POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI

Imię i nazwisko studenta: Rafał Baranowski
Nr albumu: 172077
Studia pierwszego stopnia
Forma studiów: stacjonarne
Kierunek studiów: Elektronika i telekomunikacja
Profil: Inżynieria mikrofalowa i antenowa

PROJEKT DYPLOMOWY INŻYNIERSKI

Tytuł projektu w języku polskim: Miniaturowa antena rekonfigurowana

Tytuł projektu w języku angielskim: Miniature reconfigurable antenna

Potwierdzenie przyjęcia projektu	
Opiekun projektu *podpis*	Kierownik Katedry/Zakładu (pozostawić właściwe) *podpis*
dr inż. Łukasz Kulas	

Data oddania projektu do dziekanatu:

POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI

OŚWIADCZENIE dotyczące projektu dyplomowego zatytułowanego: Miniaturowa antena rekonfigurowana

Imię i nazwisko studenta: Rafał Baranowski
Data i miejsce urodzenia: 17.12.1997, Lębork
Nr albumu: 172077

Wydział: Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Kierunek: elektronika i telekomunikacja

Poziom kształcenia: pierwszy
Forma studiów: stacjonarne

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 luteg 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. 2018 poz. 1191 z późn. zm i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.),[1] a także odpowiedzialnoś cywilnoprawnej oświadczam, że przedkładany projekt dyplomowy został opracowany przez mnie samodzielnie.

Niniejszy projekt dyplomowy nie był wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedu związanej z nadaniem tytułu zawodowego.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. projekcie dyplomowym, uzyskane ze źródeł pisanych elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikan zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji projektu dyplomowego z załączoną wersją elektroniczn

Gdańsk, dnia ....
podpis studenta

[1] Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce:

Art. 312. ust. 3. W przypadku podejrzenia popełnienia przez studenta czynu, o którym mowa w art. 287 ust. 2 pkt 1–5, rektor niezwłocznie poleca przeprowadzenie postępowania wyjaśniającego.

Art. 312. ust. 4. Jeżeli w wyniku postępowania wyjaśniającego zebrany materiał potwierdza popełnienie czynu, o którym mowa w ust. 5, rektor wstrzymuje postępowanie o nadanie tytułu zawodowego do czasu wydania orzeczenia przez komisję dyscyplinarną oraz składa zawiadomienie o podejrzeniu popełnienia przestępstwa.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Aggregate FARming in the CLOUD

Research leading to these results has received funding from the EU ECSEL Joint Undertaking under grant agreement no. 783221 (project AFarCloud) and from the National Centre for Research and Development on behalf of the Ministry of Science and Higher Education in Poland.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

STRESZCZENIE

Niniejsza praca dotyczy projektu miniaturowej, nisko profilowej anteny rekonfigurowalnej opartej o źródło Huygensa na częstotliwość f_0 = 2.45 GHz. Zaprojektowane zostały dwa planarne źródła Huygensa, które pobudzane są z specjalnie zaprojektowanego rekonfigurowalnego układu sterującego. Dzięki dwóm diodą PIN układ może realizować dwie kardioidalne charakterystyki promieniowania o przeciwnych zwrotach oraz jedną dookólną. Sygnał wysokiej częstotliwości doprowadzany jest do układu za pomocą kabla koncentrycznego.

Słowa kluczowe: antena rekonfigurowalna, miniaturowa antena, źródło Huygensa, rezonatory bliskiego pola.

Dziedzina nauki i techniki, zgodnie z wymogami OECD: Nauki inżynierskie i techniczne, Elektrotechnika i elektronika, Telekomunikacja

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

ABSTRACT

This work concerns the design of a miniature, low-profile reconfigurable antenna based on Huygens metamaterial sources for frequency f_0 = 2.45 GHz. Two planar Huygens sources were designed consisting of near-field resonators. Sources are excited from a specially designed reconfigurable control system. Thanks to the two PIN diodes, the system can realize two cardioid radiation characteristics with opposite turns and one bi-directional characteristic. The high frequency signal is fed to the system via a coaxial cable.

Keywords: recofigurable anenna, miniature antenna, Huygens source, near field resonant parastitic

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW ... 8
1. WSTĘP I CEL PRACY ... 9
1.1. Wprowadzenie ... 9
1.2. Cel pracy ... 10
2. ANTENY Z REKONFIGUROWALNĄ CHARAKTERYSTYKĄ PROMIENIOWANIA ... 11
2.1. Podstawowe typy anten rekonfigurowalnych ... 11
2.1.1. Anteny o zmiennej częstotliwości pracy ... 11
2.1.2. Anteny o zmiennej szerokości pasma ... 12
2.1.3. Anteny o zmiennej charakterystyce promieniowania ... 12
2.1.4. Anteny o zmiennej polaryzacji ... 12
2.1.5. Anteny o zmieniającej się większej liczbie parametrów ... 13
2.2. Antena ESPAR – przykład anteny o zmiennej charakterystyce promieniowania ... 13
2.3. Najważniejsze parametry anten o rekonfigurowalnej charakterystyce ... 14
2.3.1. Charakterystyka promieniowania ... 14
2.3.2. Impedancja wejściowa ... 14
2.3.3. Zysk energetyczny ... 15
2.3.4. Współczynnik wiązki głównej do wiązki wstecznej ... 15
2.3.5. Względny elektryczny rozmiar anteny ... 15
2.3.6. Kierunkowość ... 16
3. ŹRÓDŁO HUYGENSA ... 17
3.1. Zasada działania ... 17
3.2. Dipole elektryczne i magnetyczne ... 18
3.3. Przykładowy projekt miniaturowego źródła Huygensa ... 20
4. MINIATUROWA ANTENA REKONFIGURROWALNA OPARTA O ŹRÓDŁA HUYGENSA ... 22
4.1. Wprowadzenie i wyjaśnienie koncepcji ... 22
4.2. Środowisko Altair FEKO ... 23
4.3. Proces projektowania ... 23
4.3.1. Proces pojedynczego źródła Huygensa ... 23
4.3.2. Projekt układu sterującego ... 24
4.3.3. Dopasowywanie i wpływ poszczególnych wymiarów na wyniki ... 25

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

4.4. Finalny projekt anteny 28
4.4.1. Końcowy model anteny 28
4.4.2. Przedstawienie wyników symulacji....29
5. PODSUMOWANIE 34
WYKAZ LITERATURY 35
WYKAZ RYSUNKÓW 36
WYKAZ TABEL 37

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

f	–	częstotliwość [Hz]
IoT	–	Internet of Things
ESA	–	Electrically Small Antenna
EAD	–	Egyptian Axe Dipole
CLL	–	Capacitively Loaded Loop

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

1. WSTĘP I CEL PRACY

1.1. Wprowadzenie

Urządzenia komunikacji bezprzewodowej mają ogromny wpływ na nasze życie. Obecnie używamy ich nie tylko po to, by mieć dostęp do telefonii, czy internetu. Znajdują one zastosowanie również w inteligentnych budynkach, różnego rodzaju systemach pomiarowych, w przemyśle, czy też w systemach monitorowania środowiska, a także naszego zdrowia. Z tego też względu oczekujemy, aby nie tylko mieć dostęp do internetu, ale także aby otaczające nas przedmioty mogły zbierać i przetwarzać dane. Koncepcję tą nazywamy Internetem Rzeczy (ang. Internet of Things – IoT).

Pojawienie się popytu na Internet Rzeczy zdeterminowało rozwój nowej klasy systemów komunikacji bezprzewodowej. Systemy te mają być opłacalne, inteligentne, gwarantować możliwie wysoką transmisję danych oraz jak najmniejszy poziom zużycia energii, a do tego łączyć możliwie wiele funkcjonalności, a także być lekkie i mieć kompaktowe rozmiary. Nieodłączną częścią takiego systemu, bez którego komunikacja nie mogłaby zaistnieć, jest antena. Niestety standardowe, powszechnie stosowane anteny nie mogą zostać użyte w systemach IoT, głównie ze względu na swoje duże rozmiary (to znaczy porównywalne do długości fali, na jakiej antena pracuje). Dlatego też elektrycznie małe anteny (ang. Electrically small antennas – ESAs), ze względu na swój stosunkowo niewielki rozmiar, są pożądane w wielu aplikacjach Internetu Rzeczy. W konsekwencji w ostatnich kilkunastu latach zrealizowano wiele różnych projektów ESA, dedykowanych do konkretnych aplikacji IoT. Spełniają one rozmaite standardy, mają różną konfigurację mechaniczną i zasadę działania oraz realizują wymagania dotyczące charakterystyki promieniowania.

Niestety w niektórych zastosowaniach, jak np. w systemach mobilnych, miniaturowych sensorach, czy komunikacji między samochodami (ang. vehicle to vehicle – V2V) wymaga się od anteny możliwości zmiany charakterystyki promieniowania. Można w tym celu zastosować szyk antenowy, jednak jest to dość drogie i skomplikowane rozwiązanie. Kolejnym podejściem jest zastosowanie kilku niezależnych ESA, zwiększając tym samym rozmiar układu, komplikując go i zwielokrotniając cenę. Najbardziej obiecującym podejściem wydaje się być stworzenie miniaturowej anteny rekonfigurowalnej.

Możliwość zmiany określonych parametrów w antenach rekonfigurowalnych przynosi wiele korzyści dla systemów IoT, które, dzięki temu, mogą dostosować się do zmieniających się warunków propagacyjnych, czy też podążać wiązką za przemieszczającym się obiektem bez konieczności mechanicznego obracania anteny. Pozwala to na zwiększenie kierunkowości, co skutkuje zwiększeniem zasięgu układu, a więc poprawą jakości łącza bezprzewodowego oraz na zmniejszenie użycia energii.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

1.2. Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest opracowanie koncepcji oraz zaprojektowanie płytki PCB miniaturowej anteny dla zastosowań IoT, w której możliwa będzie zmiana charakterystyki promieniowania anteny, za pomocą zewnętrznych układów przełączających.

Praca jest realizowana w ramach międzynarodowego projektu afarcloud (ang. Aggregate FARming in the CLOUD) i będzie wykorzystana w miniaturowych sensorach mających zastosowanie w rolnictwie precyzyjnym. Wynikają z tego następujące wymagania.

Antena docelowo ma pracować na częstotliwości f_0 = 2.45 GHz, posiadać miniaturową i nisko profilową konstrukcję, a także być dopasowaną do impedancji Z = 50 Ω. Wymagana jest też możliwość zmiany charakterystyki promieniowania anteny, a współczynnik wiązki głównej do wiązki wstecznej powinien być na poziomie mniejszym niż -15dB. Dodatkowo antena ma być wykonana na laminacie FR4, co pozwoli na obniżenie kosztów produkcji anteny.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

2. ANTENY Z REKONFIGUROWALNĄ CHARAKTERYSTYKĄ PROMIENIOWANIA

Chcąc zaprojektować miniaturową antenę rekonfigurowalną, niezbędne jest zrozumienie, czym jest antena rekonfigurowalna oraz zapoznanie się z dotychczasowymi osiągnięciami w tej dziedzinie i wybranie optymalnego pod względem wymaganych parametrów rozwiązania.

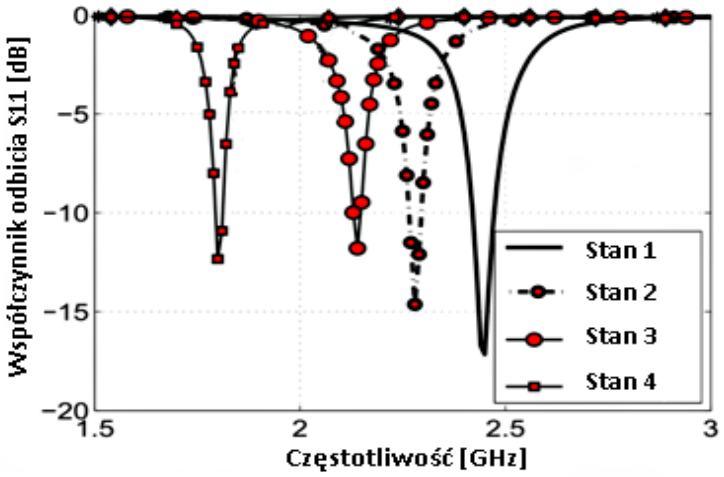
2.1. Podstawowe typy anten rekonfigurowalnych

Anteny rekonfigurowalne są to anteny, które dzięki zastosowaniu w nich elementów aktywnych, pełniących rolę przełączników, są zdolne do zmiany własnych parametrów. W roli przełączników stosuje się między innymi diody PIN, diody warystorowej, czy też tranzystora na pasmo gigahercowe lub dedykowane układy scalone które zwykle zbudowane są w oparciu o wyżej wymienione parametry [2].

Poprzez zastosowanie elementów aktywnych możemy zmieniać kształt i rozmiar anteny. Pozwala to na uzyskanie anteny o zmiennych parametrach. Ze względu na parametr, jaki jest zmieniany w antenie, możemy wyróżnić kilka typów anten rekonfigurowalnych, przedstawionych w poniższych podpunktach.

