

dr inż. Adam Kusiek
Katedra Inżynierii Mikrofalowej i Antenowej
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska

AUTOREFERAT

1. Imię i Nazwisko: **dr inż. Adam Kusiek**
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2011 – Doktor nauk technicznych dziedzina: nauki techniczne, dyscyplina: elektronika, specjalność: elektrodynamika obliczeniowa; miejsce: Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki; rozprawa pt. „Badanie zjawisk rozpraszania fali elektromagnetycznej na niejednorodnych obiektach cylindrycznych”(rozprawa wyróżniona)

2004 – Magister inżynier, specjalność: Mikrofalowe Urządzenia Radiokomunikacyjne, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki; praca pt. „Modelowanie układów niewzajemnych wykorzystujących złącza ferrytowych szczelinowych linii sprzężonych (FCL)”

2004-2011 – Studia doktoranckie na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Politechniki Gdańskiej

1999-2004 – Studia magisterskie na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Politechniki Gdańskiej

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

2017 – Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Inżynierii Mikrofalowej i Antenowej; stanowisko: starszy specjalista; zakres prac: praca badawcza w ramach projektu związana z opracowaniem modułów obliczeniowych na zamówienie firmy Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG (Backnang, Niemcy).

2013-2017 – Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Inżynierii Mikrofalowej i Antenowej; stanowisko: adiunkt; zakres prac: praca badawcza w ramach projektów naukowych i badawczo-rozwojowych związana z techniką mikrofalową i antenową oraz elektrodynamiką obliczeniową

2011–2013 – Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Inżynierii Mikrofalowej i Antenowej; stanowisko: informatyk; zakres prac: praca badawcza w ramach projektów naukowych i badawczo-rozwojowych związana z techniką mikrofalową i antenową oraz elektrodynamiką obliczeniową

2010–2013 – Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki; stanowisko: umowy cywilno-prawne; zakres prac: prowadzenie laboratoriów na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki z przedmiotu Metody i Techniki Programowania

02.2011–06.2011 – Politechnika Gdańska, Wydział Zarządzania i Ekonomii, stanowisko: umowa cywilno-prawna; zakres prac: prowadzenie wykładów, ćwiczeń oraz laboratoriów na Wydziale Zarządzania i Ekonomii Politechniki Gdańskiej z przedmiotów: Programowanie komputerów (Java) oraz Metody Numeryczne w Ekonomii i Finansach.

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,

„Nowe struktury mikrofalowe zawierające materiały ferrytowe oraz dedykowane metody hybrydowe do ich analizy”

b) publikacje wchodzące w skład jednotematycznego cyklu publikacji (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy)

Publikacje w czasopismach indeksowanych w bazie ISI JCR (9):

- [1] **A. Kusiak**, W. Marynowski, J. Mazur, "Investigations of Cylindrical Ferrite Coupled Line Junction Using Hybrid Technique", Progress In Electromagnetics Research PIER, vol. 120, 2011, pages: 143-164 (wkład: **60%**, pkt. MNiSW: 32 , IF 2011: 5.298) ^(UPIER)
- [2] **A. Kusiak**, W. Marynowski, J. Mazur, "Investigations of nonreciprocal devices employing cylindrical ferrite coupled line junction", Journal of Electromagnetic Waves and Applications JEMWA, vol. 26, Issue 13, 2012, pages: 1685-1693 (wkład: **45%**, pkt. MNiSW: 20, IF 2011: 2.965[#]) ^(JEMWA)
- [3] **A. Kusiak**, R. Lech, J. Mazur, "Analysis of Electromagnetic Plane Wave Scattering from 2-D Periodic Arrangements of Posts", Progress in Electromagnetics Research PIER 129, 2012, Pages: 69-90 (wkład: **33.3%**, pkt. MNiSW: 35 , IF 2011: 5.298[#]) ^(UPIER)
- [4] **A. Kusiak**, W. Marynowski, J. Mazur, "Investigations of Four-Port Circulator Utilizing Cylindrical Ferrite Coupled Line Junction", Progress in Electromagnetics Research PIER 134, 2013, Pages: 379-395 (wkład: **60%**, pkt. MNiSW: 35 , IF 2011: 5.298[#]) ^(UPIER)
- [5] **A. Kusiak**, R. Lech, J. Mazur, "Hybrid Technique for the Analysis of Scattering from Periodic Structures Composed of Irregular Objects", Progress in Electromagnetics Research PIER 135, 2013, pp. 657-675 (wkład: **45%**, pkt. MNiSW: 35 , IF 2011: 5.298[#]) ^(UPIER)
- [6] **A. Kusiak**, "Hybrid technique for the analysis of circular waveguide junctions loaded with ferrite posts", IET Microwaves, Antennas And Propagation, Vol 9, No. 8, 2015, Pages: 781-787 (wkład: **100%**, pkt. MNiSW: 25 , IF 2015: 0.709) ^(IET)
- [7] **A. Kusiak**, R. Lech, W. Marynowski, J. Mazur, "An Analysis of Multistrip Line Configuration on Elliptical Cylinder", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 63, No. 6, June 2015, Pages: 1800-1808 (wkład: **50%**, pkt. MNiSW: 35 , IF 2015: 2.284) ^(IEEE)
- [8] R. Lech; P. Kowalczyk; **A. Kusiak**, "Scattering from a cylindrical object of arbitrary cross section with the use of field matching method" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 64, No. 11, November 2016, Pages: 4883-4887 (wkład: **20%**, pkt. MNiSW: 35 , IF 2016: 2.957) ^(IEEE)
- [9] **A. Kusiak**, "Finite element/mode-matching analysis of ferrite/dielectric line junctions of arbitrary cross-section" Journal of Electromagnetic Waves and Applications JEMWA, vol. 32, Issue 1, 2018, pages: 67-76 (wkład: **100%**, pkt. MNiSW: 20 , IF 2016: 0.85) ^(JEMWA)

[#]Po opublikowaniu pracy ukazała się informacja o zawieszeniu czasopisma *Progress in Electromagnetics Research* oraz *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* na liście *ISI Journal Citation Report*. Niemniej, wskazana praca jest indeksowana w bazie *Web of Science* i dlatego podano IF obowiązujący w momencie opublikowania pracy. Obecnie współczynniki IF dla tych czasopism wynoszą odpowiednio: *Progress in Electromagnetics Research*: IF 2016 = 2.404 oraz *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*: IF 2016 = 0.85.

Rozdział w książce:

- [10] **A. Kusiak**, W. Marynowski, R. Lech, J. Mazur, "Nonreciprocal Devices Utilizing Longitudinally Magnetized Ferrite Coupled Lines" in *Advanced Electromagnetic Waves*, INTECH, 2016, pp. 117-145^(INTECH) (wkład: **35%**)

Patenty (2):

- [11] **A. Kusiak**, W. Marynowski, R. Lech, J. Mazur, "Złącze ferrytowych linii sprzężonych", numer patentu: 220419, data przyznania: 17-12-2014^(UPRP) (wkład: **30%**)
- [12] **A. Kusiak**, W. Marynowski, J. Mazur, "Mikrofalowy przesuwnik fazy", numer patentu: P.223890, data przyznania: 18-03-2016^(UPRP) (wkład: **35%**)

Publikacje recenzowane (konferencje zagraniczne) po uzyskaniu stopnia doktora (3):

- [13] **A. Kusiak**, W. Marynowski, J. Mazur, "Cylindrical ferrite coupled slotline junction for Faraday nonreciprocal devices", 19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON, 2012, pages: 699-702 (wkład: **80%**)^(IEEE)
- [14] **A. Kusiak**, W. Marynowski, J. Mazur, "Longitudinally magnetized left-handed cylindrical ferrite coupled line junction for nonreciprocal devices" The 8th European Conference on Antennas & Propagation, 2014 (EuCAP 2014), Hague, Netherlands, 6-11 April 2014, pages: 1034-1037 (wkład: **80%**)^(IEEE)
- [15] **A. Kusiak**, W. Marynowski, J. Mazur, "Nonreciprocal properties of elliptical ferrite coupled line junction", 21st International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, MIKON-2016, pp. 1-4 (wkład: **80%**)^(IEEE)

Abstrakty na konferencjach zagranicznych po uzyskaniu stopnia doktora (8):

- [16] **A. Kusiak**, W. Marynowski, R. Lech, J. Mazur, "Application of Cylindrical Ferrite Coupled Line Junction to Nonreciprocal Devices", The 31st Progress In Electromagnetics Research Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia, 27-30 March, 2012, page: 601 (wkład: **60%**)^(PIERS)
- [17] **A. Kusiak**, W. Marynowski, J. Mazur, "Four-port Circulator Utilizing Longitudinally Magnetized Cylindrical Ferrite Coupled Line Junction", The 32nd Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS in Moscow, Russia, 19-23 August, 2012, page: 474 (wkład: **60%**)^(PIERS)
- [18] R. Lech, **A. Kusiak**, J. Mazur, "Analysis of Electromagnetic Wave Scattering from the Surface of Double Periodic Arrangements of Metal-dielectric Cylinders", The 32nd Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS; Moscow, Russia; 19-23 August, 2012, page: 769 (wkład: **45%**)^(PIERS)
- [19] **A. Kusiak**, W. Marynowski, J. Mazur, "Hybrid Method for Analysis of Conformal Ferrite Guides", The 32nd Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS in Moscow, Russia, 19-23 August, 2012, page: 762 (wkład: **80%**)^(PIERS)
- [20] **A. Kusiak**, R. Lech, J. Mazur, "Investigations of Plane Wave Scattering on Ferrite Posts Configurations Using Hybrid Technique", The 33rd Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS in Taipei, Taiwan, 25-28 March, 2013 page 368 (wkład: **80%**)^(PIERS)
- [21] **A. Kusiak**, W. Marynowski, J. Mazur, "Nonreciprocal Properties of Cylindrical Junction Loaded with Axially-symmetrical Ferrite Post", The 34th Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS in Stockholm, Sweden, 12-15 August, 2013, p. 1033 (wkład: **80%**)^(PIERS)

- [22] **A. Kusiek**, R. Lech, W. Marynowski, "Rigorous Analysis of Multilayered Elliptical Striplines", The 35th Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS, Guangzhou (Canton), China, 25-28 August, 2014, page: 1012 (wkład: **80%**)^(PIERS)
- [23] **A. Kusiek**, W. Marynowski, J. Mazur, „Nonuniform Cylindrical Ferrite Coupled Line Junction”, The 35th Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS, Guangzhou (Canton), China, 25-28 August, 2014, page: 1011 (wkład: **80%**)^(PIERS)

Wszystkie publikacje wchodzące w skład jednotematycznego cyklu publikacji są dostępne online w odpowiednich bazach wydawnictw:

- (IEEE) – IEEE Xplore Digital Library (ieeexplore.ieee.org)
(IET) – IET Digital Library (ieeexplore.ieee.org)
(JPIER) – PIER Journals (jpier.org)
(JEMWA) – Taylor & Francis Online (tandfonline.com/toc/tewa20/current)
(PIERS) – PIERS Abstracts (piers.org)
(INTECH) – INTECH (intechopen.com)
(UPRP) – Urząd Patentowy RP (uprp.pl)

- c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Układy ferrytowe tworzą jedną z ważniejszych grup układów wykorzystywanych w technice mikrofalowej i antenowej [24]-[31]. Własności żyromagnetyczne materiału ferrytowego pozwalają na realizację szeregu użytecznych układów niewzajemnych znajdujących zastosowanie w bezprzewodowych systemach lokalizacyjnych oraz komunikacyjnych. Pośród tych układów wyróżnić można izolatory [24], cyrkulatory [25] i [26] czy przesuwniki fazy [27] i [28]. Przykładowo izolatory pozwalają na separację urządzeń nadawczych od toru sygnałowego, chroniąc tym samym nadajnik przed sygnałami odbitymi lub sprzęgającymi się z innych źródeł. Sygnały takie mogłyby zakłócać poprawne działanie nadajnika lub doprowadzić do jego uszkodzenia. Układy cyrkulatorów umieszczone są w torach sygnałowych pomiędzy anteną a nadajnikiem i odbiornikiem celem odpowiedniego przekierowania sygnałów nadawanych i odbieranych. Z kolei układy przesuwników fazy stosowane są w złożonych szykach antenowych, gdzie odpowiednie przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami zasilającymi promienniki anteny wymagane jest dla uzyskania odpowiedniego kształtu charakterystyki promieniowania.

