresie. Można zauważyć, że realizacja anten planarnych na podłożach drukowanych pozwala na kształtowanie w dość szerokim zakresie ich charakterystyk częstotliwościowych. Wynika to przede wszystkim z możliwości doboru efektywnej przenikalności elektrycznej podłoży od wartości właściwej dla powietrza aż do wartości dla tworzywa litego. Obniżanie częstotliwości rezonansowej badanych anten jest bardzo wyraźne, choć uzyskane zmiany efektywnej przenikalności elektrycznej są stosunkowo niewielkie. Świadczy to o dość dużym potencjale metody. Technika drukowania podłoży wymaga jeszcze licznych badań z zastosowaniem różnych geometrii wypełnień, jak również różnego rodzaju tworzyw. W dalszej perspektywie konieczne też wydaje się zbadanie wpływu techniki druku i rodzaju tworzywa na charakterystyki kierunkowe anten.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na XXXV Konferencji elektroniki, telekomunikacji i energetyki SECON 2019, WAT, Warszawa 24.04.2019.

Artykuł wpłynął do redakcji 11.06.2019 r. Zatwierdzono do publikacji 26.02.2020.

Mateusz Pasternak <https://orcid.org/000-0003-2160-3786>

LITERATURA

- [1] GAUTHIER G. P., COURTAY A., REBEIZ G. M., *Microstrip antennas on synthesized low dielectric-constant substrate*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 45, 8, 1997, 1310-1314.
- [2] WONG K., *Compact and Broadband Microstrip Antennas*, New York, 2002.
- [3] SILVER S., *Microwave antenna theory and design*, University of California, Berkeley, 1949.
- [4] CHEN Z., CHIA M., *Broadband Planar Antennas*, Chichester, England, 2006.
- [5] BUGAJ J., WNUK M., ŁATA K., *Projekt planarnej anteny dwuzakresowej 1800/2600 MHz*, Przegląd Telekomunikacyjny, 8-9, 2013.
- [6] BUGAJ J., BUGAJ M., WNUK M., *Design of WLAN microstrip antenna for 5/17-5.835 GHz*, Proceedings of SPIE, 10418, 2016.
- [7] GHAZALI M., GUTIERREZ E., MYERS J., KAUR A., WRIGHT B., CHAHAL P., *Affordable 3D Printed Microwave Antennas*, Department Electrical and Computer Engineering, Michigan State University, 2015.

M. CZERWIŃSKI, M. PASTERNAK

Use of 3D printing technology for planar antenna constructions

Abstract. The applicability of 3D print technologies for manufacturing of planar antenna substrates having tailored permittivity was considered in the work. The permittivity is known as a parameter that has strong influence on the planar antennae key parameters. The application of 3D print gives the possibility of changing this parameter in the range between its value for air up to the value for homogeneous solid material. The change can be achieved through the change of the filament material and the way of 3D print pattern. The preliminary results of simulations and measurements show that the idea of printing of planar antennae substrate may be interesting alternative from a design engineering point of view.

DOI: 10.5604/01.3001.0014.2799