2.1.1. Anteny o zmiennej częstotliwości pracy

Są to anteny, które potrafią dynamicznie przechodzić z jednego pasma częstotliwości w drugie. Używane są w systemach wielopasmowych, by pozwolić na efektywne wykorzystanie widma, np. w nowoczesnych urządzeniach bezprzewodowych, takich jak smartfony czy tablety. Najbardziej popularnym sposobem na uzyskanie tych anten jest zmiana za pomocą przełączników ich efektywnej długości elektrycznej. Alternatywną metodą jest użycie układu dopasowującego do pożądanej częstotliwości rezonansowej. Jedna z realizacji takiej anteny została przedstawiona w [3]. Rys. 2.1 przedstawia przykładową charakterystykę częstotliwościową anteny o czterostanowej rekonfigurowalnej częstotliwości.

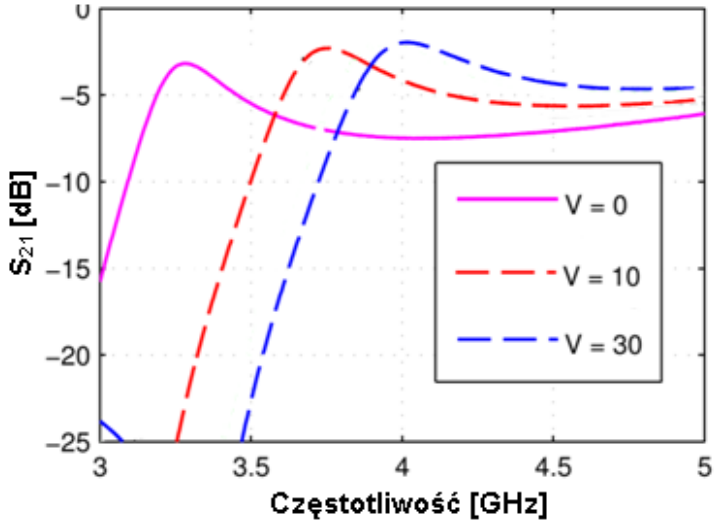


Rys. 2.1 Przykład charakterystyki współczynnika odbicia dla anteny o rekonfigurowalnej częstotliwości [3]

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

2.1.2. *Anteny o zmiennej szerokości pasma*

Zmiana między wąskim pasmem a szerokim również może być wymagana w niektórych aplikacjach. Trudności w zaprojektowaniu takich anten wiążą się z koniecznością zachowania dobrej wydajności anteny w całym paśmie częstotliwości, zarówno tym szerokim jak i tym wąskim. Jedną z metod realizacji rekonfigurowalności szerokości pasma jest metoda zmiany elektrycznej wielkości powierzchni podłoża, stosowana, między innymi w antenach łatowych i monopolach. Inna metoda opisana w [4] przedstawia możliwość sterowania szerokości pasma za pomocą pojemności realizowanej przez diodę. Zmiana pasma w zależności od napięcia polaryzującego diodę przedstawiona została na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Przykład charakterystyki transmisji dla anteny o rekonfigurowalnej szerokości pasma sterowanej poprzez napięcie polaryzujące diodę [4]

2.1.3. *Anteny o zmiennej charakterystyce promieniowania*

Anteny te są wykorzystywane między innymi w aplikacjach lokalizujących kierunek nadejścia sygnału, czy też w celu śledzenia odbieranej wiązki. Dzieje się tak, ponieważ anteny te promieniują przy tej samej częstotliwości w różnych kierunkach. Są tematem tej pracy i zostały szerzej opisane w jej dalszej części.

2.1.4. *Anteny o zmiennej polaryzacji*

Większość badań nad tymi antenami skoncentrowanych jest na zmianie między prawo- a lewoskrętną polaryzacją kołową, choć istnieją także konstrukcje realizujące polaryzacje eliptyczne i liniowe w płaszczyźnie zarówno wertykalnej jak i horyzontalnej. Jest wiele sposobów na skonstruowanie takich anten. Można zastosować np. odpowiednio rozmieszczone i ukształtowane radiatory zwierane do masy przez elementy sterujące, lub użyć struktur aktywnych takich jak metamateriały [5].

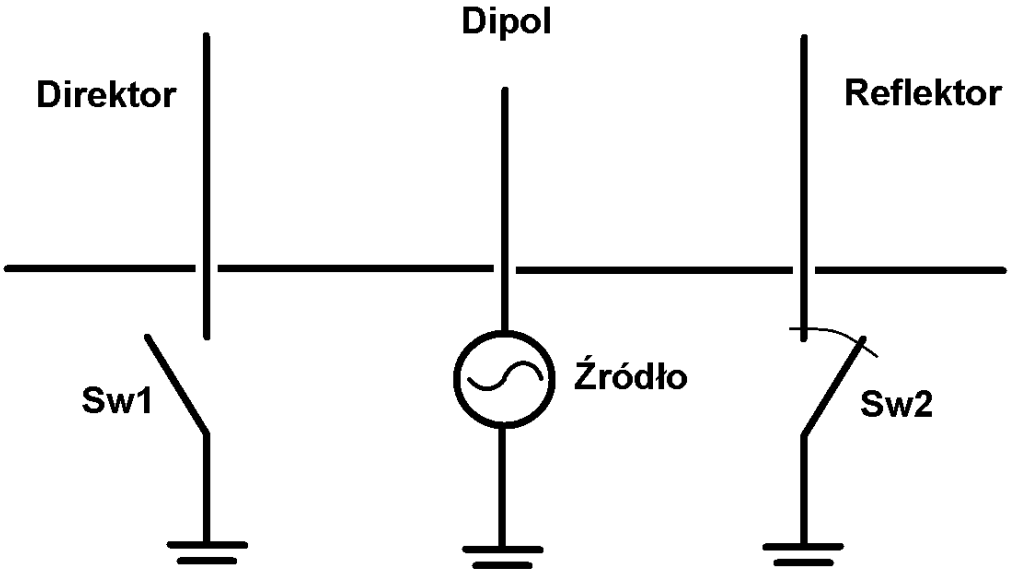
MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

2.1.5. Anteny o zmieniającej się większej liczbie parametrów

Są to zwykle anteny do zastosowań specjalnych realizujących dwie lub więcej z wyżej wymienionych funkcjonalności jednocześnie. Dla przykładu, antena o rekonfigurowanej charakterystyce i częstotliwości, mogła by zostać zastosowana w systemie, gdzie niezbędne okaże się lokalizowanie kierunku nadejścia sygnałów o różnych częstotliwościach. Anteny te są zwykle bardzo skomplikowane oraz wymagają łączenia wielu metod w celu ich zaprojektowania.

2.2. Antena ESPAR – przykład anteny o zmiennej charakterystyce promieniowania

Antena z elektronicznie sterowanym szykiem radiatorów (ESPAR – ang. elecltonically steerable parasitic array radiator) jest anteną o rekonfigurowalnej charakterystyce promieniowania. Składa się ona z dipola i rozmieszczonych dookoła niego w równych odstępach kilku do kilkunastu elementów pasywnych [6, 7]. Dipol i Elementy realizowane są w postaci prostych przewodników. Elementy te umieszczone są na płytce tworząc z nią kąt prosty. Laminat z przynajmniej jednej strony pokryty jest metalizacją masy. Dipol zasilany jest na przykład ze złącza SMA. Na nim również umieszczane są elementy sterujące w postaci tranzystorów lub diod zwierające i rozwierające elementy pasywne do masy. Jeśli elementy pasywne są zwarte do masy to realizują funkcję reflektorów odbijających padającą na nie energię. Jeśli są one rozwarte to nazywamy je direktorami, ponieważ energia może swobodnie je wtedy minąć. Model anteny trój elementowej zaprezentowany został na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Schemat najprostszej anteny ESPAR trój-elementowej

Sterowanie elementami pasywnymi bezpośrednio wpływa na formowanie się charakterystyki kierunkowej anteny. Zwiększając liczbę elementów pasywnych umieszczonych dookoła dipola zwiększamy rozdzielczość uzyskiwanych kierunkowości. Nie można tego robić w nieskończoność, ze względu na skończone wymiary elementów oraz na straty w elementach pasywnych.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Przykład takiej konstrukcji opisany został w [7]. Jest to antena 12-sto elementowa zbudowana na okrągłym laminacie. Wykazane w artykule zostało za pomocą symulacji i pomiarów, iż antena posiada charakterystykę rekonfigurowalną. Niestety rozmiar elektryczny anteny jest elektrycznie duży gdyż promień płytki wynosi 0.69 λ_0.

Mimo realizacji wielu charakterystyk promieniowania, by model ten mógł zostać wykorzystany w tej pracy musiał by zostać zminiaturyzowany.

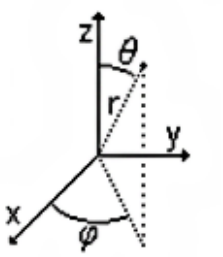
2.3. Najważniejsze parametry anten o rekonfigurowalnej charakterystyce

Projektując antenę, jakiegokolwiek typu, konieczne jest zdefiniowanie szeregu najważniejszych parametrów dla tego typu anteny, pozwalających w późniejszym czasie na porównanie otrzymanych wyników. Zestaw parametrów istotnych z punktu projektowania miniaturowej anteny rekonfigurowalnej został zebrany i opisany poniżej.

2.3.1. Charakterystyka promieniowania

Charakterystykę promieniowania anteny definiujemy jako funkcję matematyczną lub graficzną reprezentację właściwości promieniowania anteny w funkcji współrzędnych przestrzennych. Do właściwości tych należą: gęstość mocy promieniowania, natężenie pola, zysk kierunkowy, faza i polaryzacja. Najczęściej określa się ją w polu dalekim anteny, to znaczy spełniającym zależność $R > 2D^2/\lambda$, gdzie R to minimalny promień strefy dalekiej, λ to długość promieniowanej fali, a D jat największym wymiarem anteny.

Przyjęty układ współrzędnych podczas analizy charakterystyki promieniowania przedstawiono na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Układ współrzędnych ogólnie przyjęty do analizy charakterystyk promieniowania

2.3.2. Impedancja wejściowa

Impedancje wejściową definiujemy jako impedancje widzianą na zaciskach anteny lub jako stosunek napięcia do prądu na parze zacisków, lub jako współczynnik odpowiednich elementów pola elektrycznego do pola magnetycznego w punkcie. Możemy ją opisać poniższym wzorem:

$$Z_A = R_A + jX_A \ , \tag{2.1}$$

gdzie:

Z_A – impedancja między zaciskami anteny,

R_A – rezystancja między zaciskami anteny,

X_A – reaktancja między zaciskami anteny.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

W ogólności część rezystancyjna składa się z dwóch elementów, to jest:

$$R_A = R_r + R_L, \tag{2.2}$$

gdzie:

R_A – impedancja między zaciskami anteny,

R_L – rezystancja obrazująca promieniowanie anteny,

R_L – rezystancja obrazująca straty w antenie.

2.3.3. Zysk energetyczny

Zysk energetyczny jest kolejną wielkością opisującą wydajność anteny i jest definiowany jako współczynnik natężenia promieniowania w danym kierunku, do natężenia promieniowania jakie uzyskało by się, gdyby moc dostarczona do anteny była promieniowana izotropowo. Natężenie promieniowania odpowiadające natężeniu mocy anteny izotropowej jest równe mocy wejściowej anteny podzielonej przez 4π. Możemy je opisać następującym wzorem:

$$G = \frac{4\pi U(\theta,\Phi)}{P_{in}} \text{ [1]}, \tag{2.3}$$

gdzie:

G – zysk anteny w kierunku (θ, Φ),

$U(\theta, \Phi)$ – natężenie promieniowania w kierunku (θ, Φ),

P_{in} – całkowita moc dostarczona do anteny.

2.3.4. Współczynnik wiązki głównej do wiązki wstecznej

Współczynnik natężenia wiązki głównej, to znaczy wiązki na charakterystyce promieniowania o największej wartości zysku kierunkowego do wartości promieniowania wiązki wstecznej, nazywany jako *FTBR* (ang. Front to back ratio) jest jednym z współczynników określanych dla anten kierunkowych pozwalającym na ich jakościowe porównanie.

$$\text{FTBR} = \frac{\text{wartość natężenia wiązki głównej}}{\text{wartość natężenia wiązki wstecznej}} \tag{2.4}$$

2.3.5. Względny elektryczny rozmiar anteny

Względny elektryczny rozmiar anteny pozwoli nam na określenie granicznego rozmiaru dla anteny miniaturowej. Definiujemy go jako iloczyn liczby falowej *k* i współczynnika *a.* Opisujemy go następującym wzorem:

$$N = ka, \tag{2.5}$$

gdzie:

a – jest to najmniejszym promieniem sfery, która kompletnie otacza cały system anteny w wolnej przestrzeni, dla której długość fali jest równa λ_0,

k – opisane jest następującą zależnością:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \tag{2.6}$$

gdzie:

λ_0 – długość fali w próżni, dla częstotliwości środkowej pasma pracy anteny.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Na podstawie wartości *N* możemy jednoznacznie sprecyzować pojęcia anteny dużej i małym rozmiarze elektrycznym. Tak więc antena o $N > 1$ określana jest jako antena o dużym rozmiarze elektrycznym, natomiast antena o $N < 1$ będzie nazywana anteną miniaturową [8].