Własności niewzajemne materiałów ferrytowych określone są przez elementy tensora. Elementy te zależne są od kierunku oraz natężenia zewnętrznego pola magnesującego, co pozwala na realizację układów niewzajemnych o przestrajanych parametrach [27]-[31]. Przykładem takich układów są anteny mikrofalowe o sterowanej wiązce lub paśmie pracy [29], układy przesuwników fazy o regulowanym przesunięciu fazy [27] i [28] czy układy przestrajanych filtrów mikrofalowych [30] i [31]. Niewątpliwą zaletą jest tu możliwość zmiany parametrów układu poprzez odpowiednie układy elektroniczne sterujące zewnętrznym polem magnetycznym.

Tensorowe własności materiału ferrytowego komplikują rozwiązanie zagadnienia brzegowego prowadząc do znacznie bardziej złożonych obliczeń w analizie elektromagnetycznej. Materiały te są zdefiniowane w bibliotekach oprogramowania komercyjnego. Niemniej, możliwości analizy układów zawierających takie materiały są nadal ograniczone. Przykładowo nie ma możliwości definiowania takich materiałów we wrotach struktury. W związku z tym nie jest możliwe określenie własności

dyspersyjnych przewodnic, w których podłoża zawierają materiały ferrytowe. Ponadto, z uwagi na fakt, iż w oprogramowaniu komercyjnym wykorzystywane są głównie metody dyskretne, analiza złożonych układów zawierających materiały ferrytowe staje się czasochłonna.

Głównym celem naukowym jednotematycznego cyklu publikacji habilitanta było opracowanie oraz zbadanie własności nowych struktur ferrytowych do zastosowań w realizacji układów mikrofalowych oraz rozwinięcie szybkich i efektywnych numerycznie metod hybrydowych do ich analizy. W ramach prowadzonych prac skoncentrowano się na dwóch grupach struktur tj.

- magnesowanych wzdłużnie złączach ferrytowych wykorzystujących zjawisko rotacji Faradaya. Badania dotyczyły nieznanych dotychczas w literaturze złączy wykonanych w formie linii sprzężonych umieszczonych na rdzeniu ferrytowym o przekroju kołowym lub eliptycznym oraz możliwości zastosowania takich złączy do realizacji układów niewzajemnych.
- otwartych oraz falowodowych strukturach zawierających magnesowane elementy ferrytowe. Prowadzone badania obejmowały warstwy periodyczne, złącza falowodów cylindrycznych oraz prostokątnych, jak również zastosowanie tego typu struktur do realizacji układów ferrytowych o przestrajanych parametrach.

Wynikiem realizowanych prac, przedstawionych w ramach jednotematycznego cyklu publikacji, były projekty nowych struktur oraz zrealizowanych w oparciu o nie mikrofalowych układów ferrytowych. Ponadto, w ramach wykonanych prac opracowano szybkie i efektywne numerycznie narzędzia dedykowane do analizy zaproponowanych struktur. Narzędzia te oparte zostały na metodach hybrydowych. Głównym założeniem takich metod jest wykorzystanie zalet oraz eliminacja wad łączonych ze sobą dwóch lub większej liczby podejść w analizie konkretnego problemu. W zaproponowanych modelach wykorzystano głównie połączenie różnych metod analitycznych lub metod analitycznych z dyskretnymi. Pozwoliło to na znaczące skrócenie czasów obliczeń badanych struktur względem dostępnego na rynku oprogramowania komercyjnego.

Należy zaznaczyć, iż prowadzone przez habilitanta badania miały na celu poznanie własności mało znanych lub dotychczas nieznanymi w literaturze przedmiotu struktur ferrytowych. Niewątpliwie badania te mogą stanowić wstęp do dalszych prac, mających na celu wykorzystanie zaproponowanych struktur do realizacji konkretnych urządzeń dla systemów bezprzewodowych. Ponadto, pomimo faktu, iż opracowane metody hybrydowe wykorzystane zostały głównie do analizy zaproponowanych konfiguracji, mogą one być również zastosowane do znacznie szerszej grupy struktur, oferując znacząco większą szybkość analizy, niż dostępne na rynku oprogramowanie komercyjne. Przykładowo metody te mogą być wykorzystane do analizy otwartych oraz falowodowych struktur zawierających materiały izotropowe oraz anizotropowe, których własności definiowane są przez tensor przenikalności magnetycznej lub elektrycznej (np. cienkie warstwy grafenu, półprzewodniki).

Główna część prac prowadzona była w ramach dwóch projektów, których habilitant był kierownikiem:

- 0215/T02/2010/70; "Badanie zjawisk rozpraszania fali elektromagnetycznej w układach mikrofalowych zawierających niejednorodne obiekty ferrytowe i ich zastosowanie do realizacji układów niewzajemnych w paśmie mikrofal i fal milimetrowych", 2011, projekt MNiSW w ramach programu "Iuventus Plus"
- 0282/IP3/2011/71; "Badanie właściwości nowych materiałów oraz struktur falowych zawierających niejednorodne obiekty ferrytowe i ich zastosowanie do realizacji układów niewzajemnych w paśmie mikrofal i fal milimetrowych", 2012-2014, projekt MNiSW w ramach programu "Iuventus Plus"

Ponadto, częściowo prace prowadzone były w ramach trzech innych projektów, w których habilitant był głównym wykonawcą:

- 5017/B/T02/2011/40; „Badanie zjawisk rozpraszania w strukturach periodycznych zawierających trójwymiarowe obiekty rozpraszające”, 2011-2012, projekt MNiSW
- 0340/IP2/2011/71; "Badanie dielektryczno-ferrytowych przewodnic wielopaskowych ze zredukowaną masą oraz ich wykorzystanie do realizacji wzajemnych i niewzajemnych układów dla współczesnych systemów komunikacji bezprzewodowej", 2012-2014, projekt MNiSW w ramach programu "Iuventus Plus"
- 2013/11/B/ST7/04309; "Badanie zjawisk polowych występujących przy rozpraszaniu fali elektromagnetycznej w nowych materiałach i ich zastosowanie w technice mikrofalowej i fal milimetrowych", 2014-2017, projekt badawczy NCN

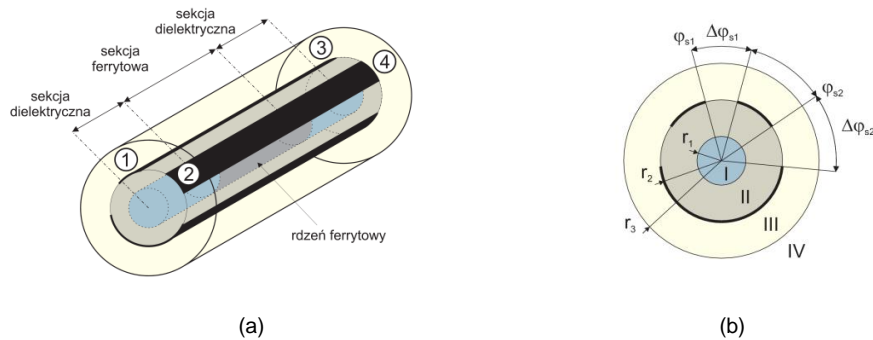
Poniżej omówiono główne wyniki badań zawarte w ramach jednotematycznego cyklu publikacji wchodzącego w skład głównego osiągnięcia naukowego habilitanta.

Badania własności magnesowanych wzdluznie złącz ferrytowych realizowanych w technologii linii paskowo-szczelinowych

Przedmiotem badań habilitanta były magnesowane wzdluznie złącza ferrytowych linii sprzężonych, których zasada działania oparta jest na zjawisku rotacji Faradaya [32]. Struktury takie realizowane są w postaci sprzężonych linii umieszczonych na magnesowanym wzdluz kierunku propagacji podłożu ferrytowym. Długość złącza dobierana jest tak aby uzyskać 45° kąt rotacji Faradaya. Wówczas, łącząc takie złącze z odpowiednimi układami pobudzającymi, możliwa jest realizacja takich układów niewzajemnych jak izolatory oraz wielowrotowe cyrkulatory.

Prowadzone na przestrzeni lat badania dotyczyły złącz planarnych realizowanych zarówno w technologii linii paskowych jak i szczelinowych [33]-[36]. Zaprojektowane oraz wykonane prototypy układów wykorzystujących tego typu złącza charakteryzowały się szerokim pasmem pracy. Niemniej ze względu, na stosunkowo dużą długość sekcji ferrytovej, wymaganą dla uzyskania odpowiedniego kąta rotacji Faradaya, w złączach takich występowały duże straty. W efekcie uniemożliwiło to wykorzystanie projektowanych w oparciu o takie złącza układów niewzajemnych w komercyjnych systemach bezprzewodowych.

W ramach prac, zawartych w jednotematycznym cyklu publikacji, habilitant skoncentrował się na złączach ferrytowych linii sprzężonych wykonanych na rdzeniu o przekroju kołowym lub eliptycznym (patrz rys. 1). Złącze takie, zaproponowane przez habilitanta w pracy [1], posiada geometrię zbliżoną do falowodu kołowego wypełnionego materiałem ferrytowym. Z uwagi na fakt, iż w takim falowodzie kołowym obserwowane jest optymalne zjawisko rotacji Faradaya, stąd habilitant założył, iż zaproponowane złącze pozwoli na uzyskanie lepszych własności niewzajemnych (wyższa izolacja) oraz mniejszych strat w porównaniu do dotychczas rozwijanych struktur planarnych. Ponadto, złącze takie zrealizowane w technice linii paskowych/szczelinowych, pozwoli na jego integrację z innymi układami pasywnymi, dając tym samym możliwość tworzenia nowych konfiguracji układów niewzajemnych, zwanych w dalszej części zintegrowanymi układami niewzajemnymi.



