

doi:10.15199/48.2024.09.44

## Wielozakresowe anteny mikropaskowe dla systemu 5G

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zaprojektowane anteny mikropaskowe dla systemu 5G pracujące odpowiednio w pasmach 2,4 GHz i 5,8 GHz oraz 26-28 GHz i 38-42 GHz. Zaprezentowano i omówiono otrzymane charakterystyki promieniowania anten w systemie 3D oraz jej dopasowanie.

**Abstract.** The work presents designed microstrip antennas for the 5G system operating in the 2.4 GHz and 5.8 GHz and 26-28 GHz and 38-42 GHz bands, respectively. The obtained radiation characteristics of the antennas in the 3D system and their adjustment are presented and discussed. (**Multi-band microstrip antennas for 5G**)

**Słowa kluczowe:** anteny, anteny mikropaskowa, system 5G, anteny wieloczęstotliwościowe.

**Keywords:** antennas, microstrip antennas, 5G system, multi-frequency antennas.

### Wstęp

W przeciągu kilkadziesiąt ostatnich lat komunikacja bezprzewodowa bardzo się rozwinęła. W obecnej chwili, ciężko byłoby wyobrazić sobie życie, w którym istniałaby tylko i wyłącznie transmisja przewodowa. Cały czas prowadzone są badania nad nowymi rozwiązaniami technologicznymi przez producentów sprzętu elektronicznego. Osób korzystających z bezprzewodowej transmisji danych wciąż przybywa. Wzrost liczby ludności na świecie spowodował to, że trzeba było zwiększyć również prędkość transmisji. Prędkość transmisji, która była 20 lat temu nie sprostałaby wymaganiom stawianym w obecnej chwili.

Technologia 5G jest odpowiedzią na wymagania, które użytkownicy transmisji bezprzewodowej stawiają producentom sprzętu elektronicznego. Jest to sieć piątej generacji. Powstała ona w celu zwiększenia efektywności transmisji bezprzewodowej w systemach sieci komórkowej, jak i komunikowania się między pojazdami a infrastrukturą. 5G jest siecią komórkową piątej generacji, która umożliwia nowy rodzaj sieci i została zaprojektowana w celu stworzenia nowych systemów radiokomunikacyjnych. W systemach tych istnieje możliwość połączenia wszystkiego i wszystkich razem. Od tej pory 5G jest utożsamiane zarówno z systemami sieci komórkowej jak i bezprzewodowymi sieciami sensorycznymi, lokalnymi oraz komunikacją pomiędzy infrastrukturą i pojazdami. Zaliczyć do tego można również komunikację pomiędzy urządzeniami (machine-to-machine) i systemami łączności satelitarnej. Jednym z celów kolejnej generacji jest m.in. zwiększenie jej efektywności w porównaniu do poprzednich systemów. Możemy wymienić wiele korzyści przez wprowadzenie sieci piątej generacji:[1, 2]

- 20 Gb/s to szybkość transmisji w łączu w dół oraz 10 Gb/s w łączu w górę w momencie wykorzystania pasma EHF (Extremely High Frequency)
- dziesiątki Mb/s to szybkość transmisji odpowiadająca na dziesiątki tysięcy użytkowników
- 1 Gb/s to szybkość transmisji przypadająca na każdego pracownika w tym samym piętrze biura
- pojemność sieci jest do 10,000 razy większa niż obecnie
- wzrost wolumenu danych które przypadają na konkretny obszar geograficzny jest nawet do 1000 razy większa
- wydajność widmowa jest znacznie zwiększona do poprzedniej generacji
- w porównaniu do LTE czas opóźnienia są znacznie mniejsze

W ukształtowaniu piątej generacji definiuje się trzy podstawowe scenariusze użycia:

- masowa komunikacja między maszynami zwanej inaczej IoT (Internet of Things),
- URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications) – uwzględnia sterowanie urządzeniami w rzeczywistym czasie, dobra komunikację między pojazdami oraz robotykę przemysłową.
- eMBB (enhanced Mobile Broad Band) – daje gwarancje na zdecydowanie większą prędkość transmisji danych oraz jej większą pojemność, co przyczynia się do utrzymania całego świata w kontakcie.