2.3.6. Kierunkowość

Kierunkowość anteny definiujemy jako stosunek natężenia promieniowania w danym kierunku pochodzącego z tej anteny do średniej wartości natężenia promieniowania we wszystkich kierunkach. Średnia wartość promieniowania jest równa całej mocy jaka jest wypromieniowana z anteny podzielonej przez 4π. Innymi słowy jest maksymalna wartość zysku kierunkowego anteny. Możemy ją opisać następującym wzorem:

$$D_{max} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \text{ [1]}, \tag{2.7}$$

D_{max} – maksymalna kierunkowość,

U_{max} – maksymalne natężenie promieniowania,

P_{rad} – całkowita wypromieniowana moc.

Kwestia największej wartości zysku kierunkowego, możliwego do uzyskania dla danej anteny, była badana przez wiele lat i jest istotna przy konstruowaniu anten silnie kierunkowych, ze względu na jej znaczenie w teorii anten, jak i w praktycznej implikacji wyników.

W [9] pokazano, że największą możliwą wartość zysku kierunkowego jaką można osiągnąć w danej antenie jest opisana wzorem:

$$D_{max} = N^2 + 2N, \tag{2.8}$$

gdzie:

N – rozmiar elektryczny anteny opisany w podpunkcie 2.3.2.

Tak więc widzimy, że rozmiar anteny jest krytycznym czynnikiem, który decyduje o maksymalnym zysku każdej anteny. Mimo to dla miniaturowych anten wartość D_{max} może się okazać bardzo ciężka do zrealizowania. Z tego też powodu konstrukcje pozwalające go osiągnąć są bardzo pożądane m.in. w szeroko pojętych zastosowaniach IoT.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

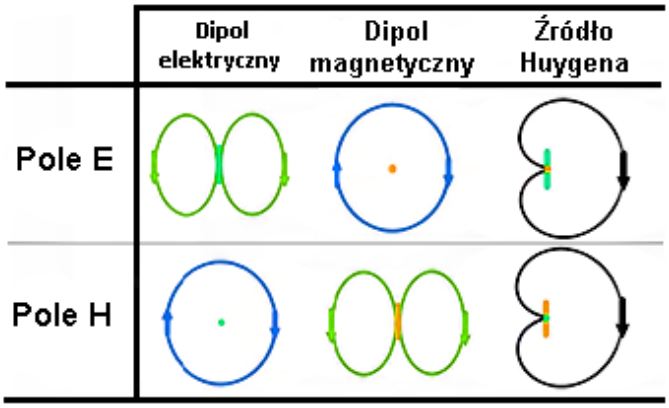
3. ŹRÓDŁO HUYGENSA

Elektrycznie małe anteny cieszą się szerokim zainteresowaniem w sektorze komercyjnym i w przemyśle. Jednakże kierunkowość takich ESA jest względnie słaba ze względu na to, że zysk wiązki głównej jest w nich na poziomie ok. 1.76 dB. Rozwiązaniem tego problem może okazać się stworzenie miniaturowego dipol Huygensa. Zostało udowodnione, że pojedyncze rzeczywiste źródło Huygensa może osiągną kierunkowość na poziomie 4.77 dB [10].

3.1. Zasada działania

Źródło Huygensa jest to szczególne połączenie dipola magnetycznego i elektrycznego. W teorii przyjmuje się, że oba te dipole znajdują się w tym samym miejscu oraz mają taką samą wartość natężenia pola elektromagnetycznego, ale polaryzacje tych pól są wzajemnie ortogonalne. W takim wypadku rozkład pola elektromagnetycznego wokół poszczególnych dipoli, jak i pola wypadkowego wokół całego źródła możemy przedstawić jak w Tabeli 3.1

Tabela 3.1. Rozkład pola E i H wokół dipola elektrycznego i magnetycznego oraz źródła Huygensa



Antena taka promieniuje tylko w jednym kierunku i posiada idealną polaryzację, we wszystkich kierunkach (np. liniową lub kołową).

Przyjmując powyższe założenia dla idealnego źródła Huygensa jesteśmy wstanie określić szereg parametrów.[11] Przyjmując wypadkowy wektor pola elektrycznego jako *E*, zdefiniujemy wektor polaryzacji jako:

$$\boldsymbol{p} = \frac{\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{E}^*}{j\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{E}^*}\ , \tag{3.1}$$

Na tej podstawie możemy obliczyć współczynnik AR dla anteny jako:

$$\boldsymbol{AR} = \frac{1}{p}\left(1 - \sqrt{1 - p^2}\right), \tag{3.2}$$

gdzie $p = |p|$. Dla wektora polaryzacji w zakresie $p \in \langle 0\ ;\ 1 \rangle$ otrzymamy polaryzację eliptyczną anteny, której szczególnymi przypadkami są $p = 1$, co oznacza polaryzację kołową anteny oraz $p = 0$ dla polaryzacji liniowej (LP – ang. linear polarization). Dla polaryzacji liniowe oczywiście nie definiujemy współczynnika *AR*.

Kierunkowość dla pojedynczego źródła Huygensa określana jest wzorem:

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

$$\boldsymbol{D} = \frac{3}{4}(\boldsymbol{cos\theta} + \mathbf{1})^{\mathbf{2}}, \tag{3.3}$$

gdzie θ oznacza kąt między punktem pola o maksymalnym natężeniu do punktu pola w którym chcemy określić kierunkowość. Na tej podstawie możemy stwierdzić, że maksymalna kierunkowość dla idealnego źródła Huygensa G_{max} = 3 (w skali liniowej).

W konsekwencji chcąc uzyskać miniaturowe źródło Huygensa będziemy potrzebować połączyć ze sobą elektrycznie małe dipole: elektryczny i magnetyczny. By zapewnić bardzo bliskie rozmieszczenie dipoli obok siebie, co jest bardzo pożądane w jakiejkolwiek implementacji źródła Huygensa, wskazane jest zastosowanie planarne. Odpowiedzią na te potrzeby może być zastosowanie jako dipoli rezonatorów bliskiego pola inspirowanych metamateriałami.

3.2. Dipole elektryczne i magnetyczne

Pierwszymi elementami jakie musimy wybrać konstruując źródło Huygensa są modele dipola elektrycznego i elektrycznego. Anteny dipolowe to najprostsze i najszerzej używane typy anten. Najczęściej składają się one z przewodnika o długości *2ι* przedzielonego w połowie, przez który płynie prąd $\boldsymbol{I_w}$. Taki dipol nazywamy dipolem elektrycznym, a pole elektryczne w strefie dalekiej promieniowane przez niego możemy określić następującym wzorem:

$$\boldsymbol{E_e} = \boldsymbol{j\omega}\mu\boldsymbol{I_w l}\frac{\boldsymbol{e^{-jkr}}}{\boldsymbol{4\pi r}}(\boldsymbol{u_\theta \Theta} + \boldsymbol{u_\Phi \Theta}) \text{ [11]}, \tag{3.4}$$

Rozkład pola elektrycznego wokół dipola przyjmuje kształt ∞. Pole magnetyczne rozłożone jest w płaszczyźnie prostopadłej do pola *E* i ma kształt O. Rozkłady obu tych pól zostały zebrane w Tabeli w punkcie 3.1.

Dipole elektryczne bardzo często na obu końcach obciążane są pojemnościowo w celu utrzymania równego rozkładu prądu na dipolu.

Jeśli przewodnik ukształtujemy w pętlę i przetniemy w jednym miejscu w celu zasilenia, otrzymamy dipol magnetyczny, którego pole będziemy mogli opisać jako:

$$\boldsymbol{E_e} = \eta\boldsymbol{k^2 I_l S}\frac{\boldsymbol{e^{-jkr}}}{\boldsymbol{4\pi r}}(\boldsymbol{u_\theta \Theta} + \boldsymbol{u_\Phi \Theta}) \text{ [11]}, \tag{3.5}$$

gdzie *S* jest powierzchnią pętli, a I_l prądem w niej płynącym.

Rozkład pola magnetycznego wokół dipola przyjmuje kształt ∞. Pole elektryczne rozłożone jest w płaszczyźnie prostopadłej do pola *H* i ma kształt O. Rozkłady obu tych pól zostały zebrane w Tabeli w punkcie 3.1.

Gdybyśmy mieli zaprojektować źródło Huygensa z tych dwóch dipoli musielibyśmy dopilnować by pole elektromagnetyczne wokół każdego z tych dipoli miało takie same natężenie, a więc był spełniony poniższy warunek:

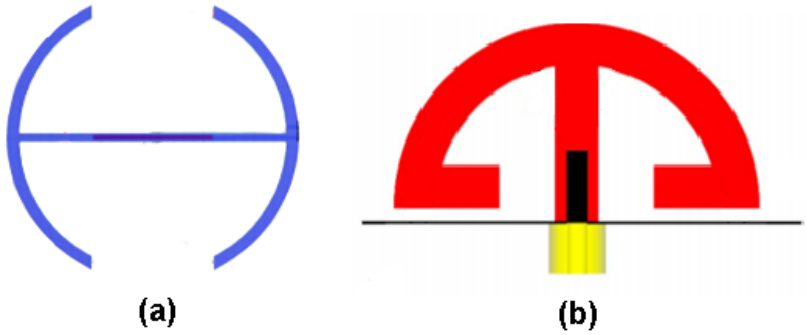
$$\boldsymbol{j\omega}\mu\boldsymbol{I_w l} = \eta\boldsymbol{k^2 I_l S}, \tag{3.6}$$

oraz aby dipole znajdowały się możliwie jak najbliżej siebie. Uzyskana w ten sposób może mieć duże rozmiary w odniesieniu do długości fali.

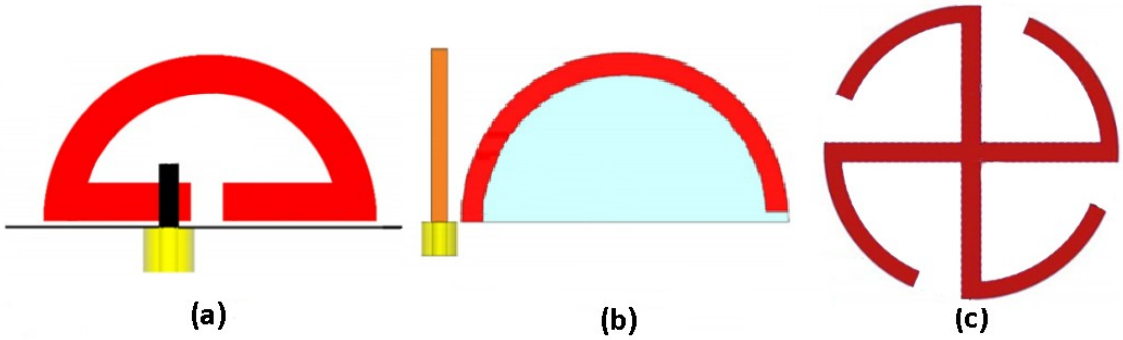
Elektrycznie małe dipole magnetyczne i elektryczne opierają się o tą samą zasadę działania co powyższe dipole. Do ich konstrukcji można zastosować rezonatory bliskiego pola (ang. near field resonant parastitic – NFRP). Dzięki temu rozmiar anten dipolowych jest

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

elektrycznie mały, *ka* < 0.5. W roli dipoli elektrycznych wykorzystuje się rezonatory I-kształtne (ang. Egyptian axe dipole –EAD), a jako dipol magnetyczny pętle pojemnościowe (ang. capacitively loaded loop – CLL). Przykładowe konstrukcje tych dipoli elektrycznych znajdują się na rys. 3.1. Dipole magnetyczne zostały przedstawione na rys. 3.2.



Rys. 3.1. Przykłady kształtów drukowanych dipoli elektrycznych. (a) Dipol I-kształtny o zniekształconych końcach. (b) Dipol sprzężony elektrycznie



Rysunek 3.2. Przykłady kształtów drukowanych dipoli magnetycznych. (a) Dipol sprzężony elektrycznie. (b) Dipol sprzężony magnetycznie. (c) Nietypowy sposób realizacji dipola magnetycznego

Kształt i rozmiar elementów NFRP gra olbrzymią rolę (niezależnie od tego czy będzie to element EAD czy CLL) wpływając na częstotliwość rezonansową anteny i pośrednio na jej impedancję. Dobieramy więc wymiary zgodnie z zasadami inżynierii mikrofalowej np. cieńsze ścieżki dają większe indukcyjności, mniejsze odstępy między nimi zwiększają pojemność, skracanie dipoli elektrycznych sprawia, że są bardziej pojemnościowe, a zwiększenie powierzchni dipoli magnetycznych zmniejsza ich indukcyjność.

Elementy NFRP zasilane są poprzez sprzężenie ich z dipolem lub monopolem sterującym, którym najczęściej jest odpowiednio ukształtowana na końcu linia współosiowa. Kształt i umiejscowienie elementu sterującego wpływa na to czy sprzężenie to będzie elektryczne, czy magnetyczne, a odległość między nimi wpływa na stopień ich sprzężenia [12].