Rys. 1 Zaproponowane cylindryczne złącza ferrytowych linii sprzężonych o przekroju kołowym: (a) widok ogólny oraz (b) przekrój poprzeczny struktury

Na uwagę zasługują fakt, iż złącza takie nie były przedtem znane w literaturze. Jak już wcześniej wspomniano badania te ograniczone były głównie do mikropaskowych oraz szczelinowych złączy planarnych [33]-[36]. Celem prac habilitanta było zatem zbadanie własności zaproponowanego złącza cylindrycznego pod kątem możliwości wykorzystania jego do realizacji układów niewzajemnych opartych na efekcie rotacji Faradaya. Celem zwiększenia przejrzystości opisu osiągnięć habilitanta, dalsza część podzielona została na opis metod hybrydowych opracowanych do analizy i projektowania zaproponowanych złączy ferrytowych oraz opis badań własności i wykorzystania zaproponowanych złączy do realizacji zintegrowanych układów niewzajemnych.

Opracowane modele hybrydowe do analizy magnesowanych wzdłużnie złączy ferrytowych

Z uwagi na fakt, iż badane złącza zawiera stosunkowo długą (porównywalną do długości fali) sekcję ferrytową o jednorodnym kształcie wzdłuż kierunku propagacji fali, jego analiza przy wykorzystaniu oprogramowania komercyjnego jest nieefektywna. Wpływ na to ma fakt, iż skomplikowany przekrój poprzeczny struktury, zawierający materiały o wysokiej przenikalności elektrycznej oraz konfigurację pasków metalowych na zakrzywionych powierzchniach, narzuca konieczność stosowania bardzo gęstej siatki dla uzyskania dokładnych wyników. Z kolei brak możliwości zdefiniowania materiału ferrytowego we wrotach uniemożliwia rozdzielenie struktury na prostsze struktury pośrednie, które mogłyby być analizowane osobno. W związku z tym jedyną możliwością jest analiza całego złącza, co przy konieczności stosowania gęstej siatki powoduje, iż symulacja własności badanego złącza z wykorzystaniem oprogramowania komercyjnego staje się czasochłonna i nieefektywna. Uwzględniając dodatkowo fakt, iż projekt złącza o odpowiednim kącie rotacji Faradaya wymaga optymalizacji jego długości oraz wymiarów poprzecznych, wykorzystanie w tym celu oprogramowania komercyjnego nie było możliwe. Zatem jednym z głównych nurtów prac habilitanta było opracowanie opisanych w dalszej części modeli hybrydowych pozwalających na przyspieszenie analizy i projektowania zaproponowanych złączy ferrytowych.

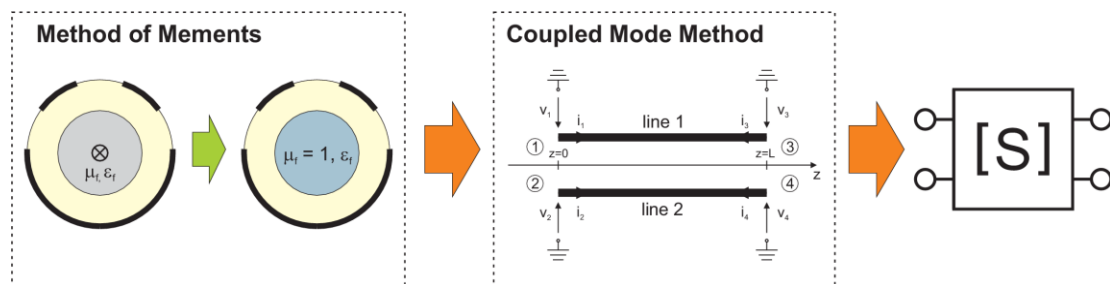
W ogólności projekt złącza ferrytowych linii sprzężonych ma na celu określenie jego wymiarów oraz parametrów materiałowych, przy których uzyskiwany jest w takim złączu 45° kąt rotacji Faradaya. Warunek ten definiowany jest poprzez elementy macierzy rozproszenia złącza [37]. Stąd, z punktu widzenia optymalizacji, kluczowym było rozwinięcie szybkich i efektywnych numerycznie technik umożliwiających określenie macierzy rozproszenia dla rozważanych cylindrycznych złączy ferrytowych linii sprzężonych.

W ramach prowadzonych badań habilitant opracował modele przybliżone (stanowiące połączenie technik pełnofalowych z analizą obwodową), jak również modele dokładne (oparte na połączeniu metod pełnofalowych) pozwalające na określenie parametrów rozproszenia badanych cylindrycznych złączy ferrytowych. Opracowane modele przybliżone, opisane w pracach [1], [7], [15] i [22], pozwoliły na znaczące skrócenie czasu obliczeń, przez co mogły być zastosowane w procesie optymalizacji do

wstępnego określenia wymiarów geometrycznych projektowanych złączy cylindrycznych. Z kolei rozwinięte w dalszej kolejności modele pełnofalowe, opisane w pracach [4], [9] i [19], oparte zostały na połączeniu technik dyskretnych z analitycznymi. Poza zwiększeniem dokładności obliczeń, modele te pozwoliły dodatkowo na określenie własności dyspersyjnych przewodnic ferrytowych (co nie jest obecnie możliwe w oprogramowaniu komercyjnym), jak również na uwzględnienie w analizie złączy o nieregularnym przekroju poprzecznym oraz wzdłużnym lub poprzecznym kierunku magnesowania. Poniżej opisano szczegółowo opracowane modele matematyczne.

Modele przybliżone

W pracach [1], [7], [15] i [22] zaproponowano modele hybrydowe oparte na połączeniu metody momentów (MoM – ang. Method of Moments) z metodą rodzajów sprzężonych (CMM – ang. Coupled-Mode Method) do analizy złączy ferrytowych linii sprzężonych o przekroju kołowym i eliptycznym (patrz rys. 2). W podejściu tym metoda momentów, sformułowana w cylindrycznym lub eliptycznym układzie współrzędnych, wykorzystywana jest do określenia charakterystyk dyspersyjnych, rozkładów pól oraz impedancji charakterystycznych rodzajów rozchodzących się w przewodnicy bazowej. Przewodnica bazowa definiowana jest w oparciu o przewodnicę ferrytową poprzez zastąpienie materiału ferrytowego dielektrykiem o tej samej przenikalności elektrycznej (co materiał ferrytowy) i względnej przenikalności magnetycznej $\mu=1$. Następnie, wykorzystując uzyskane wyniki w metodzie rodzajów sprzężonych, określana jest macierz rozproszenia badanego złącza.



Rys. 2 Metoda przybliżona oparta na połączeniu metody momentów z metodą rodzajów sprzężonych do analizy złączy ferrytowych o kołowym lub eliptycznym przekroju poprzecznym.

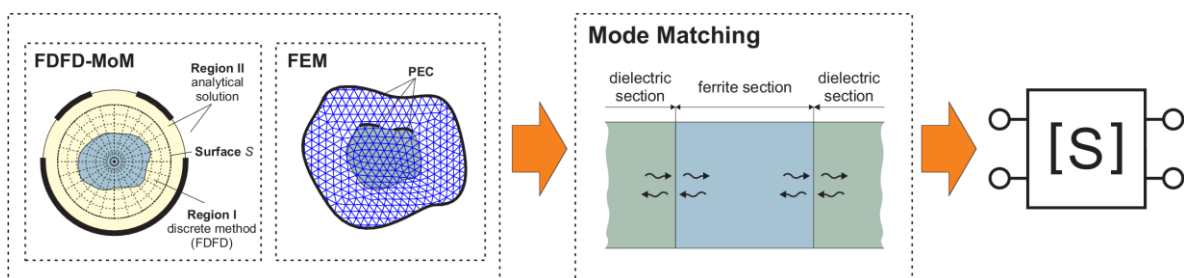
Szczegółowy opis sformułowania metody dla złączy ferrytowych o przekroju kołowym przedstawiono w pracy [1]. W przypadku złączy ferrytowych o przekroju eliptycznym, w pierwszej kolejności został opracowany i opisany w pracach [7] i [22] pełnofalowy model matematyczny pozwalający na analizę linii o przekroju eliptycznym wykonanych z materiałów izotropowych. W modelu tym wykorzystano metodę momentów zdefiniowaną w eliptycznym układzie współrzędnych. W pracy rozważono zarówno otwarte oraz ekranowane wielowarstwowe przewodnice, w których kolejne warstwy dielektryczne mogą mieć stałą lub zmienną grubość. Na uwagę zasługują fakt, iż rozwiązanie takiego zagadnienia nie było znane w literaturze, a dotychczas publikowane prace przedstawiały rozwiązanie oparte na przybliżeniu quasi-statycznym. W pracy [15] rozwiązanie to połączono z metodą rodzajów sprzężonych uzyskując model przybliżony, pozwalający na określenie parametrów rozproszenia paskowo/szczelinowych złączy ferrytowych o przekroju eliptycznym.

Należy tutaj zaznaczyć, iż zaproponowane modele są modelami przybliżonymi, gdyż do określania własności pola elektromagnetycznego w obszarze ferrytowym wykorzystywane są fale rozchodzące się w izotropowej przewodnicy bazowej. Niemniej, w przypadku rozważanych złączy ferrytowych o przekroju kołowym i eliptycznym, uzyskano bardzo dobrą zgodność rezultatów z wynikami oprogramowania komercyjnego.

Niewątpliwą zaletą zaproponowanych modeli przybliżonych jest duża szybkość analizy, która pozwala na znaczące skrócenie czasu obliczeń w porównaniu do oprogramowania komercyjnego. Duża efektywność zaproponowanych modeli wynika z faktu, iż jak wcześniej wspomniano, parametry rozproszenia struktury określane są jedynie w oparciu o pełnofalowe rozwiązanie dla dielektrycznej (izotropowej) przewodnicy bazowej. Jak pokazano w pracach [1], [7], [15] i [22], w przypadku prostych geometrii takich jak przewodnice o przekroju kołowym lub eliptycznym, rozwiązanie takie może być uzyskane z wykorzystaniem szybkich i dokładnych technik analitycznych.