Sieć 5G powoła do życia wiele niezbędnych technik i rozwiązań, które to gwarantują przekroczenie nieprzystępnych dotychczas barier w już istniejących komórkowych i mobilnych sieciach. Należy spełnić kilka podstawowych wymogów do zrealizowania założeń związanych z 5G. Jednym z nich jest zastosowanie światłowodów w obszarach objętych terenami wiejskimi, podmiejskimi oraz centrum miast. Piko-komórki posiadające zasięg kilkadziesiąt metrów zostaną wykorzystane jako dostępne w przestrzeni publicznej punkty lokalne. Technologia 5G jest wciąż na etapie rozwoju, a gdy nastąpi zwiększenie liczby nadajników pracujących na wyższych częstotliwościach, prędkość przesyłu danych ulegnie znacznemu zwiększeniu. Uruchomienie sieci 5G postawiło inżynierom nowe wymagania na anteny w urządzeniach mobilnych. Kraje takie jak: Austria, Dania, Finlandia, Francja i wiele innych uruchomiło sieć w zakresie 3-4 GHz. Planowane są zakresy 26-28 GHz i 38-42 GHz. Przyszłe wdrożenia 5G będą mogły wykorzystywać fale milimetrowe w pasmach do 86 GHz. Ogólna dostępność usług 5G planowana jest na rok 2025. ETSI TS 138 101-2 [3]. W tym układzie antena stała się jednym z najtrudniejszych wyzwań przy projektowaniu systemów komunikacji bezprzewodowej w urządzeniach przenośnych [4].

### Projektowanie anten mikropaskowych do systemu 5G

Obecnie jedną z najbardziej innowacyjnych dziedzin technologii antenowej jest dziedzina anten mikropaskowych [13, 18]. Technologia anten mikropaskowych umożliwia zaprojektowanie anteny o mniejszych gabarytach przy niższych kosztach i lepszych parametrach użytkowych zarówno na poziomie anteny, jak i systemu [5, 6]. Anteny mikropaskowe mają wiele interesujących funkcji, takich jak:

- dokładne odwzorowanie na powierzchni,
- niski koszt produkcji,
- wysoka powtarzalność wykonania,
- niewielka objętość,
- maskowanie częstotliwości roboczej,

- prostota produkcji, pod warunkiem zastosowania stosunkowo zaawansowanych technologii,
- płaski kształt i niewielka waga pozwalają na stosowanie anten na bazie dielektrycznej na obiektach szybko lecących bez obawy o pogorszenie ich właściwości aerodynamicznych.

Zastosowane podłoże dielektryczne sprzyja jednak wzbudzeniu fal powierzchniowych, które rozchodząc się w płaszczyźnie dielektrycznej zakłócają normalną pracę anteny [8]. Inne wady anten mikropaskowych to:

- wąskie pasmo,
- ograniczone obciążenie mocy.

Historycznie ukształtowane metody analizy takich układów można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- metody, w których a priori zakłada się określoną postać funkcji opisujących rozkłady prądu wzdłuż przewodów,
- metody sprowadzające się do poszukiwania rozkładów prądu (w sposób bezpośredni lub pośredni)

Do pierwszej grupy należą: metoda SEM indukowanych i metoda wektora Poytinga. Prowadzą one do identycznych wyników końcowych i dlatego mogą być uważane za dwa warianty tak zwanej metody asymptotycznej.

W metodach tworzących drugą grupę można wyróżnić trzy zasadniczo odmienne podejście do problemu :

- teorię rezonansową
- teorię modów propagacyjnych
- metodę równań całkowych

Anteny mikropaskowe są szeroko stosowane w różnych zastosowaniach, takich jak komunikacja mobilna, radary i globalne systemy nawigacji satelitarnej, biorąc pod uwagę ich zalety: lekkość, niski profil i niski koszt [7, 8]. Te anteny składają się z radiatora wydrukowanego na cienkim podłożu, kołka zasilającego i uziemienia, dlatego zazwyczaj mają one charakterystykę wąskiego pasma [9, 10]. Dlatego też zwiększenie przepustowości anten mikropaskowych było głównym problemem i stanowi bardzo ambitny cel, który należy osiągnąć, aby można było je wykorzystywać w różnych zastosowaniach. Metody poprawy szerokości pasma anteny mikropaskowych obejmują optymalizację kształtu promiennika lub optymalizację materiału podłoża w [7, 8]. Zmniejszając przenikalność elektryczną podłoża, można skutecznie zmniejszyć współczynnik jakości systemu i zwiększyć szerokość pasma [11].