Wynika z tego, że dzięki odpowiedniemu dobraniu wymiarów elementów jesteśmy wstanie stworzyć elektrycznie małe dipole elektryczne lub magnetyczne dopasowane do 50 Ω, bez konieczności użycia zewnętrznych obwodów dopasowujących.

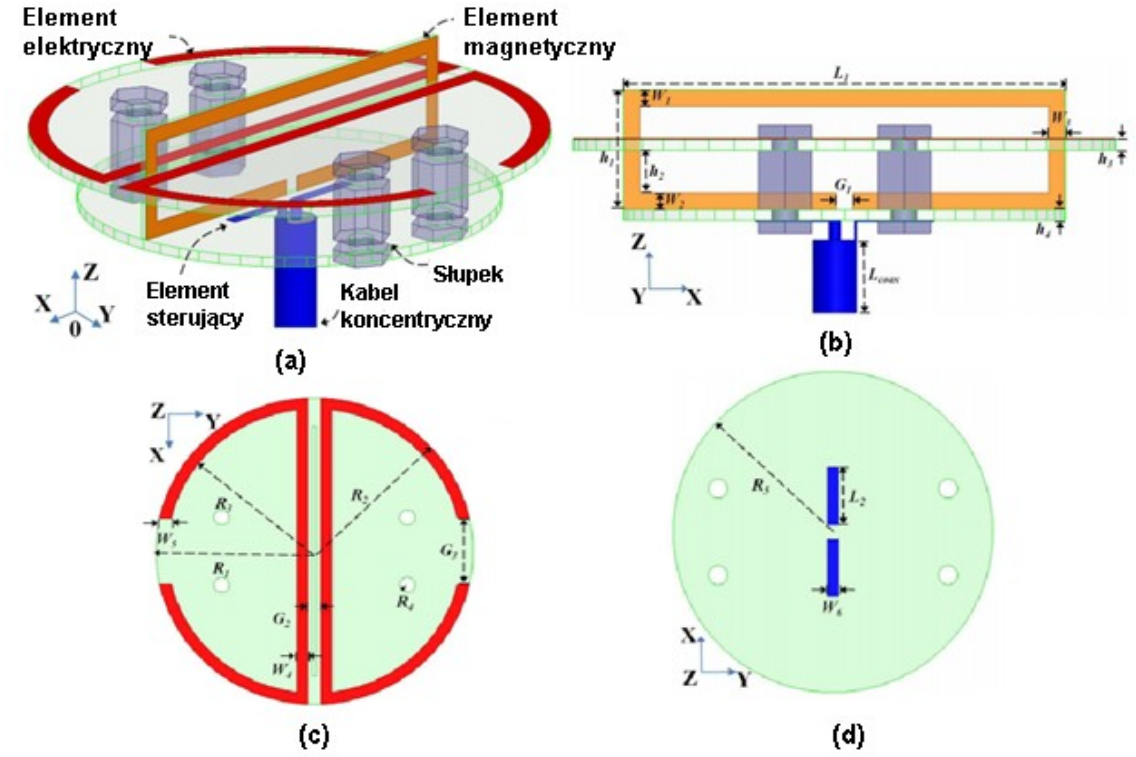
Do zalet używania elementów NFRP, wyróżniających je spośród innych metod uzyskania dipoli elektrycznych i magnetycznych, należy brak konieczności stosowania w nich

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

płaszczyzny uziemienia [13]. Te własności zadecydowały o użyciu ich w projekcie miniaturowego źródła Huygensa przedstawionego w poniższym podrozdziale.

3.3. Przykładowy projekt miniaturowego źródła Huygensa

W przeciągu ostatniej dekady zrealizowanych zostało wiele różnych koncepcji miniaturowych źródeł Huygensa. Jedną z nich została przedstawiona w artykule [14]. Na rys. 3.3. przedstawiona została budowa anteny.



Rys. 3.3. Podstawowa konfiguracja źródła Huygensa. (a) Obraz 3D anteny. (b) Bok anteny, widoczny element CLL. (c) Widok z góry na element EAD. (d) widok z dołu anteny, dipol sterujący

Antena składa się z trzech elementów: z prostokątnego dipola magnetycznego, dipola elektrycznego oraz element sterującego. Każdy z elementów została wykonana na osobnym podłożu wykonanego z materiału Rogers Duroid 5880. Elementy są połączone ze sobą za pomocą czterech słupków, a ich rozmieszczenie względem siebie zostało starannie dobrane i przedstawione na rys. 3.3. (a). Dipol elektryczny został przecięty wzdłuż osi symetrii i rozsunięty, a w powstałym miejscu został wycięty otwór, w celu umieszczenia elementów EAD i CLL prostopadle do siebie rys. 3.3. (c). Potwierdzono również, że taka dipol elektryczny o takiej konstrukcji zachowuje swoje właściwości. Całość zasilana jest z element sterującego umieszczonego równolegle do EAD rys. 3.3. (c), którego konstrukcja została pokazana na rys. 3.3 (d).

W ten sposób zaprojektowana antena została przesymulowana, zbudowana i pomierzona, Otrzymano następujące wyniki symulacji (pomiarów): $|S_{11}|_{min}$ = -17.69 dB (-16.38 dB), dla częstotliwości środkowej f_0 = 1.502 GHz (1.496 GHz), szerokość pasma (określaną dla $|S_{11}|$ < -10 dB) równą 8.5 MHz (9.1 MHz).

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Podczas symulacji (pomiarów) określono również parametry anteny w polu dalekim, a wyniki przedstawiają się następująco: zysk kierunkowy na poziomie 3.30 dBi (2.03 dBi), współczynnik *FTBR* = 18.76 dB (16.92 dB), a kierunkowość maksymalna równa 4.70 dBi i jest to wynik bardzo bliski obliczonemu teoretycznie ze wzoru (3.1) równego 4.77 dBi.

W omawianej publikacji autorzy w oparciu o własne doświadczenie omówili również proces projektowania pojedynczego źródła Huygensa składający się z kolejnych kroków:

- krok 1: Skonstruować ESA bazującą na elemencie CLL i dopasować ją do pożądanej częstotliwości środkowej,
- krok 2: Dodać element EAD i ustawić go prostopadle do CLL, tak by ich fazy się wzajemnie nachodziły,
- krok 3: Przesunąć częstotliwość rezonansową dipola elektrycznego by była bliska częstotliwości rezonansowej elementu CLL,
- krok 4: Ustalić poziom sprzężenia między elementami CLL i EAD tak by poziomy wypromieniowanych przez nie energii były podobne.

Zaprojektowana antena jest elektrycznie mała - $ka = 0.645 < 1$ oraz nisko profilowa, to znaczy wysokość anteny ~ $\lambda_0/20.45$. Dzięki powyższemu procesowi można zaprojektować taką antenę na dowolną częstotliwość.

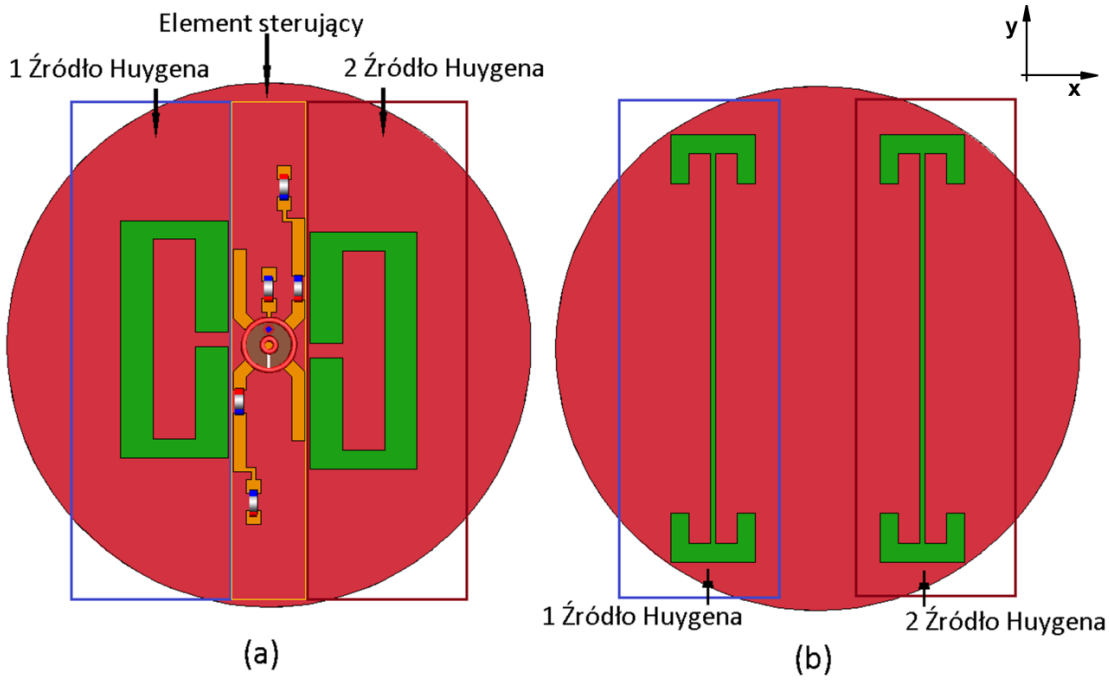
MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

4. MINIATUROWA ANTENA REKONFIGURROWALNA OPARTA O ŹRÓDŁA HUYGENSA

W poprzednim rozdziale opisana została koncepcja i zasada działania pojedynczego źródła Huygensa, przybliżone zostały miniaturowe dipole elektryczne i magnetyczne oraz opisany został projekt konkretnej anteny. W tym rozdziale wszystkie te aspekty zostaną wykorzystane do stworzenia miniaturowej anteny rekonfonigurowalnej będącą tematem tej pracy.

4.1. Wprowadzenie i wyjaśnienie koncepcji

Projektowana antena rekonfigurowalna będzie składać się z dwóch źródeł Huygensa rozmieszczonych po dwóch stronach płytki oraz z układu sterującego pozwalającego na elektryczne przełączanie się między trzema możliwymi charakterystykami. Konstrukcje tej anteny pokazano na rys. 4.1. W związku z tym musimy obmyślić koncepcję zmiany polaryzacji jednego z tych dipoli lub 'elektrycznego położenia' jednego dipola względem drugiego.



Rys. 4.1. Przedstawia rozmieszczenie komponentów w projektowanej antenie rekonfigurowalnej. (a) Przedstawia górną stronę płytki. (b)Przedstawia dolną stronę płytki

Realizowana antena została stworzona wcześniej przez Zhentian Wu, Ming-Chun, Tang Mei Li i Richarda Ziolkowskiego i opisana w publikacji [8]. Projekt przystosowany jest dla komunikacji V2V by zapewnić łączność miedzy pojazdami lub między pojazdem a punktem dostępu. Projekt zakładał stworzenie miniaturowej anteny o trzech przełączalnych kierunkach charakterystyki promieniowania tj. dwie przeciwne kierunkowe charakterystyki do komunikacji w przód i w tył oraz trzecia dwu kierunkowa.

Antenę tą udało się uzyskać poprzez zastosowanie jako dipoli elementów NFRP opartych na metamateriałach oraz zaprojektowanie odpowiednio skonstruowanego układu

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

sterującego. Jako elementy NFRP zostały użyte prostokątne element EAD, które stanowią odmianę rezonatora I-kształtnego i prostokątne pętle pojemnościowe.

4.2. Środowisko Altair FEKO

Rozważania teoretyczne są nie wystarczające by dokładnie zaprojektować jakąkolwiek antenę. Niezbędne jest znalezienie i użycie odpowiedniego narzędzia. W tym celu użyto kompleksowego oprogramowania Altair Feko służącego do obliczeń i symulacji elektromagnetycznych. Program umożliwia przeprowadzanie obliczeń zarówno w dziedzinie częstotliwości jak i czasu. Ta druga opcja była szczególnie istotna przy projektowaniu elementu CLL, gdyż pozwoliło to na obserwację rozkładu prądu w tym dipolu w czasie, co okazało się krytyczne by prawidłowo go zaprojektować. Do obliczeń w dziedzinie częstotliwości zastosowana została zastosowana metoda momentów (MoM), która jest pełno falowym rozwiązaniem całkowych równań Maxwella.