Modele pełnofalowe

Dalsze prace ukierunkowane były na opracowanie metod pełnofalowych, które pozwoliłyby na uzyskanie dokładniejszego rozwiązania zagadnienia. Ponadto prace te miały na celu zwiększenie uniwersalności opracowanych modeli, w tym uwzględnienie w analizie struktur o bardziej złożonym przekroju poprzecznym oraz uwzględnienie w analizie struktur o magnesowaniu poprzecznym. Wyniki badań zawarto w pracach [4], [9] i [19], gdzie zaproponowano dwa pełnofalowe modele hybrydowe. Modele te oparte są na połączeniu metod analitycznych z dyskretnymi i umożliwiają określenie macierzy rozproszenia omawianych złączy. W rozważanych modelach macierz rozproszenia złącza określana jest przy wykorzystaniu metody dopasowania rodzajów (MM – ang. Mode Matching). W analizie zakłada się, iż pole elektromagnetyczne, zarówno w liniach dielektrycznych jak i ferrytowej tworzących złącze, reprezentowane jest w postaci superpozycji fal rozchodzących się w takich liniach. Uwzględniając warunki ciągłości pola w płaszczyznach granicznych pomiędzy sekcjami dielektrycznymi a sekcją ferrytową formułowana jest macierz rozproszenia struktury zdefiniowana w oparciu o rodzaje pola linii dielektrycznych. Ostatecznie korzystając z symetrii fal rozchodzących się w liniach dielektrycznych otrzymuje się macierz rozproszenia złącza czterowrotowego.



Rys. 3 Metoda pełnofalowa oparta na połączeniu metod dyskretnych z analitycznymi do analizy złączy ferrytowych linii sprzężonych wykonanych na rdzeniu ferrytowym o dowolnym przekroju poprzecznym

Celem określenia własności dyspersyjnych oraz rozkładów pól rodzajów rozchodzących się w liniach tworzących złącze zaproponowane zostały dwa podejścia. W pracach [4] i [19] do analizy cylindrycznych złączy ferrytowych zaproponowany został model pełnofalowy oparty na połączeniu metody różnic skończonych (FDFD – ang. Finite-Difference Frequency-Domain) z metodą momentów. W modelu tym metoda różnic skończonych zdefiniowana w cylindrycznym układzie współrzędnych wykorzystywana jest w niewielkim obszarze kołowym zawierającym rdzeń ferrytowy (patrz rys. 3). Następnie rozwiązanie z metody różnic skończonych łączone jest poprzez warunki ciągłości pól na brzegu dziedziny dyskretnej z metodą momentów dla określenia własności dyspersyjnych oraz rozkładów pól rodzajów rozchodzących się w przewodnicy. Główną zaletą przyjętego sformułowania jest możliwość analizy otwartych oraz ekranowych linii wykonanych na rdzeniu dielektrycznym/ferrytowym o dowolnym przekroju poprzecznym. Ponadto, możliwe jest określenie parametrów falowych linii dla dowolnego magnesowania rdzenia ferrytowego (np. magnesowania poprzecznego).

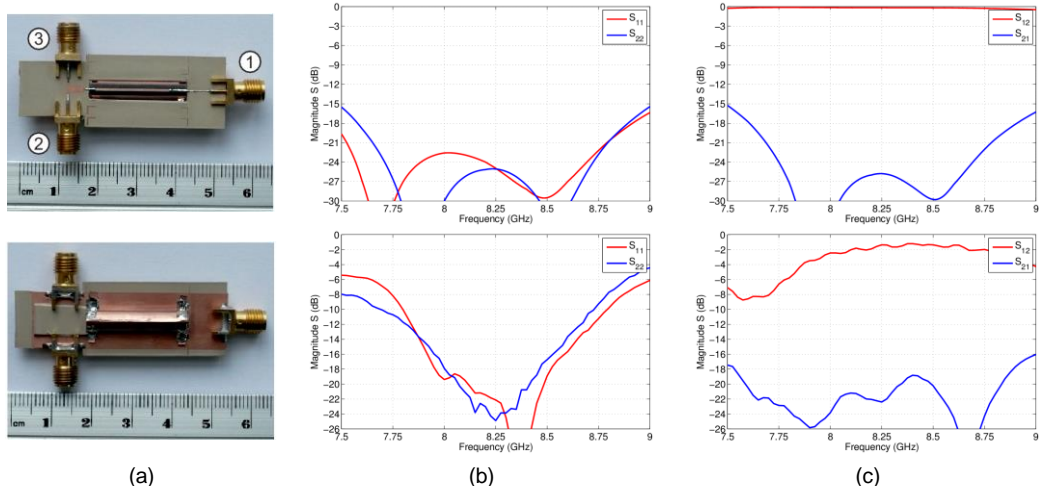
W pracy [9] do rozwiązania zagadnienia brzegowego dla linii tworzących złącze ferrytowe użyta została metoda elementów skończonych (FEM – ang. Finite Element Method) wykorzystująca elementy krzywoliniowe. Metoda ta okazała się znacząco szybsza i bardziej uniwersalna w odniesieniu do stosowanej w poprzednich modelach metody momentów opartej na sprowadzeniu problemu do układu równań jednorodnych, których rozwiązanie wymaga znalezienia zer wyznacznika. Ponadto dodatkowe skrócenie czasu obliczeń osiągnięto poprzez zastosowanie w metodzie elementów skończonych tej samej siatki w analizie przewodnicy dielektrycznej jak i ferrytovej. Podejście takie pozwoliło na przyspieszenie wyznaczenia całek definiujących sprzężenia pomiędzy rodzajami pól w metodzie dopasowania rodzajów dzięki wykorzystaniu wyliczanych na wstępnym etapie obliczeń całek elementarnych funkcji bazowych. Poprawność modelu zweryfikowano zarówno dla badanych złączy cylindrycznych jak i planarnych uzyskując kilkudziesięciokrotne przyspieszenie czasu obliczeń oraz bardzo dobrą zgodność z oprogramowaniem komercyjnym i wynikami metod analitycznych prezentowanymi w literaturze.

Na uwagę zasługuje również fakt, iż opracowane przez habilitanta dokładne modele pełnofalowe umożliwiły określanie charakterystyk dyspersyjnych sekcji ferrytowych linii sprzężonych, co nie było możliwe w modelach przybliżonych ani nie jest możliwe w obecnie dostępnym na rynku oprogramowaniu komercyjnym. Ponadto modele te pozwoliły na znaczące skrócenie czasu obliczeń (co najmniej dziesięciokrotne) względem oprogramowania komercyjnego.

Wyniki badań własności cylindrycznych złączy ferrytowych oraz ich zastosowanie do realizacji zintegrowanych układów niewzajemnych

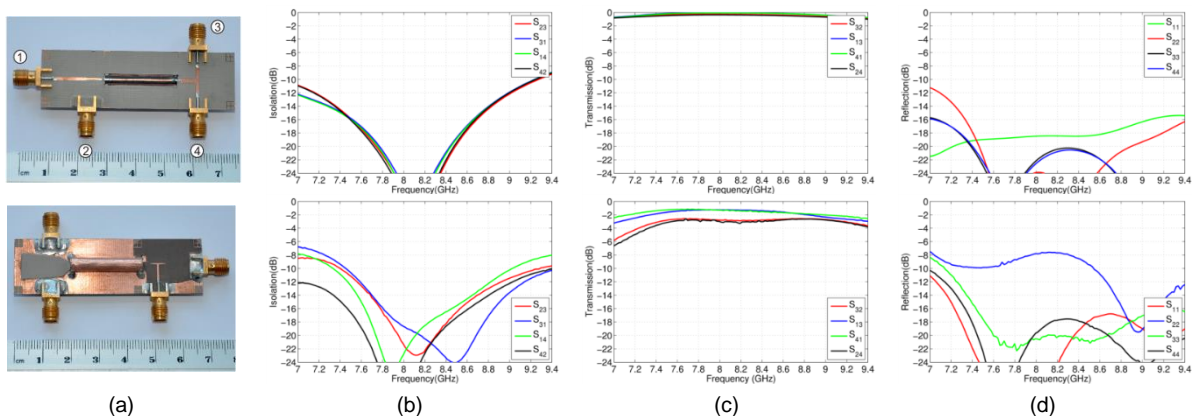
W pracach [1], [13] i [16] przeprowadzono badania własności magnesowanego wzdłużnie złącza ferrytowych linii sprzężonych o przekroju kołowym. Badania te pokazały, iż w złączu takim możliwe jest uzyskanie wymaganego w układach niewzajemnych 45° kąta rotacji Faradaya przy znacznie krótszej długości sekcji ferrytovej, niż w znanych z literatury złączach planarnych. W rezultacie pozwala to na uzyskanie mniejszych wymiarów projektowanych w oparciu o takie złącze układów niewzajemnych. Ponadto, złącze takie, ze względu na mniejszą długość, umożliwia uzyskanie niższego poziomu strat w porównaniu do układów planarnych [33]-[36]. Należy tu nadmienić, iż wysoki poziom strat obserwowany w układach planarnych uniemożliwił ich wykorzystanie w komercyjnych systemach bezprzewodowych. Uzyskane wyniki numeryczne potwierdziły możliwość zastosowania badanego złącza do realizacji zintegrowanych układów niewzajemnych. Ze względu na uzyskane w ramach opisanych powyżej badań interesujące własności cylindrycznego złącza ferrytowych linii sprzężonych, zostało ono zgłoszone do Urzędu Patentowego RP, gdzie po pozytywnym rozpatrzeniu wniosku, uzyskało ochronę [11].

W pracach [2], [4] i [16] rozważane złącze wykorzystane zostało do realizacji dwóch układów cyrkulatorów przedstawionych na rys. 4 i 5. W ramach tych prac zaproponowano konfigurację układu w formie złącza cylindrycznego zasilanego z układów planarnych, zapewniających jego odpowiednie pobudzenie. W pracach [2] i [16] zaprojektowany został układ trójwrotowego cyrkulatora w oparciu o cylindryczne złącze ferrytowych linii szczelinowych (patrz rys. 4). Układ taki zrealizowany został w postaci kaskadowego połączenia rozgałęzienia typu T wykonanego w technologii linii mikropaskowych, sekcji ferrytovej oraz układu wyjściowego w postaci transformatora ze sprzężonych linii szczelinowych na niesprężone linie mikropaskowe. Uzyskane na drodze symulacji parametry rozproszenia układu cyrkulatora zostały zweryfikowane eksperymentalnie. W tym celu został wykonany oraz pomierzony prototyp układu. Uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników symulacji z pomiarami. Ponadto obserwowane straty w przypadku pojedynczego przejścia sygnału przez sekcję ferrytową w układzie były na poziomie 1.8dB (patrz rys. 4). Uzyskany poziom strat był niższy niż w przypadku opisywanych w literaturze układów planarnych [33]-[36], gdzie straty były na poziomie 3dB.



Rys. 4 Cyrkulator trójwrotowy wykorzystujący cylindryczną sekcję ferrytowych linii sprzężonych: (a) fotografia układu oraz obliczone (górną) i pomierzone (dół) charakterystyki (b) strat odbiciowych i (c) transmisji oraz izolacji układu

W układzie z rys. 4 transmisja pomiędzy przeciwległymi wrotami (2) i (3) wymaga podwójnego przejścia sygnału przez sekcję ferrytową. Z uwagi na fakt, iż głównym źródłem strat jest materiał ferrytowy, wadą takiego układu są duże straty obserwowane w przypadku przejścia sygnału pomiędzy tymi wrotami. Obserwowany poziom strat w rozważanym przypadku jest około dwukrotnie wyższy niż w przypadku transmisji sygnału wymagającej pojedynczego przejścia przez sekcję. Stąd w pracach [4] i [17] rozważono układ cyrkulatora cztero-wrotowego przedstawiony na rys. 5. Pobudzenie zaprojektowanego układu zrealizowano przy wykorzystaniu planarnej wielowarstwowej struktury układu magicznego-T. W odróżnieniu od układu [3], zaletą takiej konfiguracji jest uzyskanie jednokrotnego przejścia sygnału przez sekcję ferrytową w kierunku transmisji cyrkulatora. Pozwala to tym samym na minimalizację strat występujących w układzie. Zaprojektowany układ został wykonany i pomierzony. Otrzymano bardzo dobrą zgodność wyników pomiarów z wynikami symulacji (patrz rys. 5). Podobnie jak w przypadku poprzedniego układu, uzyskany poziom strat był niższy niż w przypadku znanych w literaturze układów planarnych.

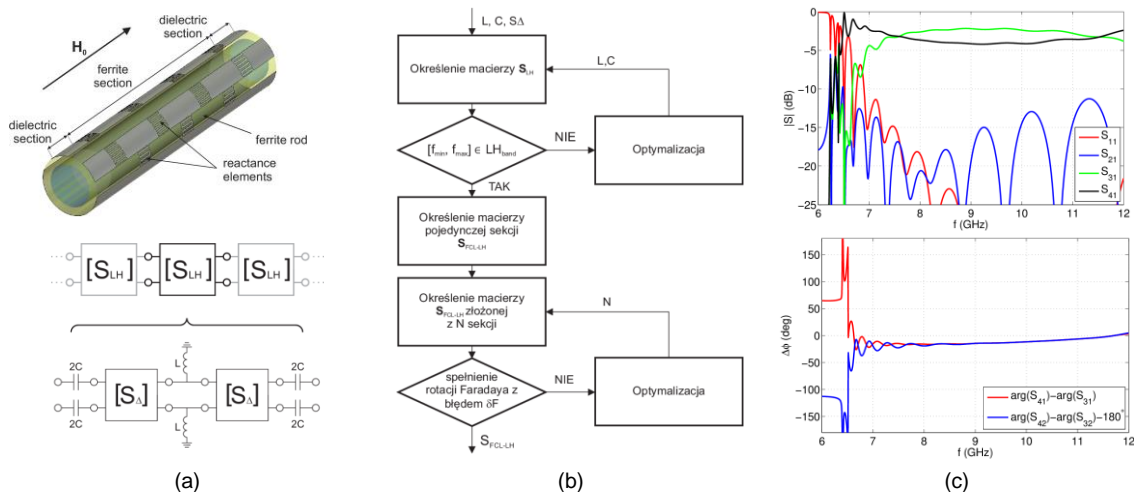


Rys. 5 Cyrkulator czterowrotowy wykorzystujący cylindryczną sekcję ferrytowych linii sprzężonych: (a) fotografia układu oraz obliczone (górną) i pomierzone (dół) charakterystyki (b) strat odbiciowych, (c) transmisji oraz d) izolacji układu

W pracy [14] przedstawiono wyniki badań możliwości miniaturyzacji magnesowanych wzdłużnie cylindrycznych złączy ferrytowych przy wykorzystaniu quasi-periodycznych linii LH (ang. Left-Handed). Prowadnice LH zyskały dużą popularność z uwagi na możliwość zastosowania ich do miniaturyzacji układów mikrofalowych [38]. Prowadnice takie realizowane są poprzez kaskadowe połączenie krótkich odcinków linii z elementami reaktancyjnymi L i C. Uzyskiwana linia periodyczna posiada pasma przepustowe, w których ma charakter linii LH lub konwencjonalnej prowadnicy zwanej w literaturze

RH (ang. Right-Handed). Uzyskiwane własności dyspersyjne w pasmach LH powodują, iż zadane przesunięcie fazowe w takich liniach możliwe jest do uzyskania przy ich znacznie krótszej długości. Własność ta została wykorzystana w literaturze do miniaturyzacji sprzęgaczy, dzielników mocy [38] oraz magnesowanych poprzecznie układów niewzajemnych [39].

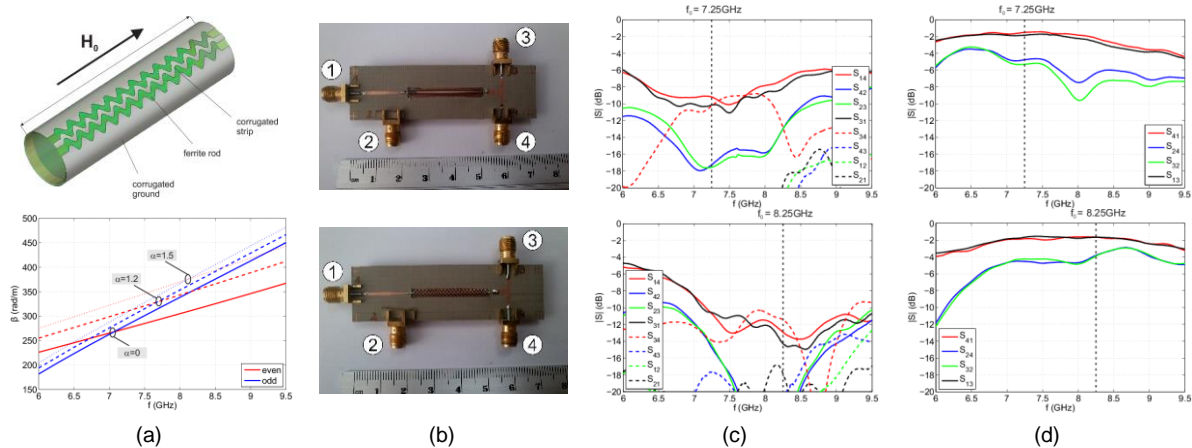
W ramach prowadzonych prac opracowano model matematyczny pozwalający na określenie parametrów rozproszenia quasi-periodycznych cylindrycznych złączy ferrytowych, w których pojedyncza sekcja tworzona jest w postaci krótkich odcinków linii ferrytowej połączonych odpowiednio z elementami skupionymi L i C (patrz rys. 6).



Rys. 6 Cylindryczne złącze ferrytowych linii sprzężonych wykorzystujące sekcje quasi-periodycznych linii LH: (a) widok ogólny złącza oraz schemat zastępczy pojedynczej sekcji, (b) algorytm projektowania złącza o określonym kącie rotacji Faradaya, (c) parametry rozproszenia złącza wykorzystującego sekcje linii LH o zredukowanej o 38% długości

Wstępne badania takich złączy potwierdziły występowanie pasm LH, których położenie zmienia się znacząco w funkcji wartości elementów reaktancyjnych. Tym samym projektowanie takiej struktury bezpośrednio przy wykorzystaniu algorytmów optymalizacyjnych staje się trudne i czasochłonne. W związku z powyższym opracowano algorytm, pozwalający na szybkie i efektywne projektowanie quasi-periodycznych złączy ferrytowych LH (patrz rys 6). Zgodnie z zaproponowanym algorytmem, w pierwszym kroku przyjmowany jest odcinek linii dielektrycznej (bazowej) o określonej długości i wymiarach poprzecznych takich jak miniaturyzowane złącze cylindryczne. W kolejnym kroku taki odcinek linii łączony jest w kaskadzie z elementami L i C tworząc pojedynczą sekcję struktury LH. Następnie, na podstawie obliczonej macierzy rozproszenia pojedynczej sekcji LH, określane są zależności dyspersyjne linii periodycznej otrzymywanej poprzez kaskadowe połączenie pojedynczych sekcji. Wówczas, dla rozważanej przewodnicy periodycznej optymalizowane są elementy L i C tak, aby pasmo pracy LH takiej linii obejmowało docelowy zakres pracy złącza ferrytowego. W kolejnym kroku macierze rozproszenia linii podstawowej w pojedynczej sekcji LH zastępowane są macierzami rozproszenia linii ferrytowych. Łącząc kaskadowo odpowiednią liczbę takich sekcji otrzymywane jest cylindryczne złącze ferrytowe LH, przy czym liczba sekcji dobierana jest tak, aby złącze zapewniało uzyskanie 45° kąta rotacji Faradaya. Opracowany algorytm został zastosowany do miniaturyzacji wybranych złączy cylindrycznych. Uzyskane wyniki badań pokazały, iż możliwe jest uzyskanie 45° kąta rotacji Faradaya dla długości sekcji ferrytowej o około 30-40% krótszej względem sekcji jednorodnych (patrz rys. 6). Ponadto przeprowadzone badania potwierdziły możliwość realizacji układów niewzajemnych w oparciu o takie złącza. Wyniki badań pokazały, iż szczególnie atrakcyjne pod tym kątem są przewodnice cylindryczne, dla których możliwa jest eliminacja pasm zaporowych zminiaturyzowanego złącza poprzez odpowiedni dobór geometrii struktury.

W pracy [23] zbadano własności cylindrycznego złącza ferrytowych linii sprzężonych o periodycznie zmiennej geometrii. Sekcje takie pozwalają na poszerzenie pasma pracy układów niewzajemnych względem układów wykorzystujących sekcje jednorodne [40]. Ponadto periodyczne sekcje ferrytowych linii sprzężonych o tej samej długości jak sekcje jednorodne pozwalają na przesunięcie pasma pracy układu w stronę wyższych częstotliwości. Dzięki temu, przy zadanych ograniczeniach technologicznych, determinujących minimalną wielkość wykonywanych układów, możliwe jest projektowanie układów pracujących w wyższych pasmach pracy. Badania przeprowadzono dla cylindrycznego złącza ferrytowych linii szczelinowych.