Wiele parametrów wpływa na cechy anten mikropaskowych. Jednymi z najistotniejszych są długość ( $L$ ) oraz szerokość promiennika ( $W$ ). Ich wartości zostały wyznaczone na podstawie następujących zależności korzystając z modelu linii transmisyjnej [12]:

$$(1) \quad L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{re}}} - 2\Delta L$$

$$(2) \quad W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}$$

$\epsilon_{re}$  - efektywna stała dielektryczna

$$(3) \quad \epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2}$$

Od szerokości promiennika zależy szerokość pasma pracy i impedancja wejściowa, a zwiększanie tej szerokości powoduje wzrost sprawności promieniowania i wzrost mocy wypromieniowanej. Natomiast częstotliwość rezonansowa anteny zależy od długości promiennika. Po dokonaniu obliczeń przyjęto, stosunek szerokości do długości wynosi  $W/L \approx 1,31$ . Jest to wartość mieszcząca się w założeniach, że stosunek ten powinien być zgodny z zależnością  $1 \leq W/L \leq 2$ .

Kolejnym parametrem anteny jest wartość przedłużenia promiennika  $\Delta L$ , zależącym od wartości efektywnej stałej

dielektrycznej, wysokości laminatu, długości promiennika i jego szerokości. Parametr  $\Delta L$  powiązany jest z występującymi na końcach promiennika polami rozproszenia. Został wyznaczony z zależności:

$$(4) \quad \Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{re} + 0,300)(W/h + 0,264)}{(\epsilon_{re} - 0,258)(W/h + 0,813)}$$

Impedancja wejściowa anteny została ustalona na wartość  $Z=50\Omega$ . Jest to wartość zależna od odległości krawędzi anteny do krawędzi promiennika. Wartość ta wzrasta wraz ze zmniejszaniem tej odległości. Następnie wyznaczona została wejściowa rezystancja promiennika:

$$(5) \quad R_{in} = \frac{1}{G_{10}}$$

Parametr  $G_{10}$  to konduktancja, reprezentująca zjawisko promieniowania, straty w dielektryku oraz straty w elemencie promieniującym i ekranie. Dzięki wartościom wyliczonym z powyższych wzorów, możliwe było wyznaczenie szerokości szczeliny (wycięcia), długości oraz szerokości linii zasilającej, która jest przyłączona do promiennika. Wartość długości wycięcia została wyznaczona następująco:

$$(6) \quad 50 = R_{in} \cos^2 \left( \frac{\pi}{L} y_0 \right)$$

Do określenia szerokości linii zasilającej  $W_r$ , wykorzystana została zależność (7) - z czego zmienna  $a$  została wprowadzona jako zmienna pomocnicza, niezbędna do wyznaczenia szerokości. W przypadku, gdy wartość parametru  $a$  jest większa niż 1,52 to szerokość obliczana jest z równania (8).

$$(7) \quad a = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} (0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r})$$