Oprogramowanie pozwala również na przeprowadzanie optymalizacji zaprojektowanego układu. Jest to niezbędna i przydatna funkcja pozwalająca w miarę łatwy sposób na dopasowanie anteny i otrzymanie jak najlepszych parametrów. Wykorzystane zostały dwie metody optymalizacji: metodę siatki (ang. grid serach) szukającą najlepszego wyniku dla wcześniej zdefiniowanych zestawów zmiennych oraz metodę powierzchniowej reakcji modelu (ang. global response surface metod), która buduje siatkę reakcji układu na zmianę parametrów, która jest aktualizowana i rozszerzana o kolejne nowe próbki. [15]

4.3. Proces projektowania

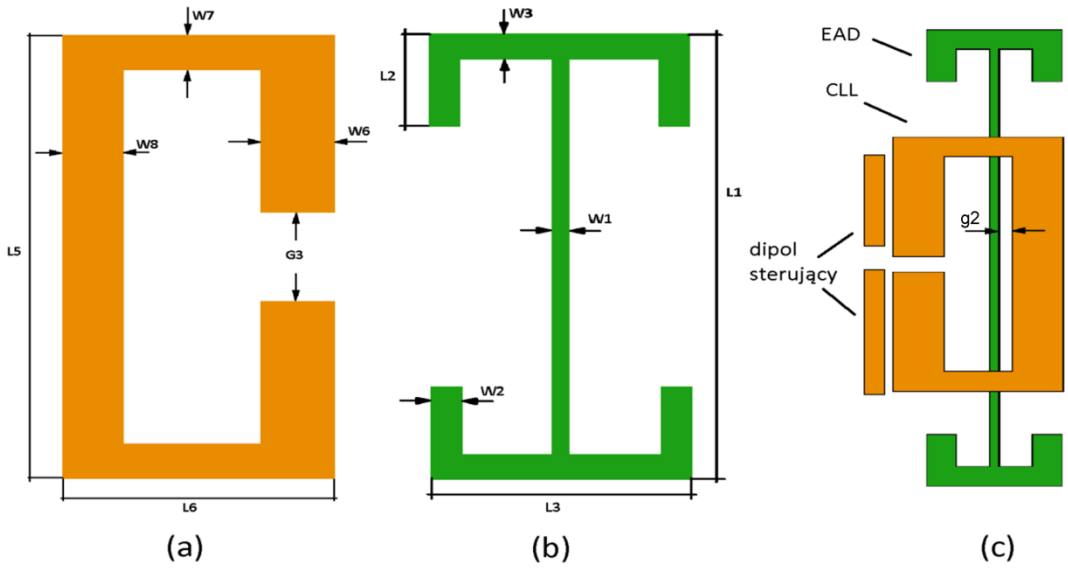
Miniaturowa rekonfigurowalna antena oparta o metamateriałowe źródła Huygensa w całości została zaprojektowana na laminacie FR4 o stałej przenikalności elektrycznej ε_r = 4.5 i tangensem stratności *tan* = 0.017. Zaprojektowana płytka ma grubość 0.4 milimetra, a ma realizowane na niej elementy promieniujące i element sterujący znajdujące się po obu stronach płytki wykonane są z miedzi o grubość 0.035 milimetra.

4.3.1. Proces pojedynczego źródła Huygensa

W rozdziale trzecim pokazano jak ważny przy projektowaniu źródeł Huygensa jest dobór odpowiednich elementów pełniących rolę dipoli magnetycznych i elektrycznych. W tej pracy jako CLL została wykorzystana prostokątna pętla pojemnościowa , a w roli EAD I-kształtny rezonator bliskiego pola. Elementy zostały umieszczone po dwóch stronach płytki tworząc strukturę planarną. Pozwoliło to na stworzenie bardzo nisko-profilowego źródła Huygensa.

Pojedyncze źródło Huygensa zostało zaprojektowane i przesymulowane zgodnie z procesem projektowania tego źródła przedstawionym w rozdziale 3.3. Zwymiarowane dipole oraz ich rozmieszczenie względem siebie zostały przedstawione na rys. 4.2., który jest rysunkiem poglądowym nie odzwierciedlającym rzeczywistych wymiarów.

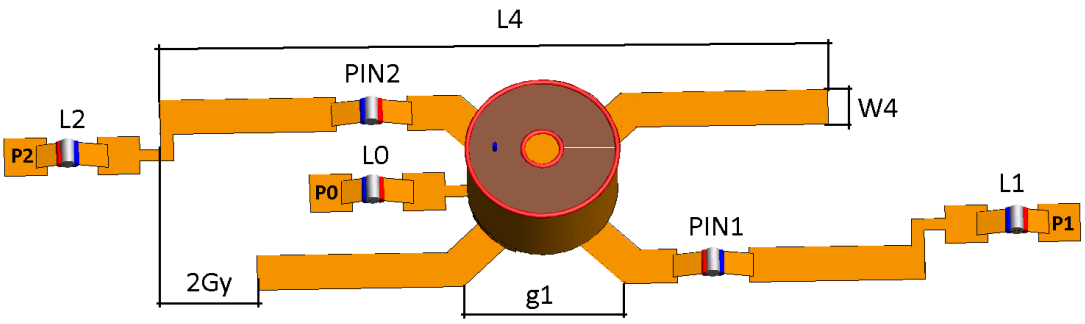
MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl



Rys. 4.2. Przedstawia zwymiarowane pojedyncze źródło Huygensa. (a) Element CLL wraz z wymiarami. (b) Zwymiarowany element EAD. (c) Rozmieszczenie dipoli w planarnym źródle Huygensa.

4.3.2. Projekt układu sterującego

Jednym z komponentów wchodzących w skład anteny rekonfigurowalnej, której koncepcja przedstawiona została w punkcie 4.1 jest układ sterujący. Jego rozmieszczenie na płytce zobrazowane zostało na rys. 4.1. Szczegółowa konstrukcja tego układu zobrazowana została na rys. 4.3.



Rys. 4.3. Konstrukcja układu sterującego anteną rekonfigurowalną

Układ ten składa się z dwóch diod PIN oznaczonych na rys. 4.3 jako PIN1 i PIN2 oraz z trzech indukcyjności *L0*, *L1* i *L2*. Sygnał wysokiej częstotliwości doprowadzany jest do elementu przewodem koncentrycznym o impedancji 50 Ω (zobrazowany w postaci walca na środku układu). Ścieżki o długości *L4* z przerwą *g1* tworzą 2 dipole zasilające które poprzez sprzężenie pobudzają elementy CLL i EAD. Elektryczna długość tych dipoli jest sterowana za pomocą diod PIN. Sygnał sterujący diodę PIN1 podawany jest między pady P1-P0, a sygnał sterujący diodę PIN2 między pady P2-P0. Przy padach dodane zostały cewki, których celem jest odseparowanie obwodu prądu stałego lub wolnozmiennego sygnałów sterujących od sygnału wysokiej częstotliwości doprowadzonego do anteny.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Tabela 4.1. Trzy stany diod PIN, które uzyskują trzy charakterystyki promieniowania anteny

Stan	Dioda PIN1	Dioda PIN2
A	włączona	wyłączona
B	wyłączona	włączona
C	włączona	włączona

Zmienne stany systemu uzyskiwane są poprzez włączanie i wyłączanie diod PIN i zostały zebrane w tabeli 4.1.

Gdy występuje stan A pobudzany zostaje dipol magnetyczny w 1. Źródło Huygensa (rys. 4.1), który pobudza dipol elektryczny w tym źródle. Oba dipole będąc w fazie generują promieniowanie, którego główna wiązka jest rozłożona wzdłuż osi –x. Drugie źródło Huygensa ze względu na niewielką odległość jest również pobudzane prądem w elemencie sterującym o tym samym kierunku, wskutek czego również generuje ono pole wzdłuż osi –x. Ze wzglądu na odległość między źródłami dużo mniejszą niż długość fali różnica faz pola wytwarzanego przez oba źródła jest pomijalna więc ich pola się sumują.

W stanie B sytuacja analogiczna z tym że załączona dioda mieści się na drugim dipolu zasilającym, a więc źródła Huygensa będą pobudzane w przeciwnej wazie niż miało to miejsce w stanie A. W konsekwencji źródło będzie promieniować w kierunku osi +x.

Stan C występuje gdy obie diody są włączone, a więc Źródła Huygensa pobudzone zostają w przeciwfazie. W efekcie oba źródła będą promieniować w przeciwnych kierunkach, rozkład pola będzie dwukierunkowy wzdłuż osi x lecz zysk w każdą ze stron będzie słabszy.

Podczas symulacji układu zastosowano diodę charakteryzującą się rezystancją 1.2 Ω w stanie włączenia oraz pojemnością 0.15 pF w stanie wyłączenia (dioda Bar50-02V).

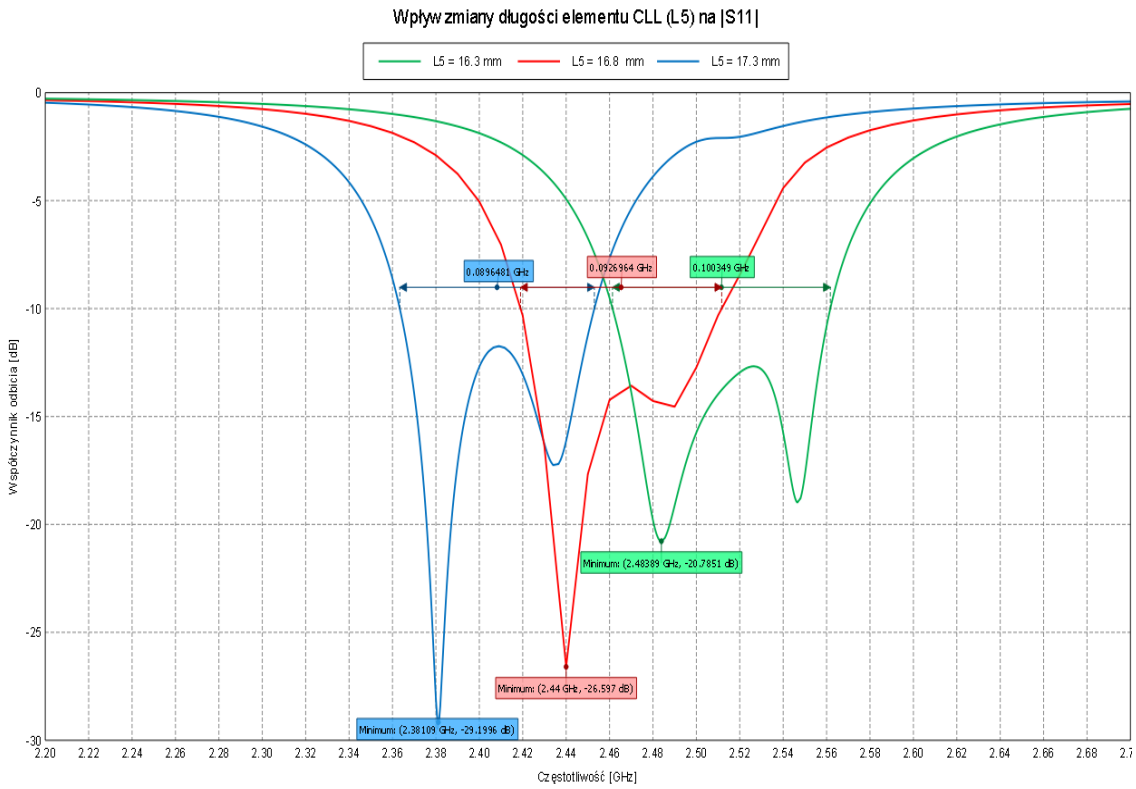
Rozmieszczenie diod na dipolu zasilającym, a także pozostałe wymiary układu zasilającego nie jest przypadkowe i zostało dobrane by uzyskać jak najlepsze parametry anteny w Stanie A i B.

4.3.3. Dopasowywanie i wpływ poszczególnych wymiarów na wyniki

Zaprojektowane w ten sposób źródła Huygensa i układ sterujący zostały połączone na jednej płytce PCB jak na rys. 4.1, by otrzymać miniaturową antenę rekonfigurowalną. Antena została poddana optymalizacji. Optymalizowane były stan A i B, by uzyskać w nich jak najlepsze dopasowanie do 50 Ω, a więc $|S_{11}| < -15$dB oraz $FTBR > 15$dB w obu stanach.