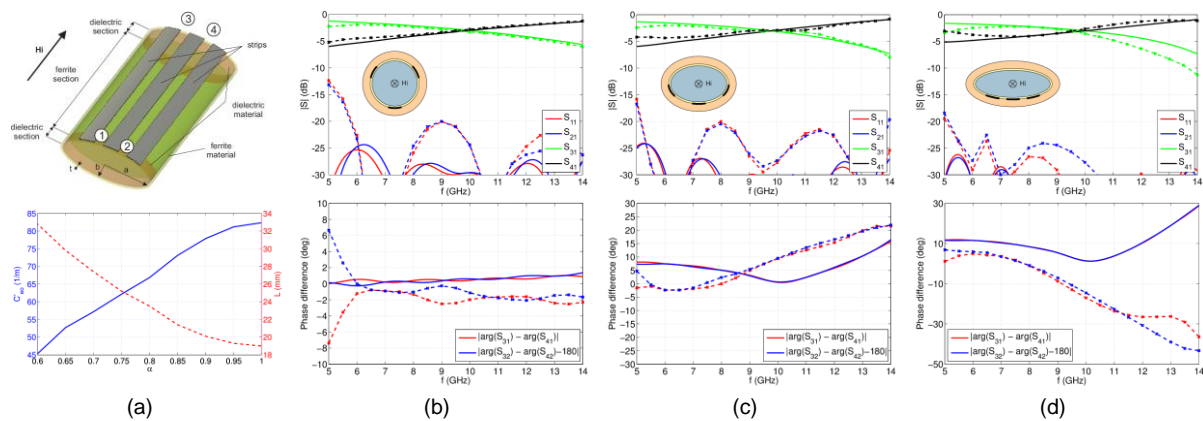


Rys. 7 Układ cyrkulatora czterowrotowego wykorzystujący cylindryczną sekcję ferrytowych linii sprzężonych o periodycznie zmiennej geometrii: (a) widok złącza oraz charakterystyki dyspersyjne przewodnicy bazowej, (b) fotografia układu oraz pomierzone charakterystyki (c) strat odbiciowych oraz (d) izolacji układu wykorzystującego jednorodne (górną) oraz o periodycznie zmiennej geometrii (dół) złącze ferrytowe

Jak już wcześniej zostało wspomniane, własności niewzajemne złącza ferrytowych linii sprzężonych związane są z występującym w takim złączu efektem rotacji Faradaya. Optymalne warunki pracy uzyskiwane są dla przypadku, gdy w złączu występuje tylko sprzężenie żyotropowe. Warunek ten spełniony jest, gdy prędkości fazowe rodzaju parzystego i nieparzystego rozchodzących się w strukturze bazowej takiego złącza są sobie równe. Własności takie posiada m.in. analizowane złącze cylindryczne ferrytowych sprzężonych linii szczelinowych (patrz rys. 7). W przypadku zastosowania linii o periodycznie zmiennej geometrii możliwe jest przesunięcie w częstotliwości punktu wyrównania prędkości fazowych w strukturze bazowej. Celem przesunięcia punktu przecięcia charakterystyk dyspersyjnych w stronę wyższych częstotliwości konieczne jest opóźnienie rodzaju parzystego rozchodzącego się w takiej linii. Z uwagi na fakt, iż pole rodzaju parzystego skoncentrowane jest głównie w okolicach środkowego paska, stąd opóźnienie tego rodzaju w linii może być uzyskane poprzez zastosowanie paska o periodycznie zmiennej geometrii lub wprowadzenie zafalowania całej szczeliny, przy zachowaniu jej stałej szerokości. Wyznaczone efektywne charakterystyki dyspersyjne dla różnych wartości współczynnika zafalowania szczeliny pokazano na rys. 7. Na podstawie przedstawionych wyników widoczne jest przesunięcie punktu przecięcia charakterystyk dyspersyjnych w stronę wyższych częstotliwości, co jak pokazano w pracy [23] równoważne jest również przesunięciu optymalnego punktu pracy złącza.

Uzyskane wyniki badań numerycznych zostały zweryfikowane eksperymentalnie. W tym celu wykonane zostały dwa układy cyrkulatorów, z których jeden zawierał sekcję o jednorodnej geometrii, natomiast drugi sekcję o periodycznej geometrii (patrz rys. 7). Zrealizowany układ z sekcją niejednorodną charakteryzował się szerszym pasmem pracy oraz częstotliwością środkową przesuniętą w stronę wyższych częstotliwości, co potwierdziło przewidywania teoretyczne oraz przyjętą metodykę projektowania.

W pracach [9] i [15] zbadano własności magnesowanych wzdłużnie paskowo-szczelinowych złączy ferrytowych o przekroju eliptycznym pokazanych na rys. 8. Złącza takie znalazły się w obszarze zainteresowań habilitanta, ponieważ stanowią konfigurację pośrednią pomiędzy złączami o przekroju kołowym i planarnym. Przeprowadzone badania złączy eliptycznych pokazały, iż wraz ze wzrostem eliptyczności złącza możliwe jest uzyskanie szerszego pasma pracy w porównaniu do złączy o przekroju kołowym (patrz rys. 8). Niemniej, wzrost eliptyczności przekroju poprzecznego złącza, skutkuje zmniejszeniem wartości sprzężenia żyrotropowego w takim złączu, a tym samym powoduje wydłużenie sekcji ferrytowej wymaganej dla uzyskania 45° kąta rotacji Faradaya. W efekcie, podobnie jak w znanych w literaturze złączach planarnych, skutkuje to zwiększeniem wymiarów układu oraz wzrostem występujących w nim strat. Z uwagi na ograniczenia technologiczne habilitant nie miał możliwości przeprowadzenia badań eksperymentalnych takich złączy. Stąd uzyskane wyniki badań zweryfikowano przy wykorzystaniu oprogramowania komercyjnego HFSS.



Rys. 8 Wyniki badań eliptycznego złącza ferrytowych linii szczelinowych o przekroju eliptycznym: (a) rysunek złącza oraz obliczona charakterystyka współczynnika sprzężenia żyromagnetycznego i optymalnej długość złącza w funkcji eliptyczności złącza, (b)-(d) obliczone amplitudowe (górną) oraz fazowe (dół) charakterystyki złącza uzyskane z metody przybliżonej oraz oprogramowania komercyjnego HFSS dla wybranych wartości współczynnika eliptyczności złącza

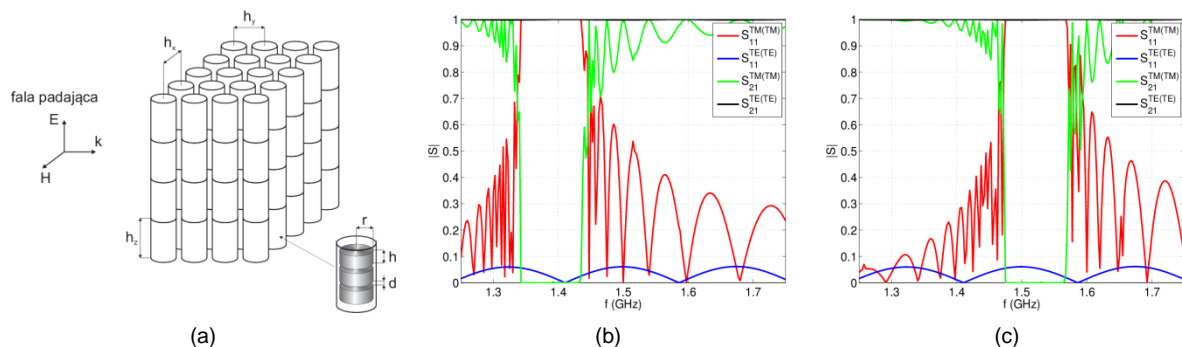
Opracowane wybrane modele oraz badania własności zintegrowanych układów niewzajemnych realizowanych przy wykorzystaniu magnesowanych wzdłużnie cylindrycznych złączy ferrytowych stały się również przedmiotem rozdziału w monografii [10].

Badania własności otwartych oraz falowodowych struktur mikrofalowych

W ramach badań otwartych struktur mikrofalowych prowadzone prace obejmowały analizę własności wielowarstwowych struktur periodycznych, w których pojedyncze warstwy zrealizowane są w postaci periodycznie rozmieszczonych elementów dielektryczno/ferrytowych o nieregularnym kształcie. Z uwagi na długi czas analizy takich struktur przy wykorzystaniu oprogramowania komercyjnego, habilitant w ramach prowadzonych badań zaproponował oraz opracował hybrydowy model matematyczny pozwalający na określanie parametrów rozproszenia takich struktur. Opracowany model opisano w pracach [3], [5], [18] i [20]. Punktem wyjściowym opisanego modelu jest model przedstawiony w pracy [41], gdzie przedmiotem analizy są wielowarstwowe struktury periodyczne złożone z warstw jednorodnych cylindrów o nieskończonej wysokości (problem dwu-i-pół wymiarowy). W pracy [3] przedstawione zostało uogólnienie powyższego modelu, pozwalające na uwzględnienie w analizie trójwymiarowych struktur złożonych z elementów o nieregularnym kształcie. W prezentowanym podejściu elementy tworzące pojedynczą kolumnę warstwy, reprezentowane są wielorodzajową macierzą transmisji. W przypadku elementów o prostej geometrii macierz transmisji może być określone przy wykorzystaniu metod analitycznych. Z kolei w analizie elementów o bardziej złożonej geometrii, gdzie nie jest możliwe zdefiniowanie pól w strukturze przy pomocy rozwinięć w funkcje analityczne, koniecznym staje się wykorzystanie metod dyskretnych. W pracach [3] i [18]

wykorzystano metodę dopasowania rodzajów, która pozwoliła na uwzględnienie w analizie struktur periodycznych złożonych z metalowo-dielektrycznych cylindrów. Następnie, celem rozszerzenia możliwości zaproponowanej metody, w pracach [5] i [20] do określenia macierzy transmisji badanych elementów rozpraszających wykorzystano metodę różnic skończonych połączoną z metodą dopasowania rodzajów. Pozwoliło to na uwzględnienie w analizie elementów rozpraszających o nieregularnym kształcie takich jak elementy cylindryczne o nieregularnym przekroju poprzecznym oraz elementy osiowo-symetryczne o nieregularnym kształcie wzdłuż osi symetrii, które mogą być wykonane z materiałów izotropowych oraz anizotropowych.

Opracowany model został wykorzystany w pracach [5] i [20] m.in. do zbadania własności warstw periodycznych złożonych cylindrów dielektrycznych zawierających konfiguracje dysków ferrytowych. Zastosowanie kształtek ferrytowych pozwoliło na stworzenie warstw selektywnych częstotliwościowo, których położenie pasma zaporowego może być przestrajane zewnętrznym polem magnetycznym. Ponadto, badania pokazały, iż w zależności od przyjętej konfiguracji dysków ferrytowych możliwe jest uzyskanie pasma zaporowego o różnej szerokości. Przykładowe wyniki pokazano na rys. 9. Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, iż badana wielowarstwowa struktura periodyczna pozwala na uzyskanie pasma zaporowego dla fali padającej o polaryzacji TM^z oraz pozostaje przezroczysta dla fali padającej o polaryzacji TE^z . Położenie pasma zaporowego może być zmieniane poprzez zmianę zewnętrznego pola magnesującego kształtki ferrytowe. W ogólności struktura taka może znaleźć zastosowanie jako układ filtrujący lub jako układ do zmiany polaryzacji fali w zadanym zakresie częstotliwości. W przypadku wszystkich analizowanych struktur opracowany model pozwolił na co najmniej kilkukrotne przyspieszenie obliczeń względem dostępnego na rynku oprogramowania komercyjnego.

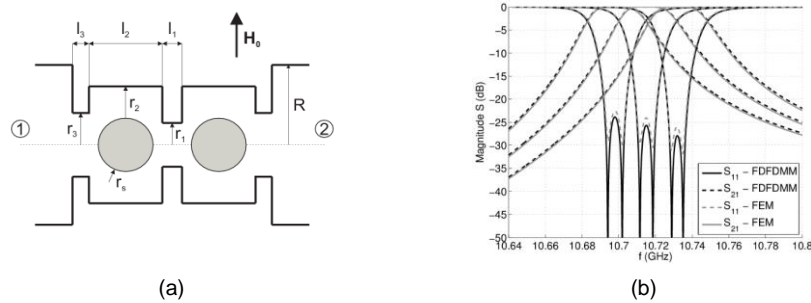


Rys. 9 Wielowarstwowa struktura periodyczna złożona z efektywnych cylindrów zawierających konfigurację trzech dysków ferrytowych: (a) badana struktura oraz parametry rozproszenia dla wewnętrznego pola magnetycznego (b) $H_0=0$ oraz (c) $H_0=4kA/m$

W pracach [6] i [21] przedmiotem badań habilitanta były własności złączy falowodów cylindrycznych zawierających osiowo-symetryczne elementy ferrytowe o nieregularnym kształcie wzdłuż osi symetrii. Złącza falowodów cylindrycznych są podstawowymi elementami składowymi układów falowodowych takich jak filtry, przesuwники fazy, cyrkulatory, czy izolatory. Stąd, istotnym staje się rozwijanie takich modeli matematycznych, które pozwolą na przyspieszenie obliczeń a tym samym na skrócenie czasu projektowania takich układów. W ramach realizowanych prac habilitant opracował oraz zaimplementował model matematyczny oparty na połączeniu metody różnic skończonych z metodą dopasowania rodzajów. Opracowany model pozwala w ogólności na analizę złączy tworzonych w postaci sferycznej wnęki rezonansowej zawierającej badany element ferrytowy oraz sprzężonej z falowodami kołowymi zorientowanymi pod dowolnym kątem względem wnęki. W zaproponowanym podejściu obiekt reprezentowany jest w postaci większego zastępczego obiektu sferycznego. Podejście to pozwala na ograniczenie wykorzystania metody dyskretnej do niewielkiego obszaru otaczającego obiekt, jak również na możliwość szybkiego określenia parametrów złącza w

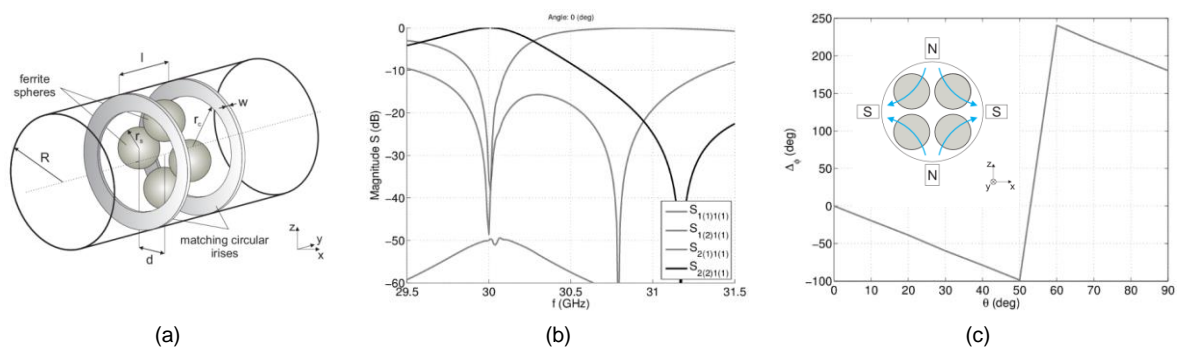
funkcji położenia oraz orientacji umieszczonych w nim elementów. Wysoka zgodność uzyskanych wyników w pracy [6] z oprogramowaniem komercyjnym potwierdziła poprawność opracowanego modelu. Ponadto opracowany model pozwolił na co najmniej kilkukrotne skrócenie czasu obliczeń względem oprogramowania komercyjnego.

Opracowany model został wykorzystany do badania własności układów mikrofalowych realizowanych przy wykorzystaniu rozważanych złączy falowodowych. Jednym z przykładów jest pokazany na rys. 10 układ filtra mikrofalowego, w którym możliwe jest przestrajanie pasma pracy układu poprzez zmianę natężenia pola magnesującego elementy ferrytowe.



Rys. 10 Filtr mikrofalowy pracujący w paśmie X zrealizowany w postaci falowodu cylindrycznego zawierającego magnesowane poprzecznie kulki ferrytowe: (a) widok struktury, (b) charakterystyki częstotliwościowe parametrów rozproszenia układu przy pobudzeniu rodzajem TE_{11} dla różnych wartości natężenia wewnętrznego pola magnetycznego

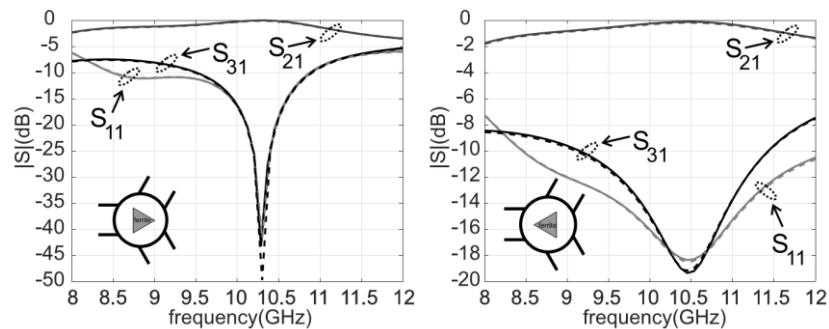
W toku prowadzonych badań opracowano również układu przesuwnika fazy pokazany na rys. 11, który ze względu na nowatorski charakter został zgłoszony do Urzędu Patentowego RP, gdzie po pozytywnym rozpatrzeniu wniosku uzyskał ochronę [12]. Zaproponowany układ zrealizowany został w postaci konfiguracji czterech kulek ferrytowych umieszczonych w falowodzie kołowym oraz magnesowanych polem czterobiegunowym. Wyniki symulacji pokazały, iż badany układ pozwala na uzyskanie liniowego przesunięcia fazy w zakresie od 0 do 180° przy obrocie konfiguracji kulek wraz z układem magnesującym w zakresie kątowym od 0 do 90° . Niewątpliwą zaletą zaproponowanego układu jest możliwość uzyskania przesunięcia fazy, przy dużo krótszych wymiarach układu, niż w przypadku innych rozwiązań prezentowanych w literaturze opartych na falowodowych strukturach ferrytowych magnesowanych polem skrzyżowanym [42].



Rys. 11 Układ przesuwnika fazy zawierający konfigurację czterech kulek ferrytowych magnesowanych polem czterobiegunowym: (a) widok struktury, (b) częstotliwościowe charakterystyki parametrów rozproszenia układu przy pobudzeniu falą o polaryzacji kołowej, (c) zmiana fazy w funkcji kąta obrotu konfiguracji kulek wraz z układem magnesującym dla $f_0 = 30\text{GHz}$

W pracy [8] przedstawiono wyniki badań układów zrealizowanych w postaci złączy falowodów prostokątnych zawierających elementy ferrytowe. W zakresie tych badań habilitant współtworzył model matematyczny pozwalający na określenie parametrów rozproszenia złączy falowodów prostokątnych zawierających materiały izotropowe oraz anizotropowe (np. ferrytowe). Opisany w ww. pracy model oparty jest na rozwinięciu pól w szereg funkcji bazowych na powierzchni elementu a

następnie dopasowaniu pól pomiędzy sąsiednimi obszarami. Podejście takie pozwala na określenie wielorodzajowej macierzy transmisji badanego elementu a następnie na połączenie uzyskanego rozwiązania z dowolnym pobudzeniem. Tym samym zaproponowany model może być wykorzystany do analizy otwartych oraz falowodowych struktur zawierających takie elementy. Metoda ta została zweryfikowana przy wykorzystaniu oprogramowania komercyjnego dla wybranych konfiguracji otwartych realizowanych w postaci obiektów rozpraszających oświetlonych falą płaską oraz układów falowodowych tj. filtru czy cyrkulatora, dla którego przykładowe wyniki pokazano na rys. 12. Uzyskana dobra zgodność z oprogramowaniem komercyjnym potwierdziła poprawność opracowanego modelu.



Rys. 12 Parametry rozproszenia złącza falowodów prostokątnych zawierającego cylinder ferrytowy o trójkątnym przekroju poprzecznym

Głównym ograniczeniem modelu, wynikającym z metody dopasowania pól, jest możliwość analizy elementów cylindrycznych o wypukłym przekroju poprzecznym. Niemniej, niewątpliwymi zaletami opracowanego modelu jest stosunkowo proste sformułowanie, jak i duża szybkość obliczeń względem oprogramowania komercyjnego, co potwierdza jego przydatność do pełnofalowych analiz elektromagnetycznych układów zawierających kształtki ferrytowe.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

CENTRALNA KOMISJA PROSI, ABY ROZMIAR PLIKU AUTOREFERATU NIE PRZEKRACZAŁ 5 MB

W ramach zatrudnienia na Politechnice Gdańskiej habilitant wykonywał głównie pracę badawczą w ramach projektów naukowych. Łączny dorobek habilitanta obejmuje 24 publikacje w czasopismach indeksowanych w bazie ISI JCR, 4 patenty, 5 rozdziałów w monografiach oraz 62 referaty konferencyjne. W tym okresie habilitant realizował badania w 3 projektach badawczych jako kierownik oraz w 10 projektach badawczych (w tym jeden międzynarodowy) jako główny wykonawca.

W latach 2004-2011 prowadzony zakres badań dotyczył analizy zjawisk rozpraszania w otwartych oraz zamkniętych układach mikrofalowych zawierających elementy wykonane z materiałów o własnościach izotropowych. W ramach wykonanych prac habilitant opracował metodę hybrydową do analizy zjawisk rozpraszania, która pozwoliła na co najmniej dziesięciokrotne przyspieszenie obliczeń dla badanych struktur mikrofalowych. Uzyskane wyniki przedstawione zostały w formie pięciu publikacjach naukowych w czasopismach indeksowanych w bazie ISI JCR oraz kilku referatów konferencyjnych, z których jeden został wyróżniony nagrodą EuMA Young Scientist Prize w 2010r. Ponadto uzyskane wyniki badań były przedmiotem rozprawy doktorskiej habilitanta, która obroniona została z wyróżnieniem oraz zajęła drugie miejsce w ogólnopolskim Konkursie o nagrodę Fundacji Wspierania Rozwoju Radiokomunikacji i Technik Multimedialnych za najlepszą pracę doktorską z dziedziny radiokomunikacji i technik multimedialnych.