$$(8) \quad Wf = \frac{8e^a}{e^{2a} - 2} h$$

Aby usprawnić wykonywanie obliczeń dla parametrów anteny mikropaskowej, został opracowany program w środowisku Matlab R2016b. Kod źródłowy tego programu zamieszczono poniżej:

```
clear all
disp('Projektowanie anteny mikropaskowej');
disp('Podaj odpowiednie parametry:');
er = input('przenikalność dielektryczną = ');
h = input('grubość dielektryka [mm] = ');
f = input('częstotliwość [GHz] = ');
z = input('impedancja wejściowa [ohm] = ');
disp('Obliczam parametry, proszę czekać...');
f = f*1e9;
%obliczanie długości
wid = (3e8/(sqrt((er+1)/2)*2*f))*1000; %w mm
%obliczanie przenikalności elektrycznej
e_eff = ((er+1)/2)+(((er-1)/2)*(1+((12*h)/wid))^0.5);
%obliczanie wartości przedłużenia promiennika L
del_l = (((e_eff+0.3)*((wid/h)+0.264))/((e_eff-0.258)*((wid/h)+0.8)))*(0.412*h); %w mm
%obliczanie długości efektywnej
l_eff = (3e8/(2*f*sqrt(e_eff)))*1000;
%obliczanie aktualnej długości
L = l_eff-(2*del_l);
la = (3e8/f)*1000;
k = (2*pi)/la;
x = k*(wid);
il = -2+cos(x)+(x*sinint(x))+(sin(x)/x);
g1 = il/(120*pi*pi); %konduktancja
a =
@(th) (((sin((x./2).*cos(th))./cos(th)).^2).*(bess
elj(0,(k.*L.*sin(th))).*(sin(th)).^3);
a1 = integral(a,0,pi);
g12 = a1/(120*pi*pi); %w siemensach
r_in = 1/(2*(g1+g12)); %w ohmach
inset = (L/pi)*(acos(sqrt(z/r_in))); %w mm
Lg_min = 6*h+L;
Wg_min = 6*h+wid;
B = 60*pi*pi/(z*sqrt(er));
m1 = 2*B-1;
```

```

m = log(m1);
n1 = B-1;
n = log(n1);
W = (2*h/pi) * (B-1-m+((er-1)/(2*er)) * (n+(0.39*0.61)/er));
g = (3e8*4.65e-9) / (sqrt(2*e_eff)*f*10^-9)
disp('Parametry anteny:')
disp(['Szerokość promiennika (Wp):', num2str(wid), 'mm'])
disp(['Długość promiennika (Lp):', num2str(L), 'mm'])
disp(['Szerokość linii zasilającej (Wf):', num2str(W), 'mm'])
disp(['Głębokość szczeliny (Fi):', num2str(inset), 'mm'])
disp(['Szerokość szczeliny (Gpf):', num2str(g), 'mm'])
disp(['Minimalna długość ekranu (Lg):', num2str(Lg_min), 'mm'])
disp(['Minimalna szerokość ekranu (Wg):', num2str(Wg_min), 'mm'])

```

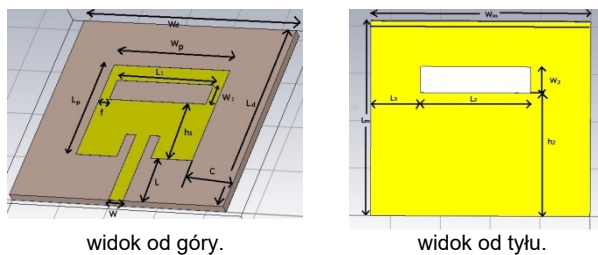
### Antena WiFi pasmo 2,4 GHz i 5,8 GHz

Analiza wykonanych modeli zostały wykonane w programie CST Microwave Studio, oprogramowanie to pozwala na przeprowadzenie specjalistycznej symulacji z zakresu 3D EM dla wysokich częstotliwości. Program posiada dużą wydajność, pozwala ono na dokładną i szybką analizę w zakresie wysokiej częstotliwości dla anten, o jedno- lub wielowarstwowych strukturach. Jest to oprogramowanie oparte o metodę FDTD.

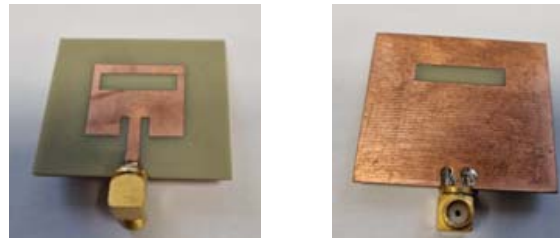
Jako dielektryk wybrany został laminat FR-4 o wymiarach 46x40x1,6 mm posiadający przenikalnością elektryczną o wartości  $\epsilon_r = 4,3$  oraz  $\text{tg}\delta = 0,025$ . Zarówno płaszczyzna masy jak i promiennik w kształcie prostokątnym będą wykonane z miedzi. Zaprojektowana antena jest zasilana linią mikropaskową i będzie pracować w dwóch zakresach częstotliwości 2,4 GHz i 5 GHz. Aby udało się to osiągnąć należało wykonać otwór zarówno w promienniku jak i masie (Rys. 1, i 2), dzięki czemu antena została dopasowana odpowiednio do pożądanego pasma częstotliwości. W tabeli przedstawione zostały najważniejsze wymiary anteny.

Tabela 1 Wymiary zaprojektowanej anteny

Oznaczenie	Wymiar r [mm]	Oznaczenie	Wymiar [mm]
$W_d$	46	C	11
$L_d$	40	$h_1$	13
$h_d$	1,6	$h_1$	26
$W_p$	24	$h_m$	0,035
$L_p$	21	$W_m$	46
W	3	$L_m$	40
L	10	$L_2$	23
$W_1$	5,2	$L_3$	11
$L_1$	20	$W_2$	5



Rys. 1. Projekt anteny WiFi pasmo 2,4 GHz i 5,8 GHz

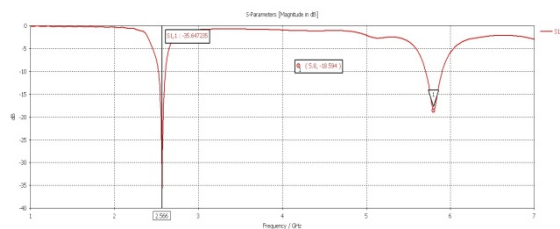


widok od góry.

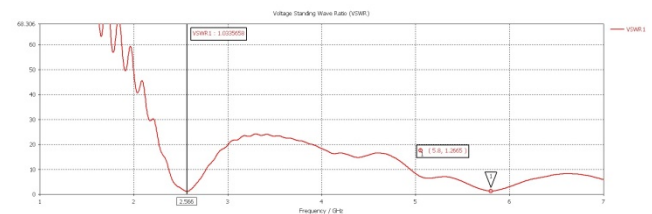
widok od tyłu.

Rys. 2. Realizacja fizyczna anteny WiFi pasmo 2,4 GHz i 5,8 GHz

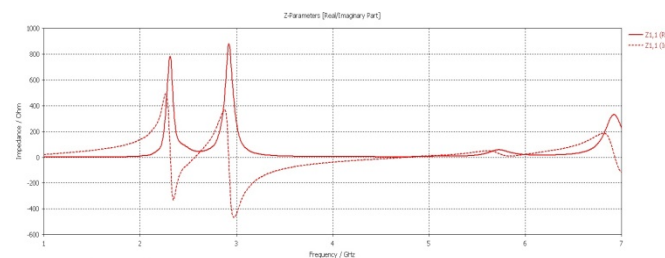
Wielkością która świadczy o dopasowaniu do linii zasilającej jest współczynnik fali stojącej WFS jest zależny od stosunku impedancji obciążenia względem impedancji falowej. Drugą wielkością charakteryzującą antenę jest współczynnik odbicia, określa on, ile mocy, która została doprowadzona do anteny zostało odbite, a ile wypromieniowana Dla powszechnie stosowanych anten wartość współczynnika powinna wynosić mniej niż -10 dB, dla wartości poniżej określa się pasmo pracy anteny. Otrzymane wielkości zostały przedstawione na rys. 3. Na rysunku 4 przedstawiono przebieg współczynnika WFS, a na rysunku 5 przebieg impedancji rzeczywistej i urojonej zaprojektowanej anteny w funkcji częstotliwości.



Rys.3. Współczynnik  $S_{11}$



Rys.4. Współczynnik fali WFS

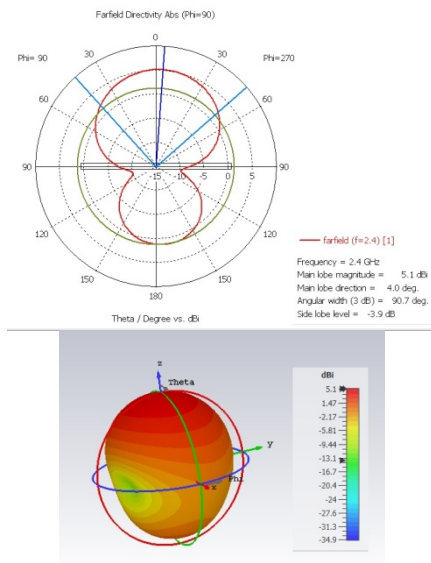


Rys.5. Impedancja rzeczywista i urojona

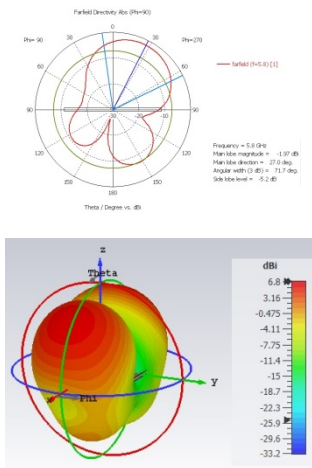
### Charakterystyki promieniowania zaprojektowanej anteny WiFi