Aby efektywnie dokonać optymalizacji anteny konieczna by analiza wpływu poszczególnych wymiarów na optymalizowane parametry. Ze względu na dużą liczbę wymiarów mających wpływ na parametry anteny nie zostaną one wszystkie przedstawione w tej pracy, lecz tylko 2 przykładowe. Poniżej przedstawiono wpływ długości elementów EAD (*L1*) i CLL (*L5*) na parametry całej anteny. Wymiary te zostały wybrane ze względu na ich bezpośredni wpływ na częstotliwość rezonansową pojedynczych dipoli. Wszystkie poniższe wyniki symulacji zostały wykonane dla stanu B układu, przy pozostałych wymiarach o wartościach podanych w tabeli 4.2.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

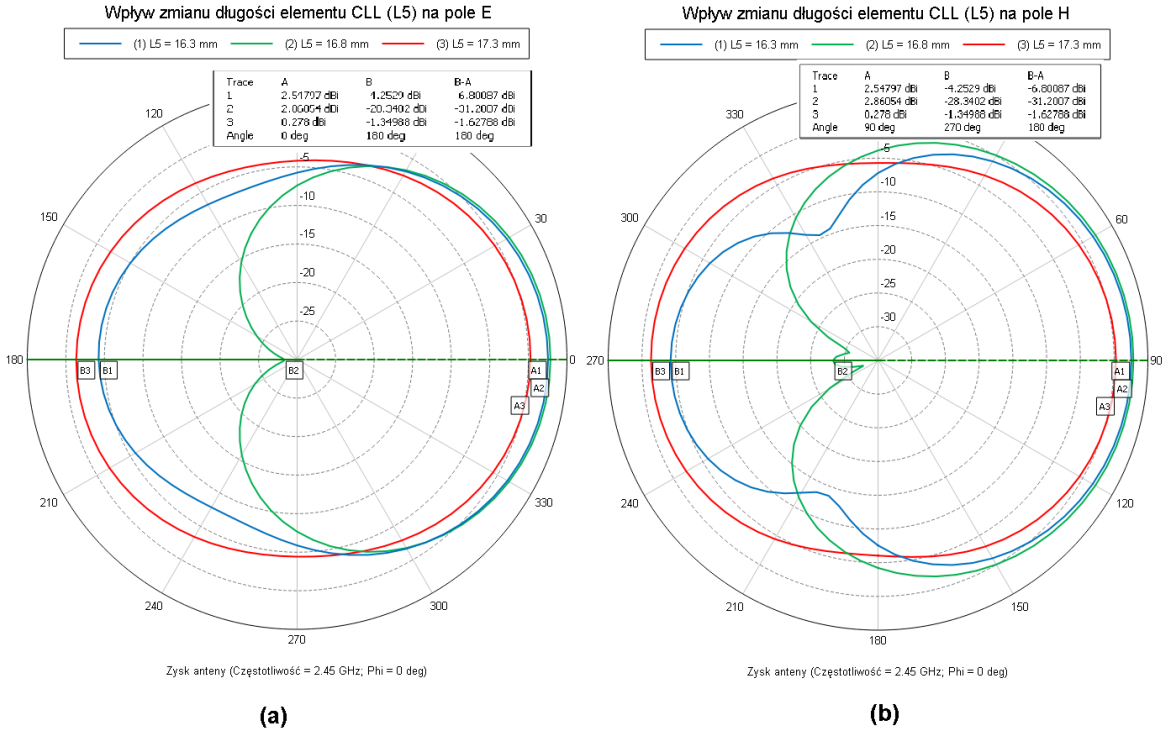


Rys. 4.4. Charakterystyka wpływu długości elementu CLL na współczynnik odbicia w antenie

Na rys. 4.1. możemy zauważyć ogromny wpływ długości *L5* na miejsce rezonansu anteny. Zmiana tej długości o 0.5 mm może sprawić, że nie tylko częstotliwość rezonansowa elementów CLL się zmieni, ale również pasmo -10dB całej anteny może przesunąć się na osi częstotliwości w taki sposób, że częstotliwość f_0 na jaką została zaprojektowana antena wypadnie poza tym pasmem.

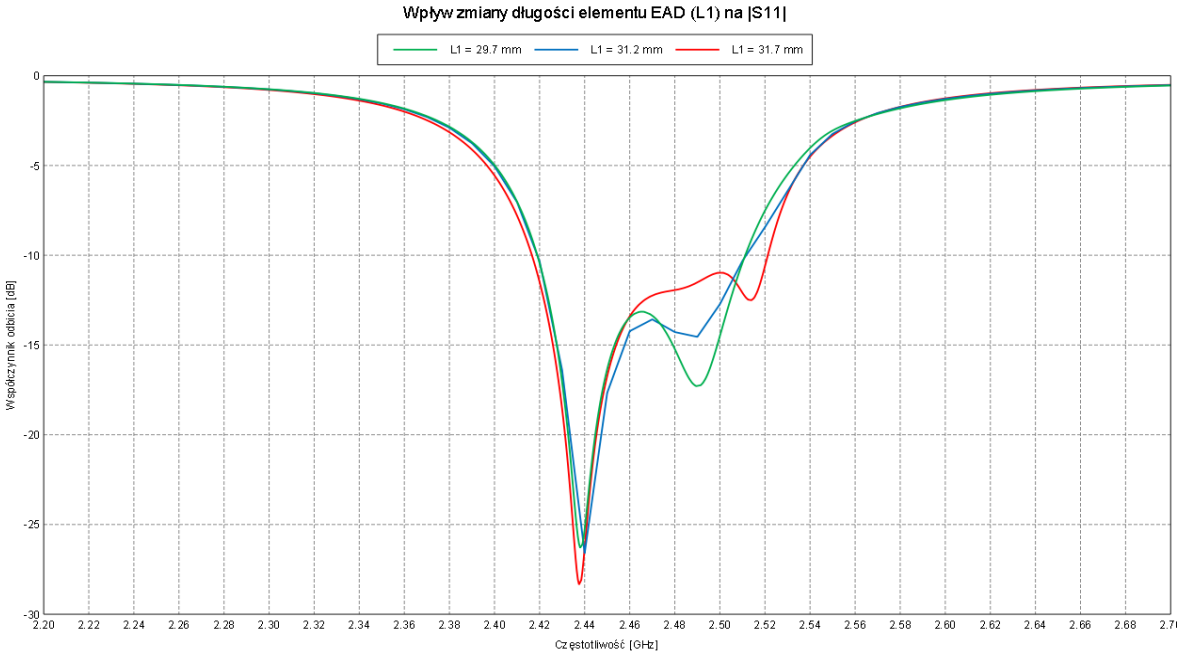
Długość *L5* w znacznym stopniu wpływa również na wartość *FTBR* przy częstotliwości f_0. Na charakterystyce przedstawionej na rys. 4.2 możemy zaobserwować zmniejszenie się tego parametru o 20 dB. Wymiar *L5* jest jednym z głównych parametrów którego zmiana w spływa na spełnienie warunków optymalizacji.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl



(a) **(b)**

Rys. 4.5. Charakterystyka wpływ długości elementu CLL na rozkład pola dla częstotliwości f_0 = 2.45 GHz. (a) Rozkład pola E. (b) Rozkład pola H

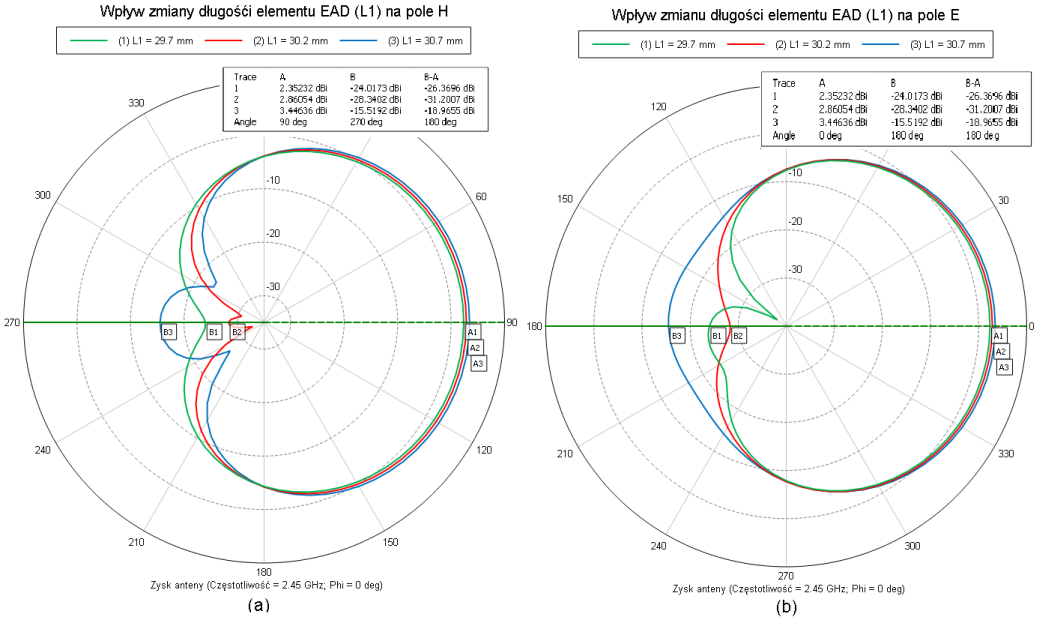


Rys. 4.6. Wpływ długości elementu EAD na współczynnik odbicia w antenie

Zmiana wartości długości elementu EAD o taką samą wartość co długości *L5* powoduje minimalny wpływ na parametry anteny. Na rys. 4.3. zauważyć możemy tylko przesunięcie się lokalnego minima W okolicach 4.8-5.2 GHz. Jest to minimum wynikające z częstotliwości rezonansowej samych elementów EAD.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Rys. 4.4. Przedstawia charakterystykę rozkładu pola *E* i pola *H* przy zmianie długości *L1*. Zmiany współczynnika *FTBR* wynoszą maksymalnie 13 dB. Mimo tych zmian układ dalej spełnia założenia przyjęte do optymalizacji anteny.

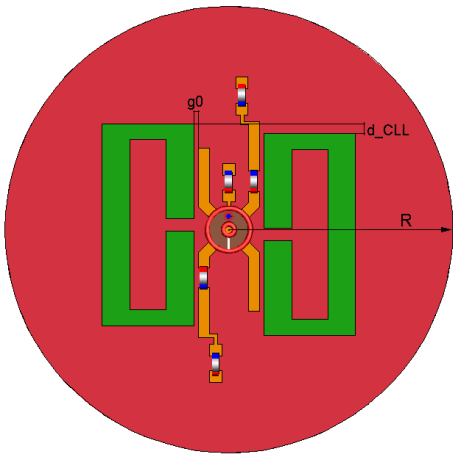


Rys. 4.7. Wpływ długości elementu EAD na rozkład pola dla częstotliwości f_0 = 2.45 GHz. (a) Rozkład pola E. (b) Rozkład pola H

4.4. Finalny projekt anteny

W tym podrozdziale przedstawiona zostanie zoptymalizowana już konstrukcja zestawione i opisane zostaną wyniki symulacji oraz określone zostaną najważniejsze parametry anteny.

4.4.1. Końcowy model anteny



Rys. 4.8. Zwymiarowana górna warstwa płytki

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Ostateczne wymiary anteny zostały zestawione w tabeli 4.2. Każdy z wymiarów został wcześniej wskazany na rysunkach 4.1, 4.2 i 4.3.

Tabela 4.2. Zestawienie wymiarów anteny

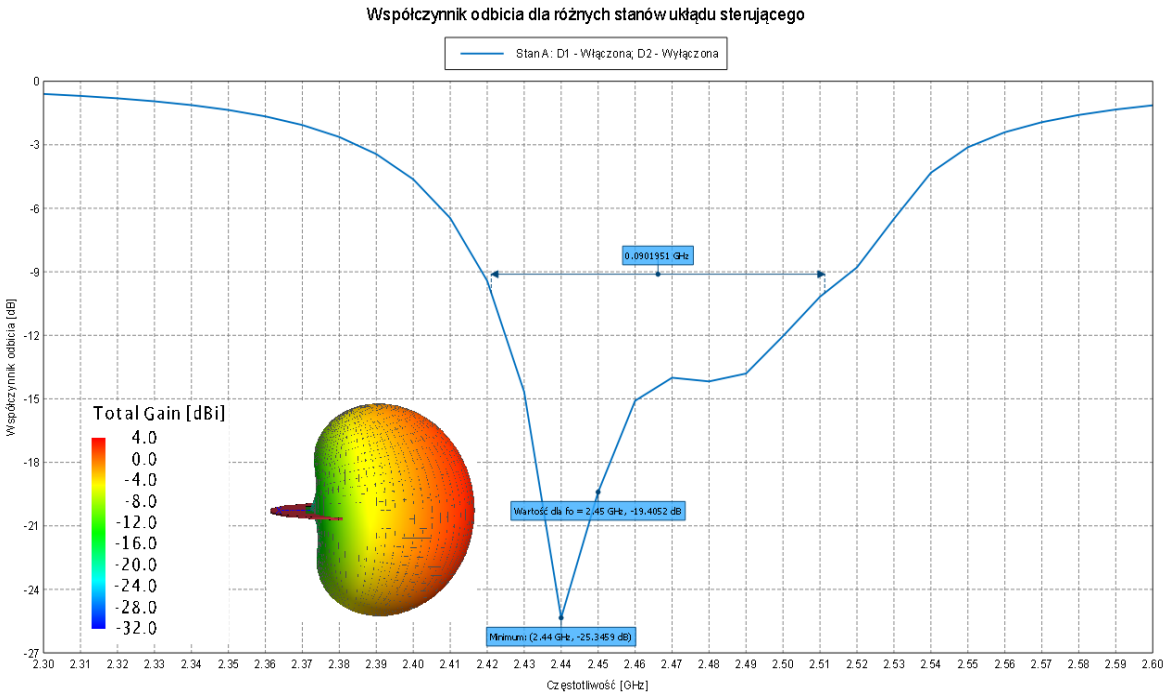
L1 = 32.22	L2 = 3.45	L3 = 6.00	L4 = 15.8	L5 = 16.8	L6 = 7.60	d_CLL = 0.40
W1 = 4.00	W2 = 1.30	W3 = 1.30	W4 = 0.91	W6 = 2.31	W7 = 1.32	W8 = 2.28
G0 = 0.35	g1 = 3.80	g2 = 0.60	G3 = 1.00	GY = 1.11	R = 18.56	

Stworzona antena ma średnicę 37.12 mm oraz wysokość 0.4 mm. Na podstawie tych wymiarów jesteśmy wstanie określić elektryczny rozmiar anteny dla częstotliwości środkowej f_0 = 2.45 GHz, który jest równy *ka* = 0.96. Uzyskana wartość oznacza, iż zaprojektowana antena rzeczywiście jest anteną miniaturową oraz posiada bardzo nisko profilową konstrukcję, dzięki czemu spełnia dwa główne założeń projektu.