W kolejnych latach 2011-2017 habilitant wykonywał prace badawcze w ramach projektów naukowych związanych głównie z techniką antenową. Prace te prowadzone były w ramach dwóch projektów:

- LIDER/21/94/L-2/10/NCBiR/2011; "Implementacja i korekcja metod pomiaru charakterystyk antenowych w strefie bliskiej", 2011-2014, projekt NCBiR w ramach programu LIDER (główny wykonawca)
- UMO-2011/01/D/ST7/06639; „Badania anten konforemnych przy wykorzystaniu hybrydowych metod analizy”, 2012-2016, projekt badawczy NCN dla młodych pracowników ze stopniem doktora (główny wykonawca)

Pierwszym z projektów był projekt związany z opracowaniem konstrukcji skanera do pomiaru charakterystyk promieniowania anten. Główny zakres prac wykonanych przez habilitanta związany był z współtworzeniem oraz implementacją w języku C++ algorytmów pozwalających na określanie charakterystyki promieniowania anteny w strefie dalekiej na podstawie pomierzonych rozkładów pola w strefie bliskiej. Z uwagi na fakt, iż pomiar fazy pola w strefie bliskiej obarczony może być dużym błędem, zwłaszcza w zakresie wyższych częstotliwości, habilitant wraz z zespołem projektowym opracował algorytmy estymacji fazy na podstawie pomiaru rozkładów amplitudy pola w dwóch równoległych płaszczyznach przed anteną. Ponadto w ramach tego projektu habilitant brał udział w konsultacjach związanych z opracowaniem konstrukcji mechanicznej skanera. Wynikiem prac wykonanych w projekcie jest w pełni funkcjonalny skaner, znajdujący się obecnie na wyposażeniu katedry Inżynierii Mikrofalowej i Antenowej, PG, którego działanie zweryfikowano pomyślnie dla kilku anten stosowanych w komercyjnych systemach bezprzewodowych. Wyniki badań przedstawiono w formie publikacji w czasopiśmie recenzowanym oraz 6 referatów konferencyjnych.

W ramach kolejnego projektu habilitant zajmował się tematyką anten konforemnych tj. anten realizowanych na zakrzywionych powierzchniach. Anteny te zyskały obecnie bardzo dużą popularność i znajdują przede wszystkim zastosowanie tam, gdzie użycie tradycyjnych anten planarnych jest niepraktyczne lub wręcz niemożliwe. Przykładowo konforemność anten pozwala na ich integrację z obiektem, co predysponuje je do zastosowania np. na skrzydłach samolotu, rakiety, lub szybkiego pociągu. Konieczność wykorzystania owych anten w ww. zastosowaniach wynika zarówno ze względów aerodynamicznych, jak i potrzeby zmniejszenia radarowego przekroju czynnego, czyli uczynienia obiektu niewidocznym dla radaru. W ramach prac prowadzonych w projekcie habilitant brał udział we współtworzeniu oraz komputerowej implementacji algorytmów pozwalających na określanie częstotliwości rezonansowych jak i charakterystyk promieniowania struktur rezonansowych tworzonych w postaci łańcuchów promieniujących umieszczonych na zakrzywionych powierzchniach. Zakres prowadzonych prac obejmował również weryfikację numeryczną oraz eksperymentalną badanych układów rezonansowych. Wyniki tych prac stały się przedmiotem 5 publikacji w czasopiśmie indeksowanym w bazie ISI JCR, zgłoszenia patentowego oraz kilkunastu referatów konferencyjnych, których habilitant jest współautorem.

Ponadto w ramach pracy badawczej habilitant współpracował z firmą Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG (Backnang, Niemcy). Firma ta jest wiodącym producentem układów pasywnych oraz aktywnych wysokich częstotliwości umieszczanych na pokładach satelitów. Na zlecenie tej firmy oraz podczas pobytu na 4 miesięcznym stażu habilitant opracował łącznie 5 modułów obliczeniowych struktur. Opracowane moduły zostały zaimplementowane w języku Fortran oraz zintegrowane z oprogramowaniem wewnętrznym firmy TESAT. Moduły te są obecnie wykorzystywane przez firmę w procesie projektowania i optymalizacji falowodowych filtrów mikrofalowych, stanowiących ofertę handlową firmy.

W ramach innych prac realizowanych na zlecenie firm zewnętrznych habilitant zajmował się:

- **2005r.** opracowaniem oprogramowania do określania wypadkowej charakterystyki promieniowania od dowolnej konfiguracji anten stacji bazowych. Opracowany moduł obliczeniowy został zintegrowany z oprogramowaniem wewnętrznym firmy zamawiającej i jest

wykorzystywany do wykonywania obliczeń zasięgów wypadkowych stanowiących integralną część raportów o oddziaływaniu stacji bazowych na środowisko. Prace realizowane były na zlecenie firmy MOBI TELEKOM Adam Macioch ul. Oskara Kolberga 17/86 81-881 SOPOT.

- **2014r.** pracami projektowymi sektorowych anten WiFi pracujących w paśmie 5GHz. W ramach prac opracowano serię anten sektorowych o różnych wartościach zysku oraz szerokości głównej wiązki promieniowania, które mogą być wykorzystane do tworzenia punktów dostępowych. Prace te zrealizowane zostały na zlecenie firmy RFLINE, ul. Świemirowska 20/4, 81-877 Sopot. Zaprojektowana seria anten znajduje się od 2015r. w ofercie sprzedaży firmy Cyberbajt Tadeusz Nowak, ul. Młyńska 27, 22-400 Zamość pod nazwą *GigaSektor PRO* (www.cyberbajt.pl)
- **2017r.** pracami projektowymi dotyczącymi anten do urządzeń pomiarowych wykorzystywanych w systemach telemetrycznych sieci ciepłowniczych. Prace te realizowane są obecnie w ramach projektu „Innowacyjne rozwiązanie do optymalizacji pracy sieci ciepłowniczej w postaci systemu monitorowania ciepłomierzy, regulatorów pogodowych oraz czujników temperatury i ciśnienia, z wykorzystaniem komunikacji NarrowBand Internet of Things” w ramach Programu sektorowego „PBSE” Działania 1.2 „Sektorowe programy B+R” realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój (Konkurs_8/1.2/2016_PBSE) na zlecenie firmy ABARO Sp. z o.o., z siedzibą w Gdańsku (80-171), ul. Jana Sebastiana Bacha 3
- **2017r.** pracami rozwojowymi oprogramowania do analizy obwodowej układów mikrofalowych. Prace te zrealizowane zostały na zlecenie firmy Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG (Backnang, Niemcy) za pośrednictwem firmy Dr. Keller Microwave Consulting (Bonn, Niemcy). Prace te dotyczyły nowo rozwijanego oprogramowania wewnętrznego firmy TESAT. Oprogramowanie to w najbliższym czasie zastąpi obecnie używaną aplikację, która ze względu na swoje ograniczenia nie daje możliwości dalszego rozwoju. Wykonany przez habilitanta zakres prac obejmował transfer modułów obliczeniowych do nowego środowiska, jak również wsparcie konsultacyjne dotyczące struktury programu oraz przyspieszenia obliczeń.

Literatura

- [24] F. Fesharaki, C. Akyel and K. Wu, "Broadband substrate integrated waveguide edge-guided mode isolator," in *Electronics Letters*, vol. 49, no. 4, Feb. 14 2013, pp. 269-271
- [25] J. Wang et al., "Self Biased Y-Junction Circulator at Ku Band," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 21, no. 6, June 2011, pp. 292-294
- [26] W. D'Orazio; K. Wu Substrate-Integrated-Waveguide Circulators Suitable for Millimeter-Wave Integration *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Volume: 54, Issue: 10, 2006, pp. 3675 – 3680
- [27] A. Nafe and A. Shamim, "An Integrable SIW Phase Shifter in a Partially Magnetized Ferrite LTCC Package," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 7, July 2015, pp. 2264-2274
- [28] S. I. M. Sheikh et al., "Analog/Digital Ferrite Phase Shifter for Phased Array Antennas," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, 2010, pp. 319-321
- [29] L. R. Tan, R. X. Wu and Y. Poo, "Magnetically Reconfigurable HMSIW Antenna With Broadband Frequency Tunability", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1373-1376, 2016
- [30] K. C. Hwang and H. J. Eom, "Tunable notch filter of ferrite-filled grooves in parallel plates," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 5, May 2005, pp. 363-365

- [31] B. A. Belayev, K. V. Lemberg and A. M. Serzhantov, "An X-band magnetically tunable bandpass filter based on novel waveguide cavity resonator," 2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), New Delhi, 2016, pp. 1-4.
- [32] A. J. Baden Fuller, Ferrites at Microwave Frequencies, London UK: Peter Peregrinus Ltd.; 1986
- [33] Cham Kiong Queck and L. E. Davis, "Microstrip and stripline ferrite-coupled-line (FCL) circulator's," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 50, no. 12, Dec. 2002, pp. 2910-2917
- [34] J. Mazur, M. Solecka, R. Poltorak and M. Mazur, "Theoretical and experimental treatment of a microstrip coupled ferrite line circulator," in IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 151, no. 6, pp. 477-480, 19 Dec. 2004.
- [35] A. Kusiek, W. Marynowski, J. Mazur, "Investigations Of The Circulation Effects In The Structure Using Ferrite Coupled Slot-Line Section", Microwave and Optical Technology Letters, Volume 49, Issue 3, March 2007, pp. 692-696
- [36] W. Marynowski, J. Mazur, "Study of Nonreciprocal Devices Using Three-Strip Ferrite Coupled Line", Progress In Electromagnetics Research, Vol. 118, 2011, pp. 487-504,
- [37] Mazur, J., M. Mazur, and J. Michalski, "Coupled-mode design of ferrite-loaded coupled-microstrip-lines section," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 50, No. 6, Jun. 2002, pp. 1487-1494
- [38] A. Lai, T. Itoh and C. Caloz, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials," in IEEE Microwave Magazine, vol. 5, no. 3, Sept. 2004, pp. 34-50
- [39] K. Okubo, M. Tsutsumi, On the Left Handed Ferrite Circulator, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2006, pp. 548-551
- [40] L. Y. Yang and K. Xie, "Periodically non-uniform coupled microstrip lines on longitudinally-magnetised ferrite," in Electronics Letters, vol. 45, no. 5, Feb. 2009, pp. 268-269
- [41] Yasumoto, K., H. Toyama, and T. Kushta, "Accurate analysis of two-dimensional electromagnetic scattering from multi-layered periodic arrays of circular cylinders using lattice sums technique," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 52, No. 10, Oct. 2004, pp. 2603-2611
- [42] M. Mazur, E. Sedek, J. Mazur, R. Frender and D. Wisniewski, "Experimental Investigations of Ferrite Phase Shifter Magnetized with Rotary Four-Pole Magnetic Fields," 2006 International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications, Krakow, 2006, pp. 683-686

* w przypadku, gdy osiągnięciem tym jest praca/ prace wspólne, należy przedstawić oświadczenia wszystkich jej współautorów, określające indywidualny wkład każdego z nich w jej powstanie. W przypadku, gdy praca zbiorowa ma więcej niż pięciu współautorów, habilitant załącza oświadczenie określające jego indywidualny wkład w powstanie tej pracy oraz oświadczenia co najmniej czterech pozostałych współautorów.

Adam Kusiek