

Konstrukcje i charakterystyki czteroelementowej anteny ultraszerokopasmowej UWB

Streszczenie. W artykule zostały omówione konstrukcje dwóch czteroelementowych ultraszerokopasmowych układów antenowych oraz prototypowej ultraszerokopasmowej pojedynczej anteny z eliptycznym promiennikiem. Pokazane zostały obliczone charakterystyki dopasowania anten oraz charakterystyki promieniowania. Przedstawiono również wyniki pomiarów parametrów obwodowych wykonanych anten.

Abstract. The paper presents constructions of a ultra-wideband single elliptical antenna and two variants of 4-element ultra-wideband antenna arrays. The paper also shows calculated characteristics of impedance, VSWR as well as radiation patterns. Measured characteristics of impedance and VSWR were discussed. (**Constructions and characteristics of 4-element ultra-wideband antenna arrays**).

Słowa kluczowe: antena ultraszerokopasmowa, ultraszerokopasmowy układ antenowy, projektowanie anten, pomiary parametrów anten.
Keywords: ultra-wideband antenna, ultra-wideband array, antenna design, measurements of antenna parameters.

doi:10.12915/pe.2014.12.14

Wstęp

Projektowanie i analiza anten przeznaczonych dla systemów ultraszerokopasmowe UWB cieszy się w ostatnich latach niemalejącym zainteresowaniem. Można chyba przyznać, że opadły nieco początkowe emocje i entuzjazm towarzyszący rokowaniom systemów UWB, jednak techniki ultraszerokopasmowe zdołały zapewnić sobie silną pozycję i znaczenie. Różnorodność zastosowań systemów UWB wymaga od projektantów opracowania anten o różnych właściwościach. W literaturze światowej dominują propozycje anten pojedynczych, których obszerny przegląd konstrukcji i właściwości można znaleźć w [1,2]. Istnieje również zapotrzebowanie na układy antenowe UWB, jednak takich konstrukcji jest analizowanych zdecydowanie mniej [3-7].

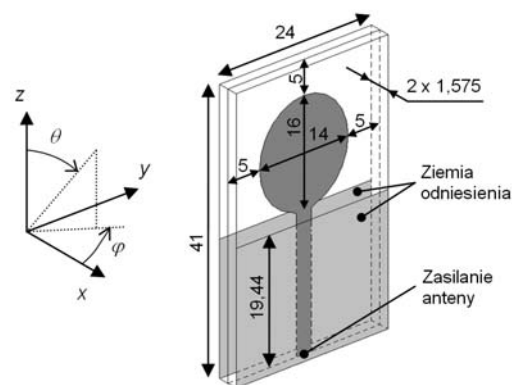
Tematem artykułu jest analiza parametrów czteroelementowych szkieł antenowych UWB, co stanowi kontynuację prac przedstawionych przez autora w [8,9]. Wcześniejsze prace dotyczą analizy szkieł zawierających różną liczbę promienników, zasilanych z osobnych generatorów. W niniejszym artykule przedstawiono rozwiązania układów antenowych zawierających szerokopasmową sieć zasilającą, posiadających jedno wejście zasilające. Przedstawiono dwa warianty szkieł, charakteryzujących się różnymi odległościami pomiędzy elementami promieniującymi. Właściwości takich układów zostały porównane z pojedynczą anteną prototypową. Rozpatrywane w pracy anteny zostały zaprojektowane do pracy w europejskim paśmie przewidzianym dla systemów UWB: 6 – 8,5 GHz.

Modelowanie i analiza komputerowa anten UWB

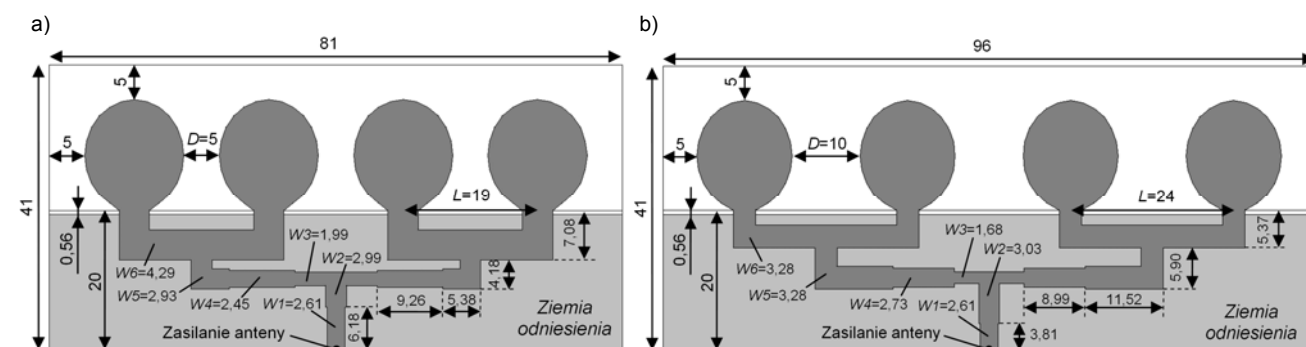
Na rysunku 1 została przedstawiona struktura anteny pojedynczej UWB wraz z orientacją przyjętego układu współrzędnych. Antena pojedyncza stanowiła punkt