W układzie została wprowadzona modyfikacja w stosunku do układu przedstawionego w publikacji polegająca na rozsunięciu wzdłuż osi y elementów CLL (odległość *d_CLL* na rys. 4.5) w celu poprawienia dopasowania i charakterystyk kierunkowych anteny.

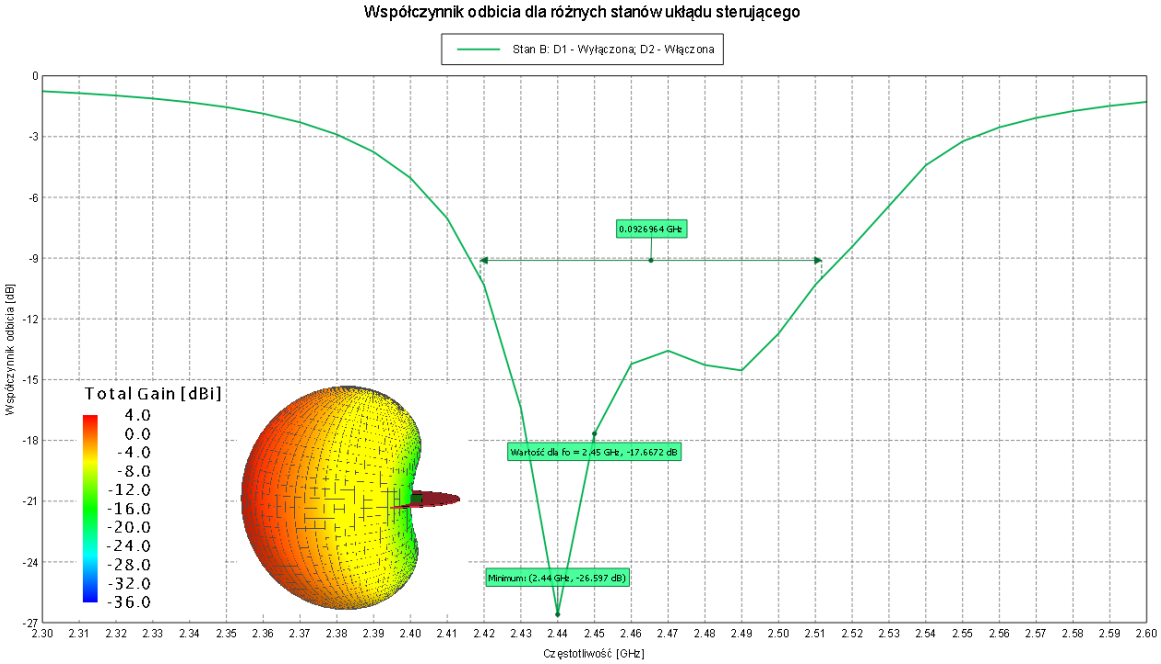
4.4.2. Przedstawienie wyników symulacji

Antena została przesymulowana w programie Altair FEKO. W konsekwencji uzyskane zostały następujące charakterystyki częstotliwościowe współczynników odbicia anteny dla wszystkich trzech stanów pracy anten. Analizując je musimy pamiętać, że układ był optymalizowany tylko dla stanów A i B.

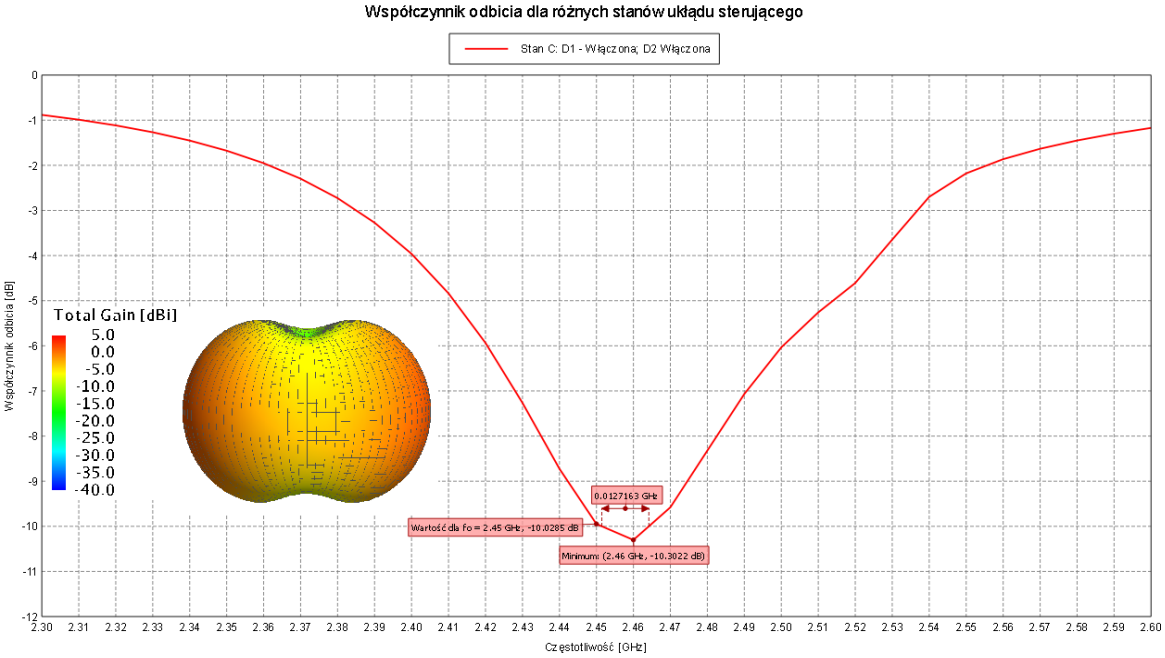


(a)

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl



(b)



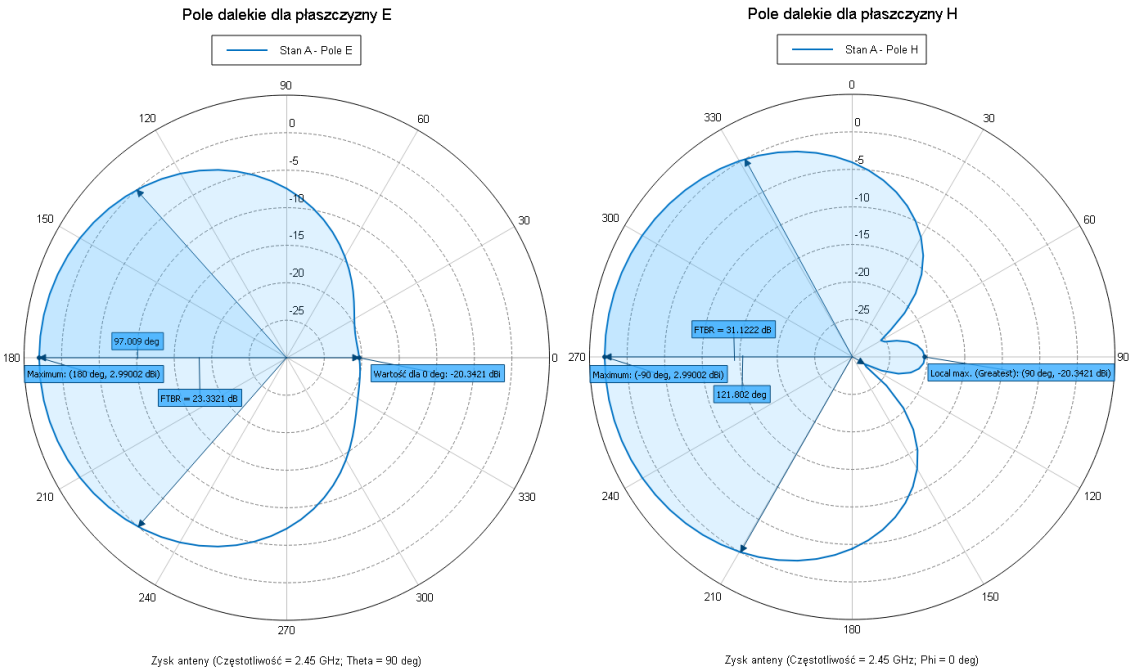
(c)

Rys. 4.9. Charakterystyki współczynnika w zależności od stanu układu. (a) Układ ustawiony w stan A. (b) Układ ustawiony w stan B. (c) układ ustawiony w stan C

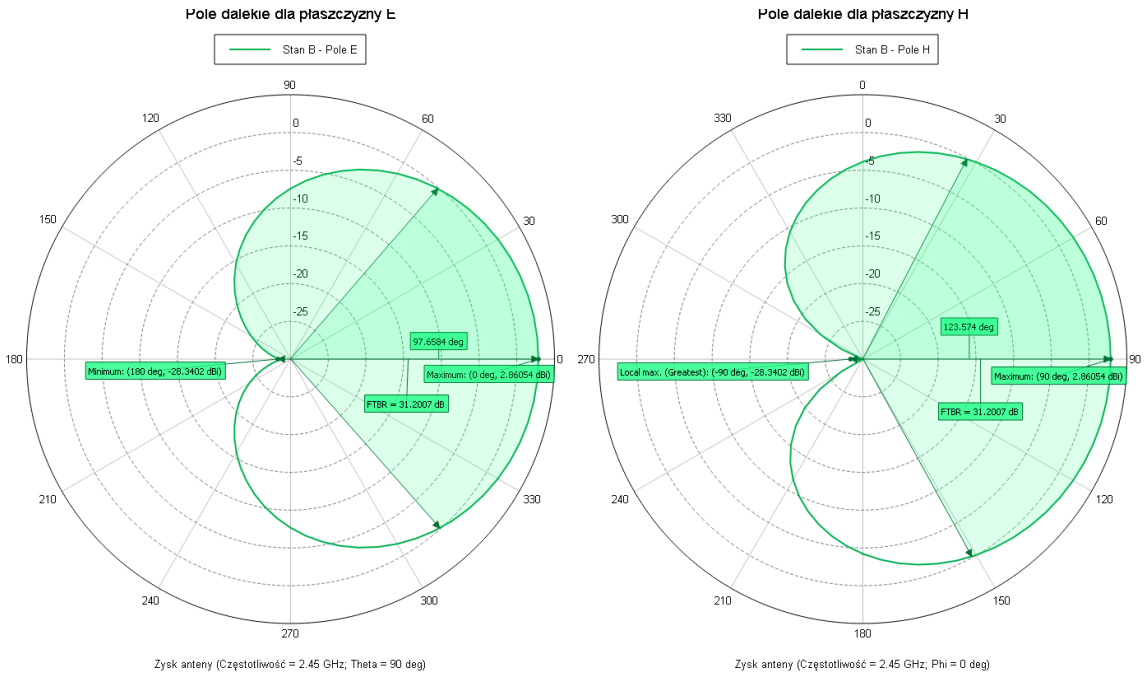
Na rys. 4.6 pasma -10 dB oznaczone zostały dla każdego stanu, punkty rezonansu układu, które w stanach A i B wypadają na częstotliwości f_{min} = 2.44 GHz oraz wartości $|S_{11}|$ dla częstotliwości f_0 = 2.45 GHz. Częstotliwość f_{min} jest częstotliwością rezonansową dipola magnetycznego. Poniżej częstotliwości rezonansowej dipol magnetyczny oparty o pętle pojemnościowe PLL ‘odbijaja’ część energii w stronę przeciwną do kierunku promieniowania, co znacząco wpływa na pogorszenie się współczynnika *FTBR* [13].

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

By zmniejszyć ryzyko znacznego pogorszenia współczynnika FTBR w wyniku niewielkiego przesunięcia f_{min} (np. o 10 MHz) ze względu na ograniczoną dokładność procesu produkcyjnego (zmiany parametrów układu na zmiany wymiarów zostały pokazane w punkcie 4.3.3) najlepsze wartości *FTBR* zoptymalizowane zostały dla f_0, przy możliwie jak najbardziej oddalonej od niej częstotliwości f_{min} , przy zachowaniu dopergo dobasowania dla f_0 to znaczy $|S_{11}| < -17$ dB (2 dB mniej w stosunku do wartości sprecyzowanej w wymaganiach, jako zapas dla procesu produkcyjnego). Uzyskane to zostało poprzez przesunięcie w stronę wyższych częstotliwości rezonansu elementu EAD (drugie lokalne minimum na charakterystyce w okolicach częstotliwości 2.49 GHz). Dodatkowym plusem tego zabiegu jest zwiększenie się pasma -10 dB całego układu.