Na powyższych rysunkach przedstawione zostały charakterystyki promieniowania anteny. Na rysunku 6. widzimy, że na częstotliwości 2,4 GHz kierunek listka głównego to  $18^\circ$ , a jego szerokość wynosi  $90,7^\circ$ . Niepożądanym zjawiskiem jest listek wsteczny i wynosi on 3,9 dB. Natomiast na częstotliwości 5,8 GHz kierunek listka głównego to  $27^\circ$ , a jego szerokość wynosi  $110,0^\circ$ .

Natomiast listek boczny jest na kierunku  $150,0^\circ$  wynosi on  $5,2$  dB. Zysk kierunkowy dla częstotliwości  $5,8$  GHz w projektowanej antenie wynosi  $6,8$  dBi.



Rys. 6. Charakterystyka 3D dla 2.4 GHz

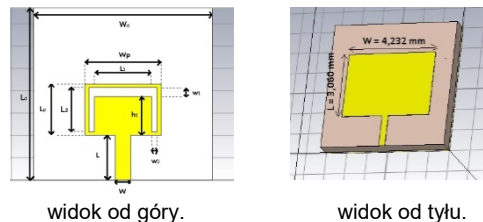


Rys. 7. Charakterystyka 3D dla 5.8 GHz

### Pomiary wykonanego modelu na pasma 28 GHz i 40 GHz

Na wymienione w tym podrozdziale pasma częstotliwości została zaprojektowana druga antena przedstawiona na rysunku 8. Optymalizacja parametrów, analizę projektu oraz pomiary dokonane zostały w programie CST STUDIO SUITE. W wyniku symulacji otrzymane zostały wartości impedancji wejściowej, współczynnik macierzy S11, współczynnik fali stojącej oraz charakterystyki promieniowania we współrzędnych biegunowych oraz w modelu 3D. Jako dielektryk został wybrany laminat FR-4 o wymiarach  $8 \times 8 \times 0,8$  mm ze względną przenikalnością elektryczną o wartości 4,4 oraz  $\text{tg}\delta=0,02$ . Zarówno płaszczyzna masy jak i promiennik w kształcie prostokątnym będą wykonane z miedzi o grubości  $0,035\text{mm}$ . Zaprojektowana antena jest zasilana linią mikropaskową i będzie pracować w dwóch zakresach częstotliwości ( $28$  GHz i  $40$  GHz). Aby udało się to osiągnąć należało wykonać otwór w promienniku, w kształcie odwróconej litery U rysunek. 8, dzięki czemu dopasowano częstotliwości odpowiednio do pożądanego pasma. W

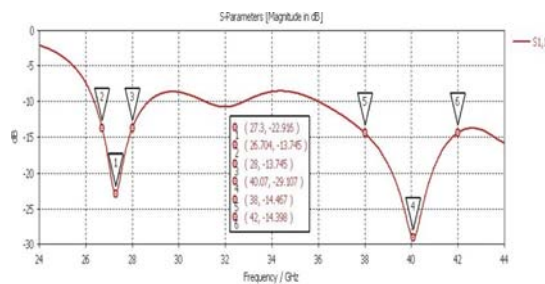
tabeli 2 przedstawione zostały najważniejsze wymiary anteny.



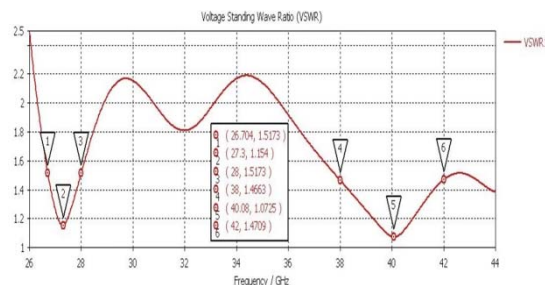
Rys. 8. Antena na pasma 28 GHz i 40 GHz

Tabela 2 Wymiary projektowanej anteny

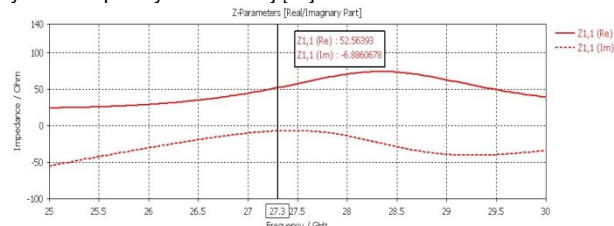
Oznaczenie	Wymiar [mm]	Oznaczenie	Wymiar [mm]
$W_d$	8	L	2
$L_d$	8	$W_1$	0,42
$h_d$	0,8	$L_1$	2,6
$W_p$	3,4	$h_1$	1,73
$L_p$	2,3	$L_2$	2
W	0,7	$W_2$	0,25



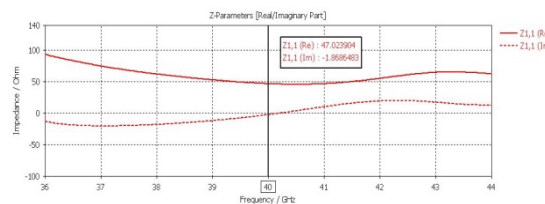
Rys. 9. Współczynnik odbicia S11



Rys. 10. Współczynnik fali stojącej VSWR

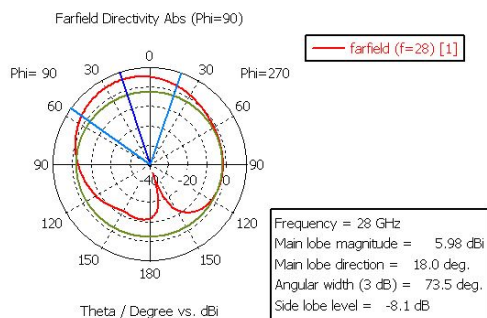


Rys. 11 Część rzeczywista i urojona impedancji zaprojektowanej anteny w pierwszym pasmie.

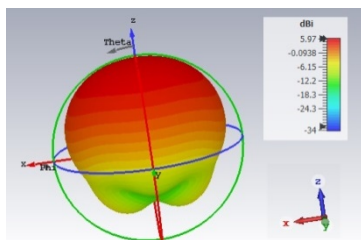


Rys. 12 Część rzeczywista i urojona impedancji zaprojektowanej anteny w pierwszym pasmie.

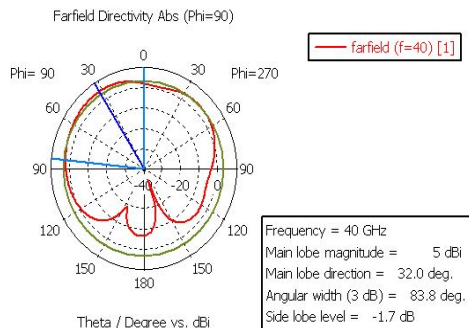
Na poniższych rysunkach przedstawione zostały charakterystyki promieniowania anteny. Na rysunku 13 widzimy, że kierunek listka głównego to  $18^\circ$ , a jego szerokość wynosi  $73,5^\circ$ . Niepożądanym zjawiskiem są listki boczne i wynosi on  $8,1$  dB. Zysk kierunkowy dla częstotliwości  $28$  GHz w projektowanej antenie wynosi  $8,1$  dBi.



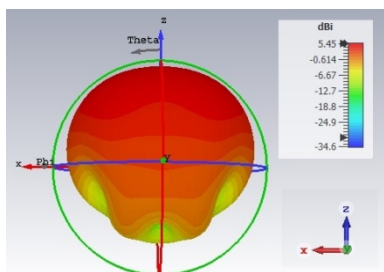
Rys. 13 Charakterystyka kierunkowa promieniowania zaprojektowanej anteny dla  $f=28$  GHz.



Rys. 14 Charakterystyka kierunkowa promieniowania zaprojektowanej anteny w 3D dla  $f=28$  GHz.



Rys. 15 Charakterystyka kierunkowa promieniowania zaprojektowanej anteny dla  $f=40$  GHz.



Rys. 16 Charakterystyka kierunkowa promieniowania zaprojektowanej anteny w 3D dla  $f=40$  GHz.

Na rysunkach Rys. 15 oraz Rys. 16 przedstawione zostały charakterystyki kierunkowe promieniowania zaprojektowanej anteny dla częstotliwości  $40$  GHz.

## Wnioski

W artykule przedstawiono anteny na pasma WiFi które może pracować odpowiednio w pasmach  $2,4$  GHz i  $5,8$  GHz oraz  $28$  GHz i  $40$  GHz.

Zakładana wartość współczynnika fali nie przekracza w całym paśmie wartości  $2$ . Antena w paśmie  $2,4$  GHz i  $5,8$  GHz cechuje się zyskiem wynoszącym powyżej  $5$  dBi, przedstawione charakterystyki pokazują, że dla większości przypadków wartość zysku wynosi powyżej  $5,97$  dBi, najniższą zaobserwowaną wartością zysku była wartość  $5,19$  dBi uzyskana dla częstotliwości  $5$  GHz. Anteny posiadają dużą wartość kąta połowy mocy, co oznacza, że charakterystyka promieniowania pokryje duży obszar

Zaprojektowane anteny spełniają odpowiednio standard IEEE 80211n oraz ETSI TS 138 101-2 V15.2.0

Praca została sfinansowana w ramach UGB WAT nr 750.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Marian Wnuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Łączności, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908, Warszawa, E-mail: marian.wnuk@wat.edu.pl; mgr inż. Rafał Szczepankiewicz E-mail: rafal.szczepankiewicz@wat.edu.pl; , adres jw.,

## LITERATURA

- [1] Imai, T.; Imai, T.; Kitao, K.; Tran, N.; Omaki, N.; Okumura, Y.; Sasaki, M.; Yamada, W. Development of high frequency band over 6 GHz for 5G mobile communication systems. In Proceedings of the 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, Portugal, 13–17 April 2015; pp. 1–4.
- [2] Benisha, M.; Prabu, R.; Bai, V. Requirements and challenges of 5G cellular systems. In Proceedings of the 2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), Chennai, India, 26–28 February 2016; pp. 251–254.
- [3] User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone (3GPP TS 38.101-2 version 15.2.0 Release 15)
- [4] Ganie, J.A.; Singh, C.; Jha, K.R.; Sharma, S.K. A LTE Band Integrated 5G Antenna Design using Characteristic Mode Analysis. In Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Atlanta, GA, USA, 8–12 July 2019; pp. 413–414.
- [5] Wnuk M. "Szerokopasmowa sonda pola elektromagnetycznego Przegląd Elektrotechniczny 2021 R. 90, nr 10 str. 140 – 143
- [6] Yang, R.; Xi, S.; Cai, Q.; Chen, Z.; Wang, X.; Liu, G. A Compact Planar Dual-Band Multiple-Input and Multiple-Output Antenna with High Isolation for 5G and 4G Applications. Micromachines 2021, 12, 544.
- [7] Park, J.; Kim, J.; Choi, J.; Choi, D.; Hong, W. Concept of Integrating 4G LTE and Millimeter-wave 5G Antennas within Zero-Bezel Cellular Devices. In Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, QC, Canada, 5–10 July 2020; pp. 1675–1676.
- [8] Zou, Y.; Pan, J. Broadband and High-gain Antenna based on Novel Frequency Selective Surfaces for 5G Application. In Proceedings of the 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chengdu, China, 20–22 December 2019; pp. 2488–2491.
- [9] Singh, K.J.; Mishra, R. A Circular Microstrip Patch Antenna with Dual Band Notch Characteristics for UWB Applications. In Proceedings of the International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), Greater Noida, India, 13–14 April 2018; pp. 153–156
- [10] Arya, A.K.; Kim, S.J.; Kim, S. A dual-band antenna for LTE-R and 5G lower frequency operations. Prog. Electromagn. Res. Lett. 2020, 88, 113–119.
- [11] Roh, W.; Seol, J.-Y.; Park, J.; Lee, B.; Lee, J.; Kim, Y.; Cho, J.; Cheun, K.; Aryanfar, F. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results. IEEE Commun. Mag. 2014, 52, 106–113
- [12] Wnuk M. "Multilayer dielectric periodic antenna structure in a cascade view" Appl. Sci. 2022, Volume 12, Issue 9, pp.1-14