odniesienia w projektowaniu analizowanych czteroelementowych układów antenowych – jej eliptyczny promiennik stanowi powielany element promieniujący szkieł. Wszystkie anteny analizowane w pracy zostały zaprojektowane w realizacji paskowej symetrycznej. Określenie realizacji paskowej symetrycznej odnosi się właściwie do technologii części zasilającej. Bliźniacze struktury niesymetryczne anten pojedynczych i podwójnych zostały przeanalizowane przez autora w [10-13].

Anteny przedstawione w pracy składają się z dwóch warstw dielektryka, pomiędzy którymi znajduje się właściwy element (lub elementy) promieniujący wraz z linią zasilającą. Grubości obu warstw dielektryka wynoszą po 1,575 mm (całkowita grubość anten wynosi 3,15 mm), przenikalność laminatu $\epsilon_r = 2,2$. Promiennik anteny pojedynczej ma kształt elipsy o długości osi poziomej 14 mm i pionowej 16 mm. Takie wymiary pozwalają na uzyskanie dookólnej charakterystyki promieniowania i jednocześnie dobrych charakterystyk dopasowania anteny.



Rys. 1. Struktura pojedynczej anteny UWB, wymiary w mm



Rys. 2. Struktury i wymiary (w mm) analizowanych szkieł antenowych 4-elementowych: $D = 5$ mm (a), $D = 10$ mm (b)

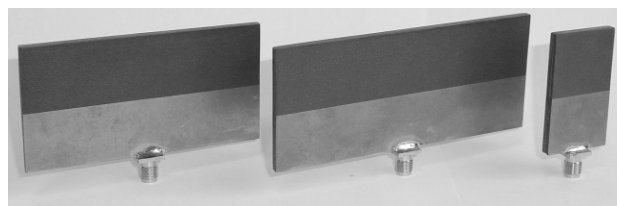
Linia zasilająca została zaprojektowana jako linia składająca się z trzech sekcji o różnych impedancjach charakterystycznych. Całkowita długość linii zasilającej równa jest 20 mm. Wymiary całkowite anteny pojedynczej to 41 mm x 24 mm. Górna i boczne krawędzie anteny są przesunięte po 5 mm względem krańców eliptycznego promiennika. Na zewnętrznych warstwach struktury anteny znajdują się prostokątne obszary metalizacji stanowiące ziemię odniesienia. Szerokość tych obszarów jest równa szerokości całej anteny (24 mm), natomiast długość jest o 0,56 mm krótsza od długości linii zasilającej i wynosi 19,44 mm. Takie nieznaczne skrócenie, zastosowane dla wszystkich analizowanych w artykule anten, korzystnie wpływa na ich charakterystyki dopasowania. Wzbudzenie dołącza się do anteny przez gniazdo przymocowane do końca linii zasilającej przy dolnej krawędzi anteny.

Bazując na wymiarach pojedynczego promiennika eliptycznego zostały opracowane ultraszerokopasmowe czteroelementowe szyki antenowe. Rysunek 2 przedstawia mozaikę środkowej warstwy przewodzącej obu wariantów zaprojektowanych anten, zawierającą promienniki wraz z siecią zasilającą, na tle obszaru ziemi odniesienia. Promienniki zostały ustawione w linii prostej wzdłuż osi y w jednakowych odległościach (powierzchnie wszystkich anten są zorientowane w płaszczyźnie y - z). Rozpatrzono dwa warianty takich anten, w których krańce promienników są względem siebie oddalone o $D = 5$ i 10 mm. Długość elektryczna wyznaczona pomiędzy środkami kolejnych elementów promieniujących zmienia się w całym paśmie pracy dość znacznie. Dla przyjętych wymiarów promienników odległości pomiędzy ich środkami wynoszą dla granicznych częstotliwości analizowanego pasma UWB odpowiednio: dla $D = 5$ mm od $0,38 \lambda$ (przy 6 GHz) do $0,54 \lambda$ (przy 8,5 GHz) a dla $D = 10$ mm od $0,48 \lambda$ do $0,68 \lambda$ (względem długości fali w wolnej przestrzeni). Analizowane szyki antenowe są zasilane przez wielosekcyjne szerokopasmowe dzielniki mocy stanowiące jednocześnie układy dopasowujące. Został przyjęty jednorodny rozkład wzbudzeń promienników. Struktury tych dzielników, jak również trzysekcyjnej linii zasilającej anteny pojedynczej, powstały w wyniku optymalizacji elektromagnetycznych modeli całych anten. Celem procesu optymalizacji było uzyskanie wartości współczynnika fali stojącej mniejszej niż 2 w całym paśmie pracy 6 – 8,5 GHz. Optymalizowane były długości i szerokości (oznaczone na rys. 2 jako W) poszczególnych sekcji układów zasilających, przy czym impedancję charakterystyczną odcinków, do których doprowadzone jest zasilanie anten, ustalono na 50Ω ($W1 = 2,61$ mm). Sieci zasilające szyków w rozpatrywanej formie charakteryzują się symetrią geometrii (względem płaszczyzny x - z), co zmniejszyło liczbę optymalizowanych wymiarów. Rysunek 2 przedstawia ostateczną postać geometrii anten, uzyskaną w procesie optymalizacji.

Symulacje komputerowe analizowanych struktur przeprowadzone zostały w programie IE3D / Hyper Lynx 3D EM, działającym w oparciu o metodę momentów. Z uwagi na dość znaczne rozmiary elektryczne szyków antenowych ich analiza komputerowa jest pewnym wyzwaniem. Model elektromagnetyczny anteny pojedynczej podzielony został na około 500 komórek, czemu w programie wykorzystanym do symulacji komputerowej odpowiada liczba ok. 1700 niewiadomych. Dla szyków czteroelementowych liczby te są znacznie większe: dla $D = 5$ mm liczba komórek wynosi ok. 2700 a niewiadomych ok. 12 tysięcy, natomiast dla $D = 10$ mm liczba komórek to ponad 3000 a liczba niewiadomych prawie 14 tysięcy. O ile czas obliczeń anteny pojedynczej na szybkiej i wydajnej jednostce obliczeniowej liczony jest w sekundach w jednym punkcie częstotliwości, o tyle w przypadku analizowanych szyków wzrasta on do ponad

kilkunastu minut w jednym punkcie częstotliwości. Nie jest to problemem w przypadku obliczeń charakterystyk impedancji czy promieniowania, które przy ustawieniu wymaganej wysokiej dokładności obliczeń trwać mogą nawet kilka - kilkanaście godzin. Natomiast w procesie optymalizacji czas obliczeń każdej iteracji może trwać tak samo długo, co skutecznie utrudnia projektowanie takich anten. Dlatego też procesy optymalizacji przeprowadzone zostały przy zredukowanej dokładności obliczeń a finalne obliczenia charakterystyk wykonano zgodnie z zaleceniami producenta wykorzystanego oprogramowania. Wszystkie przeprowadzone obliczenia parametrów obwodowych i charakterystyk promieniowania anten odpowiadają przypadkowi ich umieszczenia w wolnej przestrzeni.

Przedstawione anteny zostały wykonane przez autora. Jako gniazda wejściowe przyłutowane do dolnych krawędzi anten zostały zastosowane gniazda typu SMA. Zdjęcie wykonanych anten zostało przedstawione na rysunku 3. Wykonano pomiary parametrów obwodowych anten.



Rys.3. Zdjęcie wykonanych anten UWB

Pomiary parametrów obwodowych anten UWB

Zostały przeprowadzone pomiary charakterystyk częstotliwościowych impedancji i współczynnika fali stojącej zaprojektowanych oraz wykonanych anten. Charakterystyki WFS zostały wyznaczone dla impedancji odniesienia 50Ω . Pomiary przeprowadzono za pomocą analizatora sieci Agilent N5230A w paśmie częstotliwości 5,5 – 9 GHz, nieco szerszym od pasma pracy anten. Podczas pomiarów anteny umieszczano w prostopadłościennym o wymiarach rzędu 70 – 80 cm, którego ściany wyłożono materiałem absorbującym promieniowanie elektromagnetyczne. Można zatem uznać, że zmierzone charakterystyki odpowiadają przypadkowi umieszczenia anten w wolnej przestrzeni. Zmierzone charakterystyki pokazano na rysunku 4.

Należy przy tym zaznaczyć, że zmierzone charakterystyki impedancji anten zostały przekształcone do postaci pozwalającej na ich bezpośrednie porównanie z wynikami symulacji komputerowej. Powodem tego jest fakt, iż analizator sieci skalibrowany został do pomiarów na wejściu pomiarowym typu N. Do dołączenia mierzonych anten było więc konieczne zastosowanie odpowiedniego adaptera w.c.z. N-SMA o impedancji charakterystycznej dostosowanej do toru pomiarowego. W takiej sytuacji adapter możemy uznać za odcinek bezstratnej linii transmisyjnej transformującej impedancję anteny Z_A zgodnie ze znanym wzorem:

$$(1) \quad Z_{we} = Z_0 \cdot \frac{Z_A + jZ_0 \operatorname{tg}(\beta l)}{Z_0 + jZ_A \operatorname{tg}(\beta l)}$$

gdzie: $Z_0 = 50 \Omega$ – impedancja charakterystyczna linii (toru pomiarowego), βl – długość elektryczna linii. Transformacja ta zmienia wartości argumentu współczynnika odbicia, ale nie zmienia kształtu charakterystyk WFS .

Jak widać na rysunku 4 uzyskano wysoką zbieżność charakterystyk zmierzonych i obliczonych. Antena pojedyncza jest najlepiej dopasowana – maksymalna zmierzona wartość WFS wynosi około 1,35 (maksymalna wartość obliczona to 1,2), co stanowi bardzo dobry wynik. Nieco trudniejszym zadaniem okazało się uzyskanie

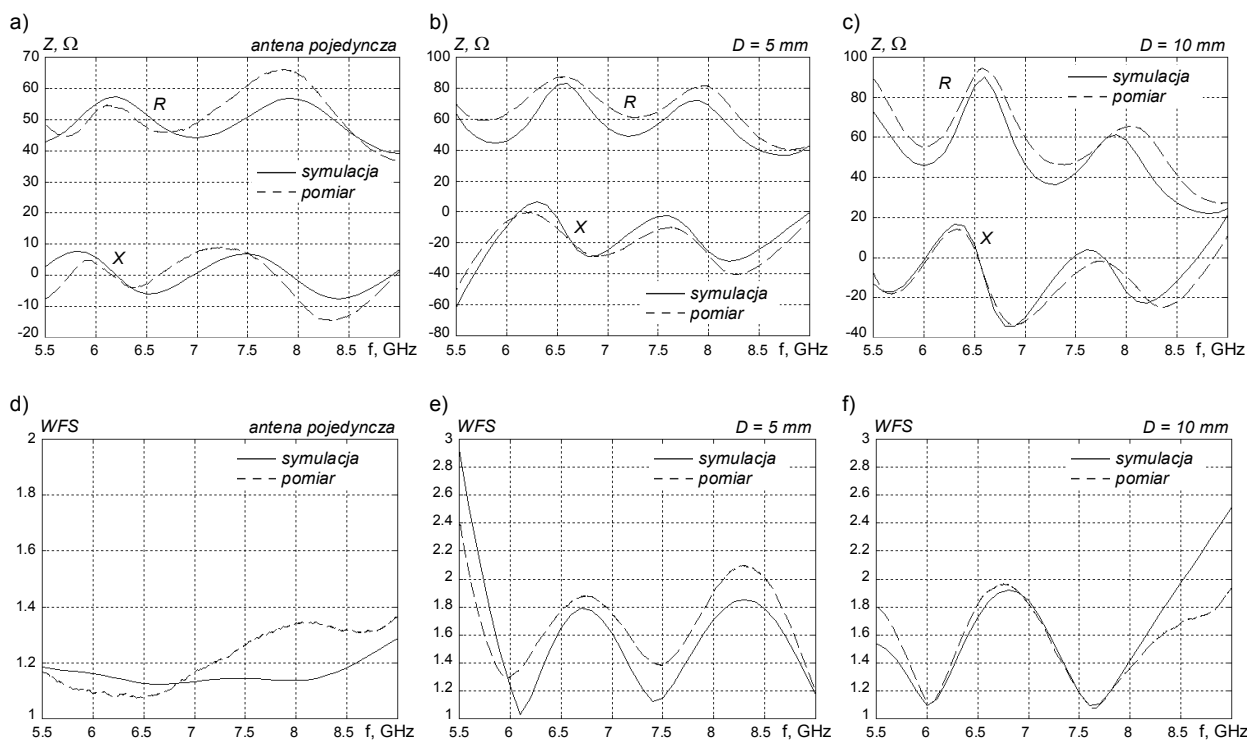
żądanego poziomu dopasowania szyków antenowych. Jedynie w wąskim zakresie częstotliwości w pobliżu górnej granicy pasma pracy dla szyku o odległości $D = 5$ mm zmierzona wartość WFS nieco przekracza założony maksymalny poziom równy 2 (rys. 4,e). Obliczone charakterystyki WFS obu wariantów szyków mieszczą się w zakresie założonym na etapie projektowania.

Charakterystyki promieniowania anten UWB

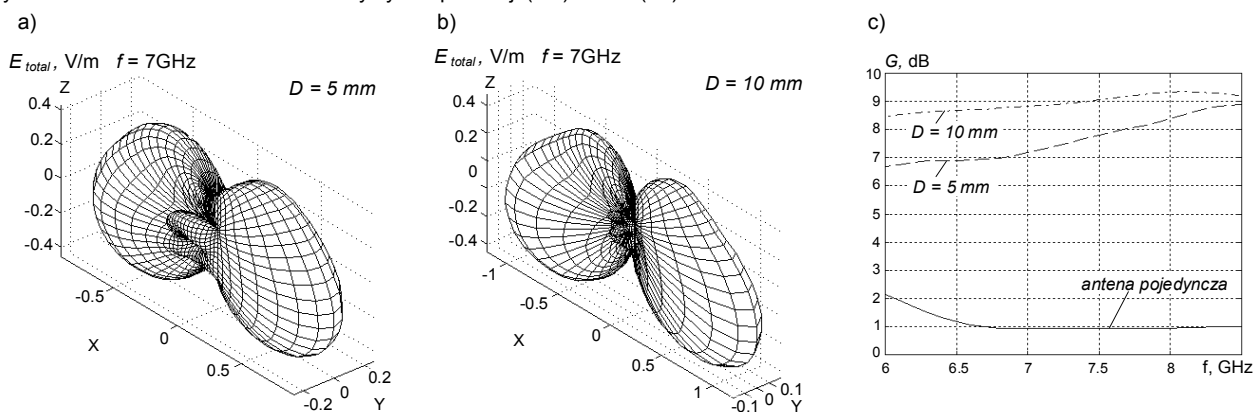
Zostały wyznaczone charakterystyki promieniowania wszystkich anten omawianych w pracy. Na rysunku 5,a,b zostały pokazane przykłady przestrzennych charakterystyk natężenia pola elektrycznego promieniowanego przez anteny UWB, przy pobudzeniu anten generatorem o wartości skutecznej $E_g = 1$ V i rezystancji wewnętrznej 50Ω . Charakterystyki pokazano w sposób poglądowy dla częstotliwości 7 GHz zbliżonej do częstotliwości środkowej pasma pracy anten. Charakterystyki wykazują podwójną symetrię (względem płaszczyzn $x-z$ oraz $y-z$), co jest związane z geometrią anten. Kierunek maksymalnego promieniowania, leżący w płaszczyźnie $x-z$, we wszystkich przypadkach jest przesunięty nieco poniżej normalnej do powierzchni anten. W tym miejscu należy też wspomnieć, iż

świadomie zaproponowano budowę anteny w formie symetrycznej dwuwarstwowej, w której promienniki znajdują się pomiędzy dwiema warstwami dielektryka a szerokopasmowy dzielnik bądź linia zasilająca anteny pojedynczej są ekranowane obustronnie dwoma obszarami ziemi odniesienia. Możliwa jest również realizacja szyków w formie mikropaskowej niesymetrycznej, podobnie jak konstrukcje anten pojedynczych opisane w [10-13]. W tym przypadku promieniowanie samej części zasilającej (dzielnika lub samej linii w antenie pojedynczej) w istotny sposób wpływałoby na wypadkowe charakterystyki promieniowania [13]. Charakterystyka częstotliwościowa zysku energetycznego anten dla kierunku normalnego do ich powierzchni została przedstawiona na rysunku 5,c.

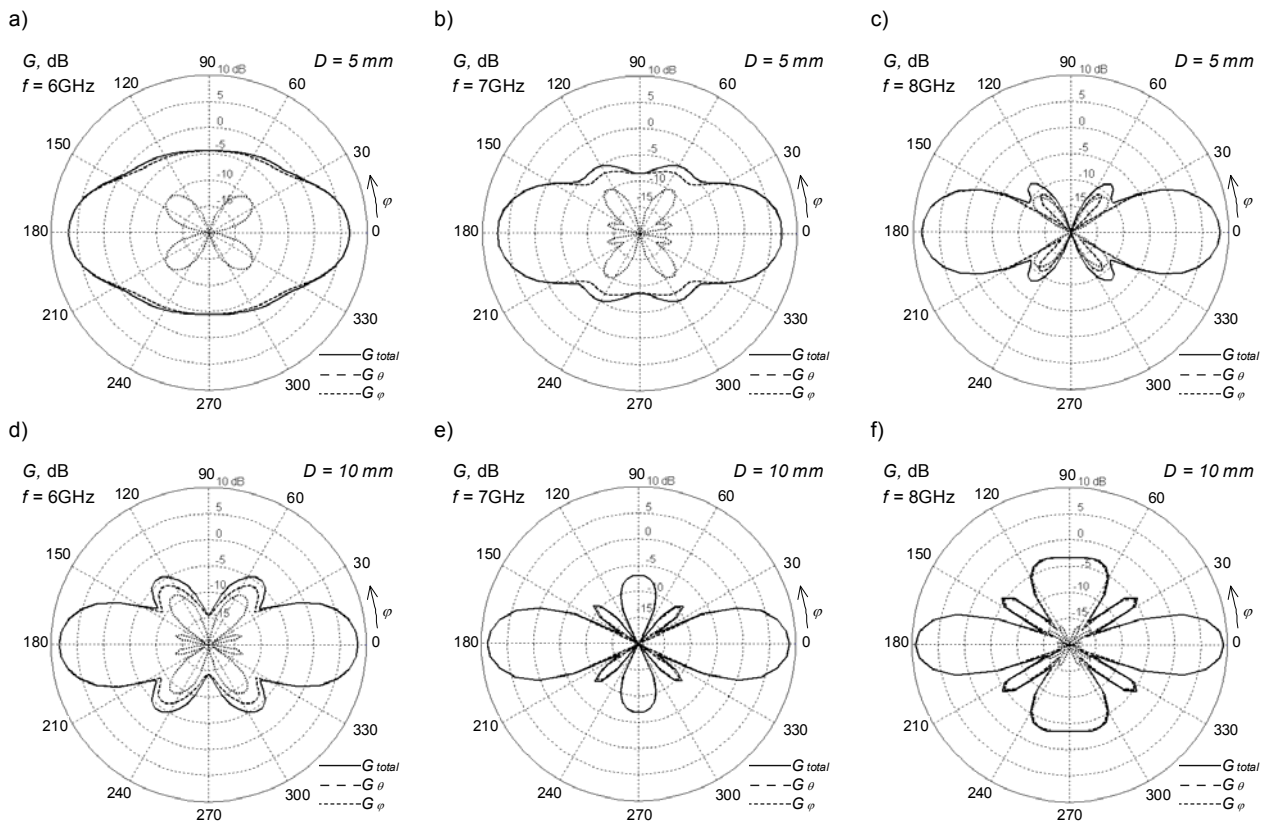
Na rysunku 6 zostały pokazane przekroje charakterystyk zysku energetycznego wyznaczone w płaszczyźnie poziomej $x-y$. Przekroje te wyznaczono dla trzech częstotliwości z pasma pracy anten UWB: 6, 7 i 8 GHz, pokazując jednocześnie udział obu ortogonalnych składowych G_θ i G_ϕ . We wszystkich pokazanych przypadkach poziom składowej G_ϕ jest znacznie niższy – wypadkowe charakterystyki G_{total} praktycznie pokrywają się ze składową G_θ .



Rys.4. Obliczone i zmierzone charakterystyki impedancji (a-c) i WFS (d-f) anten



Rys.5. Przestrzenne charakterystyki promieniowania anten (a, b) oraz charakterystyka zysku energetycznego dla kierunku prostopadłego do powierzchni anten (c)



Rys. 6. Przekroje poziome charakterystyk promieniowania szczyku antenowego dla $D = 5$ mm (a-c) i $D = 10$ mm (d-f)

Zauważalne jest zwiększenie wartości zysku energetycznego szczyku wraz ze wzrostem częstotliwości przy stałej odległości D i wraz ze wzrostem odległości D przy stałej częstotliwości. Dla przypadku $D = 5$ mm wartość zysku rośnie w paśmie pracy od 6,7 dB (przy 6 GHz) do 8,9 dB (przy 8,5 GHz). Dla odstępów między promiennikami $D = 10$ mm wartości te wynoszą odpowiednio 8,5 dB i 9,2 dB. Widoczne jest, że nadmierne zwiększanie odległości między promiennikami nie powoduje wyraźnego wzrostu wartości zysku. Powodem tego jest znaczne zwiększenie poziomu listków bocznych, szczególnie zauważalne w górnej części pasma pracy szczyku.

Podsumowanie

W artykule przedstawione zostały konstrukcje i parametry dwóch realizacji czteroelementowych szczyków UWB włącznie z prototypową anteną pojedynczą. Omawiane anteny charakteryzują się dobrym poziomem dopasowania. Aby pełniej poznać właściwości układów pod kątem zastosowań w systemach UWB wymagana jest dodatkowa analiza promieniowania sygnałów UWB, co może zostać przeprowadzone analogicznie do badań opisanych w [8,13,14].

Publikacja finansowana z pracy S/WE/1/2010, Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej.

LITERATURA

- [1] Allen B. et al, Ultra-Wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging, John Wiley & Sons, 2007
- [2] Matin M.A. (editor), Ultra Wideband Communications Novel Trends - Antennas and Propagation, Intech Open Access Publisher, 2011
- [3] Mehrpour B.H., Gholami R.; Zakeri B., Rostamian M., Linear Antenna Array Design for UWB Radar, IEEE Radar Conference 2013 (RADAR), Ottawa, Ontario, A4L-A.1
- [4] Tzanidis I., Sertel K., Volakis J.L., UWB Low-Profile Tightly Coupled Dipole Array With Integrated Balun and Edge

- Terminations, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61 (2013), n.6, 3017-3025
- [5] Sugitani T., Kubota S., Toya A., Xiao X., Kikkawa T., A Compact 4x4 Planar UWB Antenna Array for 3-D Breast Cancer Detection, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12 (2013), 733-736
- [6] Liao C.-H., Hsu P., Chang D.-Ch., Energy Patterns of UWB Antenna Arrays With Scan Capability, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59 (2011), n.4 1140-1147
- [7] Kasi B., Chakrabarty C. K., Ultra-Wideband Antenna Array Design for Target Detection, *Progress In Electromagnetics Research C*, 25 (2012), 67-79
- [8] Garbaruk M., Analysis of ultra-wideband linear antenna arrays, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr.8, 75-76
- [9] Garbaruk M., Czawka G., Structure and characteristics of two-element ultra-wideband antenna, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr.10b, 309-310
- [10] Czawka G., Garbaruk M., Nowakowski M., Matrix analysis of antenna array for MIMO UWB systems, *18th Intern. Conf. MIKON-2010*, Vilnius, June 14-16, 2010, 466-469
- [11] Garbaruk M., Design and experimental investigations of UWB microstrip and stripline antenna, *17th Intern. Conf. MIKON-2008*, Wrocław, May 19-21, 2008, 101-104
- [12] Garbaruk M., Czawka G., Matched planar two-element antenna for ultra-wideband radiocommunication systems, *17th Intern. Conf. MIKON-2008*, Wrocław, May 19-21, 2008, 177-180
- [13] Czawka G., Garbaruk M., EMD analysis and experimental investigations of planar UWB radiocommunication antennas, *XVIII Intern. Conf. EMD 2008*, Vilnius, Sept 25-26, 2008, 89-94
- [14] Garbaruk M., Analiza komputerowa ultraszerokopasmowych liniowych układów antenowych, *Przegląd Telekomunikacyjny – Wiadomości Telekom.*, (2011), nr.06, 604-607 (KKRRIT'2011)

Autor: dr inż. Marek Garbaruk, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: mgarbaruk@pb.edu.pl.