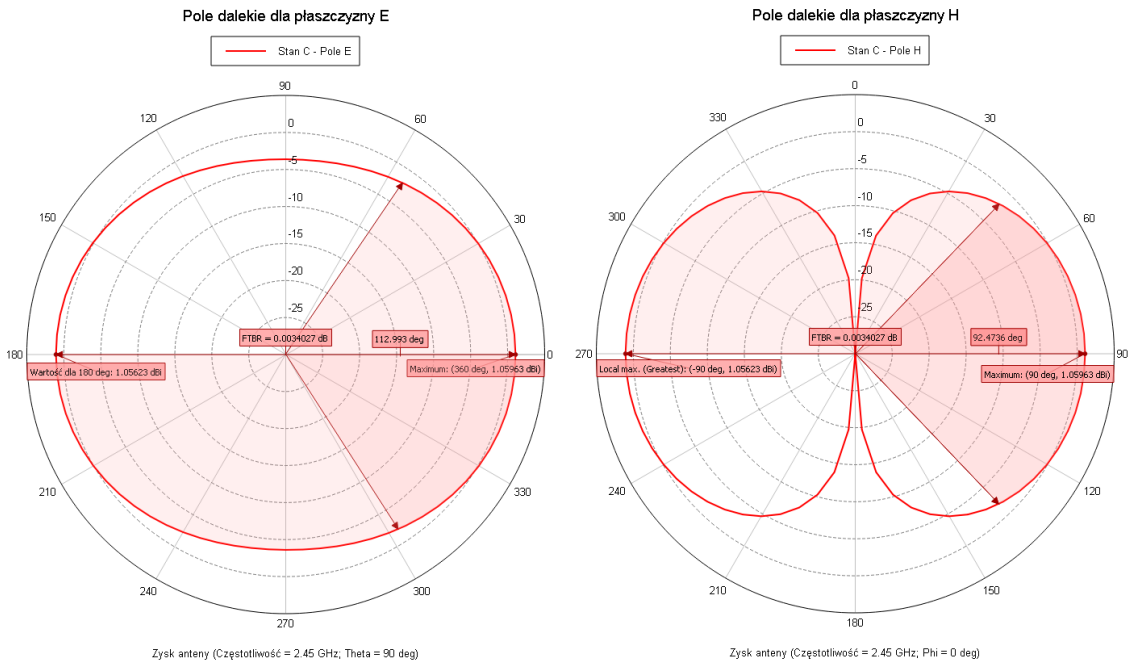


(a)



(b)

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl



(c)

Rys. 4.10. Charakterystyki rozkładu pola E i H w zależności od stanu układu. (a) Układ ustawiony w stan A. (b) Układ ustawiony w stan B. (c) układ ustawiony w stan C

Na uzyskanych rys. 4.6 przedstawiających charakterystyki rozkładu pola elektromagnetycznego wokół anteny oznaczone zostały wartości zysku w kierunku promieniowania, współczynnika *FTBR* oraz szrokość wiązki dla 3 dB zarówno dla pola *E* jak i *H*.

Możemy zauważyć, że zgodnie z oczekiwaniami antena w zależności od stanu układu uzyskane zostały różne kierunkowości układy. Dla stanu A antena promieniuje w stronę pierwszego źródła Huygensa, dla stanu B w stronę drugiego źródła Huygensa, a dla stanu C w obie strony jednocześie. Potwierdza to spełnienie przez antenę kolejnego wymagania, którym jest rekonfigurowalność charakterystyki promieniowania.

Tabela 4.3. Zestawienie najważniejszych parametrów otrzymanej anteny

Parametr	*Stan A*	*Stan B*	*Stan C*
$\|S_{11}\|$	*-19.4 dB*	*-17.7 dB*	*-10.03 dB*
Szerokość pasma -10dB	*92 MHz*	*93 MHz*	*13 MHz*
FTBR	*23.33 dB*	*31.2 dB*	*0.003 dB*
Kierunkowość	*5.92 dBi*	*5.85 dBi*	*3.55 dBi*
Szerokość wiązki 3dB w płaszczyźnie E	*97 °*	*97.6 °*	*113 °*
Szerokość wiązki 3dB w płaszczyźnie H	*121.8 °*	*123.6 °*	*92.5 °*
ka	*0.95*		

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

W tabeli 4.3 zestawione zostały najważniejsze parametry zaprojektowanej anteny. Parametr *FTBR* dla stanu C bliski zeru, jest spodziewanym wynikiem i oznacza iż antena w tym stanie promieniuje praktycznie równo w obu kierunkach.

Warto zwrucić uwagę na kierunkowość anteny. Obliczając ze wzoru (2.8) wartość maksymalnej kierunkowości dla uzyskanego rozmiaru anteny otrzymamy wartość 4.53 dBi, natomiast maksymalna wartość kierunkowości otrzymana z symulacji dla stanu A wynosi 5.92 dBi, a dla stanu B 5.85 dBi. Wynika to z zastosowania dwóch źródeł Huygena. Źródło bardziej oddalone od aktywnego w danym stanie dipola sterującego niejako wspomaga główne źródło w uzyskaniu jak lepszej kierunkowości.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

5. PODSUMOWANIE

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie miniaturowej anteny rekonfigurowalnej. W tym celu dokonana została analiza możliwych koncepcji anteny. Wybrana została antena o rekonfigurowalnej charakterystyce promieniowania. Następnie opracowana została koncepcja anteny i jej układu przełączającego

Miniaturowa, rekonfigurowalna, nisko profilowa antena oparta o metamateriałowe źródła Huygensa została zaprojektowana na częstotliwość 2.45 GHz Uzyskana została zmienność charakterystyki promieniowania anteny. Opisany został proces projektowania anteny. Wykonane zostały zmiany w konstrukcji anteny, by osiągnąć jeszcze lepsze parametry. Zaprojektowana antena została przesymulowana. Antena posiada miniaturowy rozmiar *ka* = 0.96. Uzyskano maksymalną kierunkowość anteny dla stanu A równą 5.92 dBi, dopasowanie dla częstotliwości f_0 na poziomie mniejszym niż -15 dB, dla stanów A i B współczynnik *FTBR* < 23 dB oraz pasmo układu większe od 90 MHz.

Zaprojektowana miniaturowa antena rekonfigurowalna spełnia wszystkie postawione jej wymagania projektowe. Nie są to jednak maksymalne wartości parametrów jakie można osiągnąć. Projektowana antena została zoptymalizowana pod względem uzyskania jak najlepszej kierunkowości i współczynnika *FTBR* dla stanów A i B. Nie jest to jedyna możliwość. W zależności od systemu w którym miała by pracować antena mogłaby zostać ona zoptymalizowana pod kątem uzyskania równej wartości dopasowania we wszystkich trzech stanach; pod kątem uzyskania szerszego pasma; być może możliwe jest uzyskanie jeszcze lepszej kierunkowości.

W zaprojektowanej antenie zasilanie doprowadzone zostało za pomocą przewodu koncentrycznego. Przed wyprodukowaniem anteny warto by ją nieznacznie przeprojektować używając do tego celu złącza SMA, co uniezależni (w pewnym stopniu) antenę od jakości przylutowania przewodu i sprawi, że wyniki pomiarów takiej anteny będą bardziej powtarzalne.

Wyprodukowaną antenę można też bezpośrednio zintegrować z węzłem sieci oraz wykorzystać jej możliwości przy stworzenia systemu do estymacji kierunku nadejścia sygnału.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

WYKAZ LITERATURY

1. Balanis C. A.: *Antenna Theory: Analysis and Design.* New York, NY, USA: Wiley, 2005.
2. Parchin O., Basherlou H. J., Al-Yasir I. A.: *Recent Develoapments of Reconfigurable Antennas for Current and Future Wireless Communication Systems.* Electronics Recent Technical Developments in Energy-Efficient 5G Mobile Cells. 2019.
3. Hussain R., Sharawi M.S., Shamim A.: *An integrated four-element slot-based MIMO and a UWB sensing antenna system for CR platforms*. IEEE Trans. Antennas Propag. 2018, 6, 978–983.
4. Horestani A. K., Shaterian Z., Naqui J., Martín F., Fumeaux C.: *Reconfigurable and tunable s-shaped split-ring resonators and application in band-notched UWB antennas*. IEEE Trans. Antennas Propag. 2016, 64, 3766–3776.
5. Zhu H. L., Cheung S. W., Liu X. H., Yuk T. I.: *Design of polarization reconfigurable antenna using metasurface*. IEEE Trans. Antennas Propag. 2014, 62, 2891–2898.
6. Caluyo F. S., Ballado A. H.: *Design, Realization and Measurements of Enhanced Performance 2.4 GHz ESPAR Antenna for Localization in Wireless Sensor Networks.* IEEE COMCAS 2011.
7. Rzymowski M., Kulas L.: *Design of a 7-element Electronically Steerable Passive Array Radiator (ESPAR) antenna for the ISM band.* IEEE Eurocon 2013.
8. Wu Z., Tang M. C., Li M., Ziolkowski R. W.: *Ultra-Low-Profile, Electrically Small, Pattern-Reconfigurable Metamaterial-Inspired Huygens Dipole Antenna.* IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019.
9. Pozar D. M.: *New results for minimum Q, maximum gain, and polarization properties of electrically small arbitrary antennas*. Proc. 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2009), Berlin, Germany, 23-27 March, 2009, pp. 1993–1996.
10. Jin P., Ziolkowski R. W.: *Metamaterial-inspired, electrically small Huygens sources*. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 9, pp. 501–505, 2010.
11. Ding C., Luk K.-M.: *Low-profile magneto-electric dipole antenna*. IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., vol. 15, pp. 1642-1644, 2016.
12. Jin P., Ziolkowski R. W.: *High-directivity, electrically small, lowprofile near-field resonant parasitic anten nas*. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 11, pp. 305– 309, 2012.
13. Erentok A., Luljak P., Ziolkowski R. W.: *Antenna performance near a volumetric metamaterial realization of an artificial magnetic conductor*. IEEE Trans. Antennas and Propagat., vol. 53, no. 1, pp. 160-172, Jan. 2005.
14. Tang M.-C., Wang H., Ziolkowski R. W.: *Design and testing of simple, electrically small, low-profile, Huygens source antennas with broadside radiation performance*. IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 64, no. 11, pp. 4607-4617, Nov. 2016
15. Altair HyperWorks: *User Manual for FEKO 2018.*

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

WYKAZ RYSUNKÓW

2.1 Przykład charakterystyki współczynnika odbicia dla anteny o rekonfigurowalnej częstotliwości ……. 8

2.2. Przykład charakterystyki transmisji dla anteny o rekonfigurowalnej szerokości pasma sterowanej poprzez napięcie polaryzujące diodę …… 9

2.3. Schemat najprostszej anteny ESPAR trój-elementowej ……. 10

2.4. Układ współrzędnych ogólnie przyjęty do analizy charakterystyk promieniowania ….. 11

3.1. Przykłady kształtów drukowanych dipoli elektrycznych. (a) Dipol I-kształtny o zniekształconych końcach. (b) Dipol sprzężony elektrycznie …….. 16

3.2. Przykłady kształtów drukowanych dipoli magnetycznych. (a) Dipol sprzężony elektrycznie. (b) Dipol sprzężony magnetycznie. (c) Nietypowy sposób realizacji dipola magnetycznego ……... 16

3.3. Podstawowa konfiguracja źródła Huygensa. (a) Obraz 3D anteny. (b) Bok anteny, widoczny element CLL. (c) Widok z góry na element EAD. (4) widok z dołu anteny, dipol sterujący …… 17

4.1. Przedstawia rozmieszczenie komponentów w projektowanej antenie rekonfigurowalnej. (a) Przedstawia górną stronę płytki. (b) Przedstawia dolną stronę płytki …….. 19

4.2. Przedstawia zwymiarowane pojedyncze źródło Huygensa. (a) Element CLL wraz z wymiarami. (b) Zwymiarowany element EAD. (c) Rozmieszczenie dipoli w planarnym źródle Huygensa ……..…….. 21

4.3. Konstrukcja układu sterującego anteną rekonfigurowalną ……... 21

4.4. Charakterystyka wpływu długości elementu CLL na współczynnik odbicia ……... 23

4.5. Charakterystyka wpływ długości elementu CLL na rozkład pola dla częstotliwości f_0 = 2.45 GHz. (a) Rozkład pola E. (b) Rozkład pola H …… 24

4.6. Wpływ długości elementu EAD na współczynnik odbicia w antenie …….. 24

4.7. Wpływ długości elementu EAD na rozkład pola dla częstotliwości f_0 = 2.45 GHz. (a) Rozkład pola E. (b) Rozkład pola H ……. 25

4.8. Zwymiarowana górna warstwa płytki ……... 25

4.9. Charakterystyki współczynnika w zależności od stanu układu. (a) Układ ustawiony w stan A. (b) Układ ustawiony w stan B. (c) układ ustawiony w stan C ……. 27

4.10. Charakterystyki rozkładu pola E i H w zależności od stanu układu. (a) Układ w stanie A. (b) Układ w stanie B. (c) Układ w stanie C ……. 29

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

WYKAZ TABEL

3.1. Rozkład pola wokół dipola elektrycznego, magnetycznego oraz źródła Huygensa 14

4.1. Trzy stany diod PIN, które uzyskują trzy charakterystyki promieniowania anteny ….. 22

4.2. Zestawienie wymiarów anteny ……..... 26

4.3. Zestawienie najważniejszych parametrów otrzymanej anteny ……..... 29

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl