

dr Adam Narbudowicz
Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki
Wydział Elektroniki
Politechnika Wrocławska

AUTOREFERAT

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

2013 - Doctor of Philosophy (*PhD*), dziedzina: nauki techniczne, dyscyplina: elektronika i telekomunikacja, specjalność: technika antenowa; miejsce: Dublin Institute of Technology, Dublin, Irlandia; Rozprawa pt. „Advanced Circularly Polarised Microstrip Patch Antennas”

2008 – Magister inżynier, na kierunku: elektronika i telekomunikacja, w zakresie: systemy komunikacji bezprzewodowej, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki; praca pt. „Dwupolaryzacyjne anteny planarne dla systemu UWB”

2009-2013 – Studia doktoranckie na Dublin Institute of Technology w Dublinie, Irlandii

2003-2008 – Studia magisterskie na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Politechniki Gdańskiej
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

2013 – 2014 – Trinity College Dublin, the University of Dublin w Dublin, Irlandia. Stanowisko: postdoctoral researcher; zakres prac: praca badawcza

2014 – 2019 – Dublin Institute of Technology w Dublin, Irlandia. Stanowisko: postdoctoral research fellow; zakres prac: praca badawcza, kierownictwo dwóch projektów naukowych współfinansowanych przez Marie Skłodowska-Curie Actions. Okres ten obejmuje dwuletni staż w latach 2014 – 2016 na RWTH Aachen University w Akwizgranie, Niemcy.

2019 – obecnie – Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki; stanowisko: adiunkt; zakres prac: praca dydaktyczna i badawcza.
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,

„Opracowanie nowych struktur anten wielowrotnikowych z rekonfigurowalną charakterystyką promieniowania i badania ich wykorzystania w zaawansowanych systemach bezprzewodowych”
 - b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy),

AN

Publikacje w czasopismach indeksowanych w bazie ISI JCR wchodzące w skład monotematycznego cyklu publikacji (9):

[1] **A. Narbudowicz**, X.L. Bao, and M.J. Ammann, "Omnidirectional microstrip patch antenna with reconfigurable pattern and polarisation", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 8 (11), str. 872 - 877, 08/2014 (wkład: **80%**, pkt. MNiSW: 25, IF 2017: 0,91)

[2] **A. Narbudowicz**, M.J. Ammann and D. Heberling, "Switchless Reconfigurable Antenna with 360° Steering", *IEEE Antenna and Wireless Prop. Letters*, vol. 15, str. 1689 – 1692, 2016 (wkład: **80%**, pkt. MNiSW: 35, IF 2017: 3,448)

[3] **A. Narbudowicz**, M.J. Ammann and D. Heberling, "Reconfigurable Axial Ratio in Compact GNSS Antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64 (10), str. 4530 – 4533, 10/2016 (wkład: **80%**, pkt. MNiSW: 40, IF 2016: 2,957)

[4] **A. Narbudowicz** and M.J. Ammann, "Low-cost Multimode Patch Antenna for Dual MIMO and Enhanced Localization Use", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66 (1), str. 405 - 408, 01/2018 (wkład: **90%**, pkt. MNiSW: 40, IF 2017: 4,13)

[5] O. O'Conchubhair, **A. Narbudowicz**, P. McEvoy, and M. J. Ammann, "Circularly Polarized Solar Antenna for Airborne Communication Nodes", *Electronic Letters*, vol. 51 (9), str. 667 - 669, 2015 (wkład: **25%**, pkt. MNiSW: 25, IF 2015: 0,854)

[6] **A. Narbudowicz**, O. O'Conchubhair, M.J. Ammann and D. Heberling, "Integration of antennas with sun-tracking solar panels", *Electronics Letters*, vol. 52 (15), str. 1325 – 1327, 2016 (wkład: **55%**, pkt. MNiSW: 25, IF 2016: 1,155)

[7] V. Sipal, **A. Narbudowicz**, and M.J. Ammann, (featured article) "Using near-field coupled circularly polarized antennas as frequency independent variable phase-shifters", *Electronics Letters*, vol. 50 (11), str. 788-790, 2014 (wkład: **20%**, pkt. MNiSW: 25, IF 2014: 0,93)

[8] **A. Narbudowicz**, M.J. Ammann and D. Heberling, "Directional Modulation for Compact Devices", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, str. 2094 – 2097, 2017 (wkład: **80%**, pkt. MNiSW: 35, IF 2017: 3,448)

[9] **A. Narbudowicz**, G. Ruvio and M.J. Ammann, "Passive Self-Interference Suppression for Single Channel Full-Duplex Operation", *IEEE Wireless Communications*, vol. 25 (5), str. 64-69, 2018 (wkład: **80%**, pkt. MNiSW: 50, IF 2017: 9,202)

Recenzowane publikacje na międzynarodowych konferencjach (6):

[10] **A. Narbudowicz**, M. J. Ammann, J. Przewocki, "Shaping the Axial-Ratio Footprint of Crossed-Dipole Antennas", LAPC 2014 - Loughborough Antennas & Prop. Conf., Loughborough, Wlk. Brytania, str. 598 - 601, lis. 2014 (wkład 80%)

[11] **A. Narbudowicz**, M.J. Ammann, D. Heberling, "On Pattern Reconfigurable Antennas Steered by Modulation Scheme", EuCAP 2015 - European Conf. on Ant. and Prop., Lizbona, Portugalia, str. 1 - 4, kwi. 2015 (wkład 80%)

[12] **A. Narbudowicz**, D. Heberling, M. J. Ammann, "Low-cost directional modulation for small wireless sensor nodes", EuCAP 2016 - European Conf. on Ant. and Prop., Davos, Szwajcaria, str. 1 – 3, kwi. 2016 (wkład 80%)

AJ

[13] **A. Narbudowicz**, M. J. Ammann, D. Heberling, "Combining Reconfigurable Antennas into Linear Array for Dual-Plane Beamsteering", MIKON 2016 – Int. Conf. on Microwave, Radar and Wireless Communications, Kraków, Polska, str. 1 – 4, maj 2016 (wkład 80%)

[14] **A. Narbudowicz**, M.J. Ammann, D. Heberling, "Electrically Small Antenna with Switchless Pattern Reconfiguration", IEEE AP-S Symposium, San Diego, CA, USA, str. 1201 – 1202, lip. 2017 (wkład 80%)

[15] **A. Narbudowicz**, M. J. Ammann, N. Marchetti, "Miniaturized Switchless Pattern Reconfigurable Antenna Utilizing Spherical Modes Analysis", EuCAP 2018 - European Conf. on Antennas and Propagation, Londyn, Wlk. Brytania, str. 1 – 4, kwiecień 2018 (wkład 80%)

Wszystkie publikacje wchodzące w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie są dostępne online w bazie IEEE Xplore Digital Library (ieeexplore.ieee.org)

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

W ostatnich latach obserwujemy szybki rozwój tzw. przestrzeni inteligentnych, które poprzez połączenie nowej technologii z obiektami codziennego użytku i infrastrukturą (budynki, dzielnice miast itp.) umożliwiają bardziej efektywnie wykorzystanie tych obiektów i infrastruktury. Technologie te mają na celu poprawę jakości życia populacji, jak również stymulację rozwoju ekonomicznego – np. poprzez usprawnienie procesów produkcyjnych i tym samym obniżenie kosztów wykonania (tzw. Industry 4.0). Stwarza to następujące oczekiwania w stosunku do przyszłych systemów komunikacji bezprzewodowej:

- Obsługa o wiele większego ruchu bezprzewodowej transmisji danych.
- Zintegrowane podejście do systemu telekomunikacyjnego, tzn. połączenie funkcji przesyłania danych z funkcją sensoryczną, np. lokalizacja.
- Ze względu na duże ilości wrażliwych danych zbieranych i przesyłanych w ramach Internetu Rzeczy, transmisje radiowe Internetu Rzeczy wymagają szczególnie dobrego zabezpieczenia przed przechwyceniem przez osoby niepowołane.

Te wymogi stwarzają zapotrzebowanie na nowe rodzaje anten, które są w stanie bezpiecznie obsłużyć zwiększony przepływ danych, jednocześnie integrując funkcje sensoryczne i zapewniając wymagane bezpieczeństwo. Anteny z rekonfigurowalną charakterystyką kierunkową są jedną z kluczowych technologii wspierających takie zastosowania. Pozwalają one dynamicznie zmieniać kierunek wiązki głównej, jej polaryzację i inne parametry. W szczególności anteny takie oferują następujące zalety:

- Lepszy współczynnik sygnału do szumu w obrębie sterowalnej wiązki głównej umożliwia większą szybkość przesyłania danych (lub mniejszą stopę błędów).
- Jeśli kierunek wiązki głównej jest znany, może ona zostać wykorzystana w celach sensorycznych, np. do dokładniejszej lokalizacji użytkownika.
- Ponieważ informacja jest wysyłana tylko w kierunku pożądanym, system generuje mniej interferencji dla innych użytkowników, umożliwia przestrzenne zwielokrotnienie dostępu i zwiększa prywatność przesyłanych danych (np. wykorzystując modulację kierunkową

[16, 17]). Ostatnia cecha jest niezwykle istotna dla Internetu Rzeczy, jako że utrudnia przechwycenie transmisji przez osoby niepożądane.

Klasycznym rozwiązaniem pozwalającym na zmianę charakterystyki promieniowania są szyki antenowe [18]. Składają się one z wielu anten, rozlokowanych w pewnej odległości od siebie (np. pół długości fali w przypadku tradycyjnych szyków liniowych). Odległość ta wprowadza opóźnienie fazowe pomiędzy poszczególnymi antenami w szyku, które jest zależne od kierunku odbieranego lub nadawanego sygnału. Różnica faz pozwala zsyntetyzować charakterystykę kierunkową. Podstawową wadą tego rozwiązania jest duży rozmiar szyku, który poważnie ogranicza jego wykorzystanie w urządzeniach o ograniczonych rozmiarach, które to stanowią znaczny procent urządzeń Internetu Rzeczy.

Alternatywnym rozwiązaniem pozwalającym na zmianę charakterystyki promieniowania przy zachowaniu stosunkowo małych rozmiarów są anteny rekonfigurowalne. Anteny takie używają elementów przełączających (np. diody pin, przełącznika MEMS, varactora itp.), żeby zmienić kierunek przepływu prądu w aperturze anteny i tym samym zmienić charakterystykę kierunkową – zazwyczaj pomiędzy kilkoma dyskretnymi stanami. Podstawową wadą tego rozwiązania jest brak możliwości niezależnej kontroli kierunku wiązki dla poszczególnych kanałów częstotliwościowych w obrębie pasma pracy (ze względu na przełączniki, wiązka główna w całym paśmie pracy anteny musi być skierowana w podobnym kierunku). W konsekwencji uniemożliwia to efektywne zastosowanie takich anten w komunikacji wykorzystującej częstotliwościowe zwielokrotnienie dostępu (FDMA). Z podobnych powodów anteny takie nie mogą być wykorzystywane w systemach przestrzennego zwielokrotnienia dostępu, systemach MIMO, jak również umożliwiają tylko ograniczone stosowanie systemów cyfrowego sterowania wiązką (ang. *'digital beamforming'*).

Implementacja Internetu Rzeczy i Przestrzeni Inteligentnych wymaga stworzenia nowych konstrukcji anten ze zmienną charakterystyką kierunkową, które pozwolą na elastyczne, cyfrowe sterowanie wiązką i mogą zostać zaimplementowane w stosunkowo niewielkich urządzeniach. Co więcej, anteny takie powinny być projektowane i rozważane również pod kątem zintegrowania w pojedynczej antenie jak największej liczby funkcji, wspierając aplikacje takie jak lokalizacja i bezpieczeństwo komunikacji.

Głównym celem badań opisanych w jednotematycznym cyklu publikacji było zaprojektowanie nowych struktur anten, pozwalających spełnić powyższe oczekiwania. Obejmuje to nie tylko same projekty i propozycje nowych rozwiązań sprzętowych, lecz również możliwości ich wykorzystania do stworzenia innowacyjnych systemów radiowych, np. precyzyjnej lokalizacji, ochrony przesyłanych danych w warstwie fizycznej modelu ISO/OSI lub komunikacji radiowej w trybie pełnego duplexu z wykorzystaniem tego samego kanału przestrzenno-czasowo-częstotliwościowego.

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

- "Circularly Polarized UWB Antenna Systems for Indoor Communications" (ELEVATEPD/2014/79) Projekt w ramach programu ELEVATE , współfinansowany przez Irish Research Council i Marie Curie Actions.

W ramach projektu habilitant spędził 2 lata na stażu w RWTH Aachen University, Aachen, Niemcy w Institute of High Frequency Technology, pracując z Prof. Dirkem Heberling („faza wyjazdowa” projektu). Trzeci końcowy rok projektu obejmował powrót na

macierzystą uczelnię Dublin Institute of Technology (obecnie TU Dublin), Dublin, Irlandia („faza powrotowa” projektu).

- “Wireless-SPIne – Wireless Security and Privacy for INtErnet of things”. Projekt ramach programu EDGE, współfinansowanego przez Marie Skłodowska-Curie Actions.

Projekt przeprowadzony był w Dublin Institute of Technology (obecnie TU Dublin) w bliskiej współpracy z Trinity College Dublin, w szczególności z Prof. Nicola Marchetti. Współpraca odbywała się w ramach międzyuczelnianego centrum badawczego CONNECT zajmującego się szeroko rozumianymi technologiami telekomunikacyjnymi.

Najważniejsze osiągnięcia prowadzonych badań:

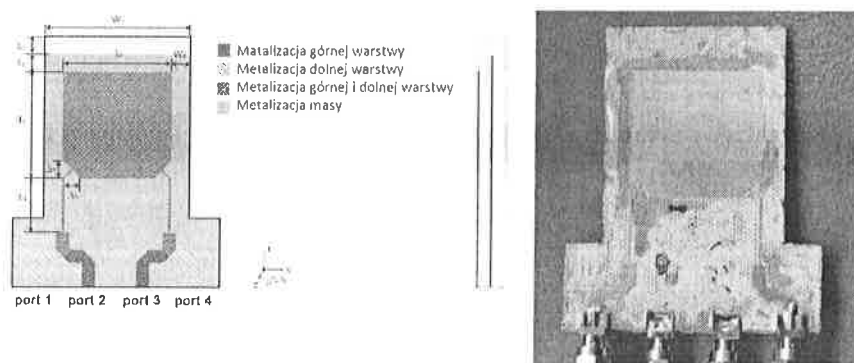
- Opracowanie planarnej anteny dookolnej, która umożliwia ciągły obrót dookolnej charakterystyki kierunkowej wokół osi, jak również zmianę polaryzacji tej charakterystyki. **Jest to pierwsza planarna antena tego typu wykonana całkowicie jako układ drukowany (PCB). Oferuje ona szeroki zakres rekonfigurowalności przy jednoczesnej kompatybilności z rozwiązaniami cyfrowej kontroli wiązki i MIMO.** Technika wykonania pozwala na łatwe i tanie wdrożenie anteny do produkcji masowej.
- Opracowanie anteny kierunkowej dwu-wiązkowej, która umożliwia ciągły (tj. nie-dyskretny) obrót charakterystyki promieniowania w zakresie 360 stopni w płaszczyźnie horyzontalnej. Antena wykorzystuje w tym celu liniową zmianę fazy charakterystyki kierunkowej, co umożliwia sterowanie wiązką bez konieczności używania elementów przełączających. Dodatkową zaletą zaprojektowanego rozwiązania jest niewielki rozmiar anteny.
- Opracowanie metody miniaturyzacji powyższej anteny, uwzględniając negatywne skutki takiej miniaturyzacji dla szerokości pasma pracy i sprawności.
- Opracowanie systemu sterowania antenami dwu-wrotowymi o polaryzacji kołowej, który umożliwia kontrolę kierunku maksymalnej czystości polaryzacyjnej (tj. najmniejszego współczynnika osi) w obrębie wiązki głównej, przy jednoczesnym zachowaniu kształtu tej wiązki dla polaryzacji głównej kołowej. Ma to zastosowanie m.in. w satelitarnych systemach nawigacyjnych (np. GPS), gdzie dużym problemem są zdepolaryzowane sygnały odbite. Sygnały takie zakłócają pomiar i obniżają dokładność lokalizacji. **Opracowany system umożliwia adaptacyjne filtrowanie takich sygnałów, tzn. umożliwia dynamiczną zmianę kierunku na którym zachodzi maksymalne filtrowanie sygnałów o przeciwnej polaryzacji.** Technologia jest prosta do implementacji w małych antenach i nie wymaga dodatkowych struktur filtrujących otaczających antenę.
- Opracowanie czteroelementowej anteny o polaryzacji kołowej, zintegrowanej z panelem fotowoltanicznym. Anteny montowane w panelach pozwalają na zwiększenie autonomiczności urządzeń Internetu Rzeczy, gdyż apertura wykorzystywana do komunikacji może pełnić dodatkową funkcję, wspomagając zasilanie urządzenia. Wspomnianą antenę opracowano z myślą o systemach łączności w obiektach latających (np. samoloty bezzałogowe), gdzie polaryzacja kołowa jest preferowana ze względu na częste zmiany orientacji anteny.

- Opracowanie automatycznego systemu sterowania kierunkiem wiązki dla anten montowanych w obrotowych panelach fotowoltaicznych. Panele takie śledzą ruch Słońca na niebie, zwiększając wydajność produkcji energii elektrycznej. Ruch ten stanowi naturalny problem dla zintegrowanych anten, gdyż kierunek wiązki głównej jest przemiatany wraz z ruchem panelu. **Opracowany system sterowania jest pierwszym układem, który pozwala na autonomiczne dostosowanie wymaganego przesunięcia fazy do obrotu panelu i anteny, bez udziału elementów aktywnych.** Proponowany przesuwnik fazy jest kompatybilny z rekonfigurowalnymi antenami opisanymi powyżej.
- Opracowanie koncepcji urządzenia do adaptacyjnej zmiany przesunięcia fazowego, w którym przesunięcie fazowe jest stałe i niezależne od częstotliwości. Rozwiązanie takie jest istotne, jako że umożliwia sterowanie wiązką w układach ultra-szerokopasmowych (ang. *UltraWideBand – UWB*).
- **Opracowanie metody wykorzystania klasy dwu-modowych anten planarnych MIMO do zwiększenia precyzji algorytmów lokalizacyjnych.** Zwiększenie dokładności jest osiągnięte poprzez tzw. „korektę monopolową”, która polega na wyliczeniu kąta nadchodzącego sygnału przy pomocy stosunku mocy dwóch wiązek: różnicowej i sumacyjnej. Jednocześnie wykazano, że takie wiązki charakteryzują się niską korelacją charakterystyk kierunkowych mierzonych na dwóch wrotach anteny, co umożliwia ich wykorzystanie w technologii MIMO.
- Opracowanie implementacji systemu „modulacji kierunkowej” wykorzystującego anteny o niewielkich rozmiarach. Modulacja kierunkowa jest to system pozwalający na zwiększenie prywatności przesyłanych danych poprzez zniekształcenie modulacji na wszystkich kierunkach poza jednym, na którym znajduje się uprawniony odbiornik. Technologia ta była implementowana z wykorzystaniem szkieletów antenowych, których rozmiar nie pozwalał na wykorzystanie w urządzeniach Internetu Rzeczy. **Opracowana metoda jest pierwszą, która pozwoliła ominąć to ograniczenie i zaimplementować modulację kierunkową z wykorzystaniem kompaktowych anten wielomodowych**
- Wyznaczenie górnego limitu sprawności dla anten dwuwrotowych, wspierających pracę radia pełnoduplexowego, gdzie pełen duplex odbywa się z wykorzystaniem tego samego kanału przestrzenno-czasowo-częstotliwościowego. Anteny takie mają za zadanie zmniejszenie samointerferencji, tj. przenikania silnego sygnału z nadajnika do toru odbiornika, co zakłóca prawidłowy odbiór. **Badania habilitanta wyznaczyły po raz pierwszy fundamentalny limit sprawności dla anten pasywnych, w zależności od izolacji pomiędzy wrotami, i przestrzennej korelacji kanałów nadajnika i odbiornika.**

W pierwszym etapie badań opracowano strukturę anteny mikropaskowej o charakterystyce dookólnej, umożliwiającą elektryczne obrócenie tej charakterystyki o dowolny kąt wokół osi normalnej do płaszczyzny łatek mikropaskowych i niezależną od tego obrotu zmianę polaryzacji. Charakterystykę taką uzyskano przy pomocy dwóch łatek mikropaskowych, zlokalizowanych na przeciwnych stronach podwójnej płytki drukowanej. Łaty zostały rozdzielone wspólną metalizacją masy o zredukowanej (w stosunku do standardowych rozwiązań) szerokości. Dwa ortogonalne mody w każdej łacie zostały zasilone z rogów.

Uzyskany obrót dookólnej charakterystyki o 360 stopni umożliwia – zakładając właściwą konfigurację – odebranie sygnału przychodzącego z dowolnego kierunku i o dowolnej polaryzacji. Ponieważ rekonfiguracja została zrealizowana jako superpozycja wielu modów rezonansowych anteny, możliwe jest wykorzystanie algorytmów cyfrowej syntezy wiązki. Systemy takie pozwalają na jednoczesną syntezę wielu charakterystyk kierunkowych w odbiorniku.

Wyniki badań zostały zaprezentowane w specjalnym wydaniu prestiżowego czasopisma IET Microwaves Antennas & Propagation [1]. Możliwości wykorzystania proponowanej anteny zostały zaprezentowane na międzynarodowej konferencji EuCAP 2015 w Portugalii [2], zaś możliwości połączenia kilku anten tego typu w celu zwiększenia stopni swobody w syntetyzowaniu charakterystyki kierunkowej – na międzynarodowej konferencji MIKON 2016 [3]. Rys. 1 pokazuje przykładowy projekt anteny, zawierający kluczowe elementy. Tabela 1. podaje cztery przykładowe pobudzenia fazowo-amplitudowe umożliwiające syntezę czterech różnych charakterystyk.



Rys. 1. Poglądowy rysunek proponowanej anteny (z lewej) i zdjęcie zrealizowanego prototypu (z prawej)

Wkład habilitanta polegał na stworzeniu koncepcji badań, zaprojektowaniu proponowanej anteny, wykonaniu symulacji numerycznych w programach CST Microwave Studio i CST Design Studio, wykonanie prototypu, wykonanie większości pomiarów, jak również przygotowanie większości tekstu obu publikacji.

Polaryzacja	Płaszczyzna w której uzyskano charakterystykę dookólną	Faza na wrotach 1	Faza na wrotach 2	Faza na wrotach 3	Faza na wrotach 4
+45 stopni	xz	0 st.	X	0 st.	X
+45 stopni	yz	0 st.	X	180 st.	X
-45 stopni	xz	X	0 st.	X	0 st.
-45 stopni	yz	X	0 st.	X	180 st.

Tabela 1. Przykładowe charakterystyki kierunkowe dla zadanych przesunięć fazy na poszczególnych wrotach. X oznacza brak pobudzenia na danych wrotach.

AD

Kolejnym etapem badań było wykorzystanie superpozycji modów rezonansowych anteny w rekonfigurowalnej antenie o zwiększonej kierunkowości. W celu uzyskania małych rozmiarów anteny zaprojektowano radiator, w którym – dla płaszczyzny horyzontalnej - faza charakterystyki kierunkowej jest liniowo proporcjonalna do kąta w jakim energia jest wypromieniowana. Efekt ten uzyskano wykorzystując dwa ortogonalne mody TM_{21} w dielektrycznym rezonatorze cylindrycznym, które zostały zasilone z przesunięciem fazowym 90 stopni. Bezpośrednio nad elementem dielektrycznym umieszczono antenę o charakterystyce dookólnej ze stałą fazą charakterystyki kierunkowej w funkcji kierunku. Umożliwiło to syntezę rekonfigurowalnej charakterystyki kierunkowej o dwóch listkach głównych - listki te znajdują się w odległości kątowej 180 stopni względem siebie. Charakterystyka ta może być dowolnie obracana w całej płaszczyźnie horyzontalnej (360 stopni), umożliwiając wysoki stopień rekonfigurowalności. Kontrola różnicy amplitud pomiędzy wrotami umożliwia dodatkowo kontrolowanie głębokości minimów charakterystyki kierunkowej.

To innowacyjne rozwiązanie stworzyło alternatywę dla anten z rekonfigurowalną charakterystyką kierunkową, gdzie rekonfiguracja była uzyskiwana przy pomocy elementów przełączających [19 – 22]. Pozwoliło to rozwiązać następujące problemy:

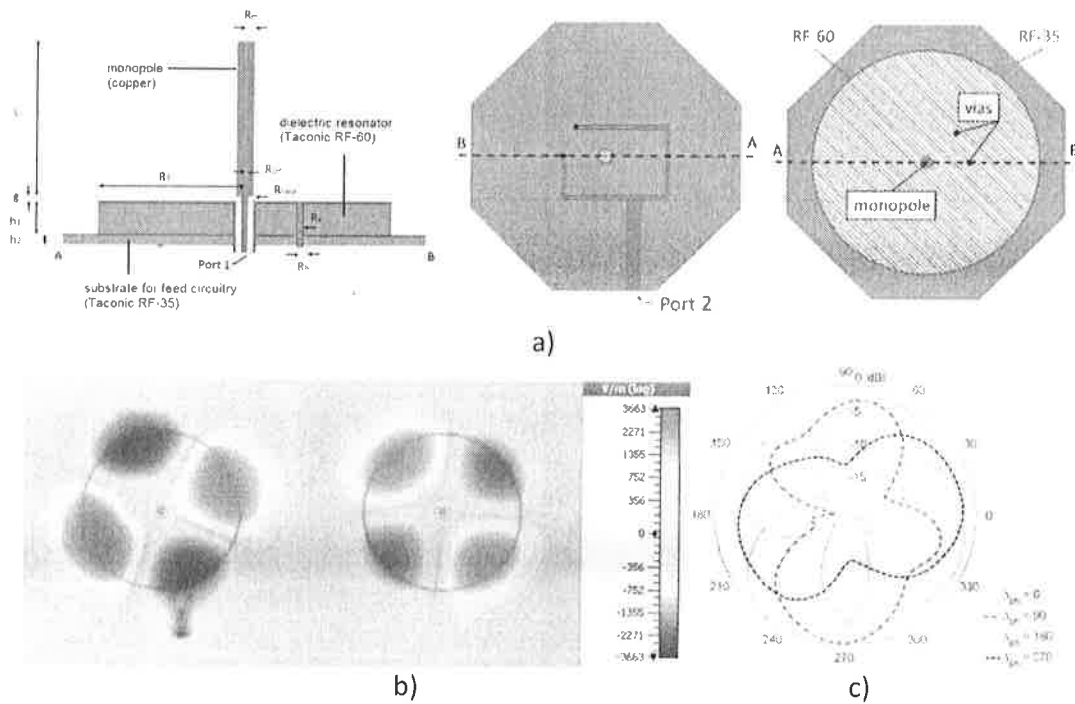
- Umożliwiło uzyskanie różnych charakterystyk kierunkowych dla różnych kanałów częstotliwościowych w obrębie pasma pracy anteny.
- Umożliwiło wykorzystanie – po stronie odbiorczej – technologii cyfrowej syntezy wiązki (ang. *digital beamforming*), w szczególności możliwości jednoczesnego odbioru z wykorzystaniem wielu charakterystyk kierunkowych.
- Możliwość nie-dyskretnego wyboru charakterystyki kierunkowej.

Wyniki te zostały opublikowane w prestiżowym czasopiśmie *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* [2]. Rys. 2 przedstawia przykładowe wyniki badań.

Wkład habilitanta polegał na stworzeniu koncepcji badań, zaprojektowaniu proponowanej anteny, wykonaniu symulacji numerycznych w programach CST Microwave Studio i CST Design Studio, wykonanie prototypu z komponentów dostarczonych przez warsztat, wykonanie większości pomiarów, jak również przygotowanie większości tekstu publikacji.

Kolejnym etapem badań było rozważenie miniaturyzacji wyżej opisanej anteny i związanych z nią ograniczeń. W tym celu przeprojektowano antenę w ten sposób, aby wykorzystywała materiał o większej przenikalności dielektrycznej. Zgodnie z teorią elektrycznie małych anten [23], spodziewanym efektem takiej miniaturyzacji jest obniżenie sprawności i pasma anteny. Prowadzone badania numeryczne były zgodne z tym trendem, niemniej pogorszenie obu parametrów było o wiele bardziej widoczne dla rezonatora dielektrycznego, niż dla anteny monopolowej o tych samych rozmiarach (niezależnie od stratności użytego materiału dielektrycznego). W wyniku badań ustalono, że efekt ten jest związany z wykorzystaniem wyższych modów sferycznych, koniecznych dla stworzenia zależności fazy charakterystyki kierunkowej od kąta. Wyniki tych badań przedstawiono na następujących konferencjach: 2017 IEEE AP-S Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting w San Diego, Kalifornia, USA w lipcu 2017 [14]; EuCAP - European Conference on Antennas and Propagation w Londynie w kwietniu 2018 [15].

Wkład habilitanta polegał na stworzeniu koncepcji badań, wykonaniu niezbędnych symulacji numerycznych w programie CST Microwave Studio, analizie danych i przygotowaniu większości tekstu publikacji.



Rys. 2. a) schemat proponowanej anteny; b) rozkład pola elektrycznego dla dwóch modów rezonansowych w dielektryku; c) wygenerowane przykładowe charakterystyki kierunkowe dla różnych przesunięć fazy

Wykorzystanie superpozycji dwóch modów jest standardową techniką, wykorzystywaną przy projektowaniu anten o polaryzacji kołowej. W tym przypadku uważa się, że najkorzystniejsze jest pobudzenie dwóch modów ortogonalnych z przesunięciem fazowym 90 stopni [24]. Prowadzone przez habilitanta badania wspomnianej techniki generowania sygnałów o polaryzacji kołowej wykazały, że możliwe jest kontrolowanie charakterystyki kierunkowej polaryzacji skrośnej (kołowej) wzdłuż dwóch ortogonalnych płaszczyzn w charakterystyce kierunkowej anteny; przy czym zmiana tej charakterystyki nie pociąga za sobą zmiany charakterystyki kierunkowej polaryzacji głównej (kołowej). Można to przeprowadzić wprowadzając niewielkie przesunięcia fazowe pomiędzy pobudzeniami dwóch ortogonalnych modów, nieznacznie odbiegające od 90 stopni powszechnie uważanych za optymalne. Konsekwencją tego jest możliwość zmiany kierunku w którym polaryzacja skrośna osiąga minimum [odpowiadające czystości polaryzacyjnej określonej jako współczynnik osi (ang. *axial ratio*)].

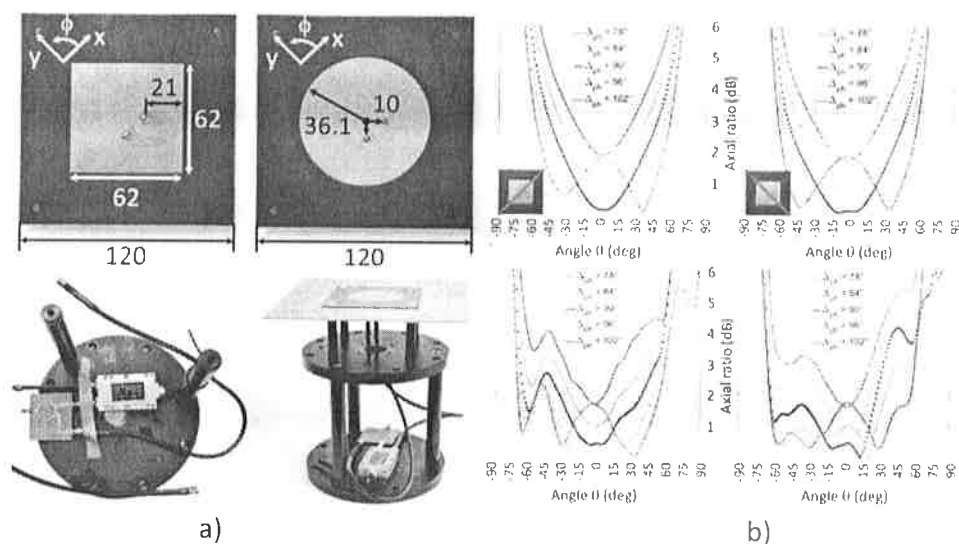
Proponowana technika ma zastosowanie w systemach nawigacji satelitarnej (GNSS). Dokładność lokalizacji w tych systemach może być łatwo zaburzona poprzez sygnały odbite od obiektów dookoła odbiornika. Ponieważ satelity większości systemów GNSS nadają sygnał o polaryzacji kołowej prawoskrętnej, przy odbiciu następuje depolaryzacja takich sygnałów. Odbiorniki GNSS wymagające wysokiej precyzji lokalizacji (np. w sprzęcie geodezyjnym) posiadają zazwyczaj specjalne anteny, które wykorzystując różne struktury do filtracji zdepolaryzowanych sygnałów odbitych, zwłaszcza nadchodzących z niskich kątów nad ziemią [25]. Rozwiązania te jednak znacząco zwiększają rozmiar i koszty produkcji anteny.

Zaproponowane rozwiązanie umożliwia skierowanie minimum charakterystyki kierunkowej polaryzacji skrośnej w kierunku na którym występuje największe prawdopodobieństwo występowania sygnałów odbitych, przy jednoczesnym zachowaniu niezmięionej charakterystyki

A

kierunkowej polaryzacji głównej. Co więcej, rozwiązanie to może być dynamicznie zmieniane, dostosowując kierunek maksymalnej filtracji do zmiennych warunków propagacyjnych. Rozwiązanie jest także kompatybilne z systemami cyfrowej syntezy wiązki.

Wstępne teoretyczne wyniki badań zostały zaprezentowane w 2014 roku na międzynarodowej konferencji Loughborough Antennas & Propagation Conference w Wielkiej Brytanii [10]. Pełne wyniki badań zaproponowanej metody opublikowano w najważniejszym w branży antenowej czasopiśmie IEEE Transactions on Antennas and Propagation [3]. Rys. 3 pokazuje część układu eksperymentalnego wykorzystanego w pracach i zmiany współczynnika osi (*Axial ratio*) dla wybranych płaszczyzn charakterystyki kierunkowej.



Rys. 3. a) część konfiguracji użytej w eksperymencie: anteny, zmienny przesuwnik fazy, dzielnik mocy i mechaniczna struktura zapewniająca stabilność pomiarów; b) zmiany współczynnika osi przy zmianie przesunięcia fazowego pobudeń dla wybranych przekrojów charakterystyki kierunkowej (górną: symulacja w CST Microwave Studio; dolną: pomiary)

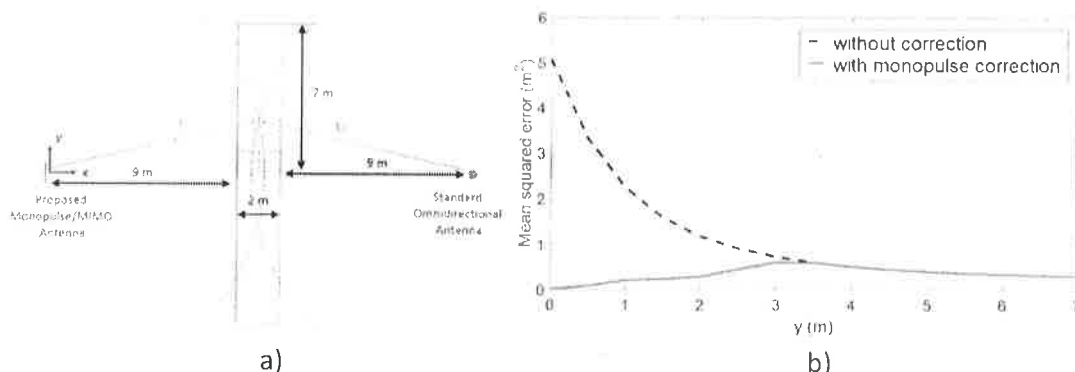
Wkład habilitanta polegał na stworzeniu koncepcji badań, zaprojektowaniu eksperymentu, zaprojektowaniu dwóch anten w nim użytych, wykonaniu symulacji numerycznych w programie CST Microwave Studio, wykonanie pomiarów przy asyście personelu z RWTH Aachen University (gdzie pomiary były dokonane), analiza danych i przygotowanie większości tekstu publikacji.

O ile powyższa technika umożliwiła zwiększenie dokładności lokalizacji w systemach GNSS, systemy takie są zazwyczaj nieskuteczne w lokalizacji w obrębie budynków i zamkniętych przestrzeni. Z tego powodu wiele badań poświęconych jest systemom lokalizacji opartym na systemach bezprzewodowych WLAN [26, 27], które integrują funkcję przesyłu danych i lokalizacji. Większość prac skupia się na stronie algorytmicznej, wykorzystując już istniejące standardowe anteny rekonfigurowalne (np. ESPAR w [26]).

W ramach badań habilitanta opracowano metodę pozwalającą wykorzystać dwumodowe mikropaskowe anteny do jednoczesnego zwiększenia przepływu danych wykorzystującego technologię MIMO i zwiększenia precyzji lokalizacji. Kompatybilność z MIMO została uzyskana poprzez niską korelację charakterystyk kierunkowych, pomierzoną dla dwóch wrót anteny (niski parametr Envelope Correlation Coefficient [28, 29]). Poprawę dokładności lokalizacji uzyskano poprzez opracowaną 'poprawkę monopulsową' (tzw. 'monopulse correction'), która jest wyliczona ze stosunku mocy sygnałów odebranych na dwóch wrótach anteny. Kluczowym elementem proponowanej metody jest antena, w której charakterystyki kierunkowe widziane na dwóch wrótach

[Handwritten signature]

są generowane przez mod odpowiednio parzysty i nieparzysty w aperturze anteny. Powoduje to powstanie charakterystyk kierunkowych, które mogą być – w pewnym zakresie kątów – interpretowane jako różnicowy i sumaryczny, czerpiąc luźną inspirację z radarów monopulsowych [30]. Wyniki badań opublikowano w najważniejszym w branży antenowej czasopiśmie IEEE Transactions on Antennas and Propagation [4]. Rys. 4 pokazuje przykładowe wyniki badań, opisujące proponowany system korekcji monopulsowej.



Rys. 4. (a) rozpatrywany przypadek lokalizacji z użyciem dwóch stacji bazowych, z czego jedna wykorzystuje zaproponowaną antenę; (b) redukcje błędu pomiaru w stosunku do tej samej konfiguracji bez użycia proponowanej metody 'monopulse correction'.

Wkład habilitanta polegał na stworzeniu koncepcji badań, napisanie kodu w języku Matlab użytego do wstępnych analiz, zaprojektowaniu dwóch omówionych w pracy anten, wykonaniu symulacji numerycznych w programie CST Microwave Studio, wykonanie prototypów, wykonanie większości pomiarów, analiza danych, i przygotowanie większości tekstu publikacji.

Problemem badawczym, który zyskuje w ostatnich latach znaczną uwagę, jest integracja anten z panelami fotowoltaicznymi dla zastosowań w Przestrzeniach Inteligentnych i Internetu Rzeczy. Z punktu widzenia ekologicznego, estetycznego, jak i możliwości wykorzystania dużej apertury paneli, rozwiązania takie posiadają szereg zalet [31 - 32]. Umożliwiają one także zwiększenie autonomiczności urządzeń, gdyż apertura wykorzystywana do komunikacji może pełnić dodatkową funkcję, wspomagając zasilanie urządzenia i pozwalając na dłuższy czas pracy bez konieczności wymiany baterii.

Upřednio zgromadzone doświadczenie z antenami o polaryzacji kołowej postanowiono wykorzystać do stworzenia anteny zintegrowanej w panel fotowoltaniczny. Ze względu na kompatybilność z upřednio opracowanym systemem sterowania kierunkiem minimalnego współczynnika osi (AR), zdecydowano się na czteroelementowy szereg anten typu odwrócone-F (ang. *Inverted-F Antenna*) w którym każda antena może być (jeśli zajdzie taka potrzeba) zasilana niezależnie od pozostałych. Na strukturę odwróconego F zdecydowano się ze względu na miniaturyzację i wąski profil anteny. Antenę umieszczono na styku czterech paneli, co pozwoliło wydajnie wykorzystać przestrzeń do wypromieniowania dwóch ortogonalnych składowych. Przykładowym zastosowaniem opracowanej struktury mogą być statki powietrzne (np. samoloty bezzałogowe działające jako punkty dostępowe bezprzewodowego Internetu), gdzie polaryzacja kołowa jest preferowana ze względu na częste zmiany orientacji anteny.

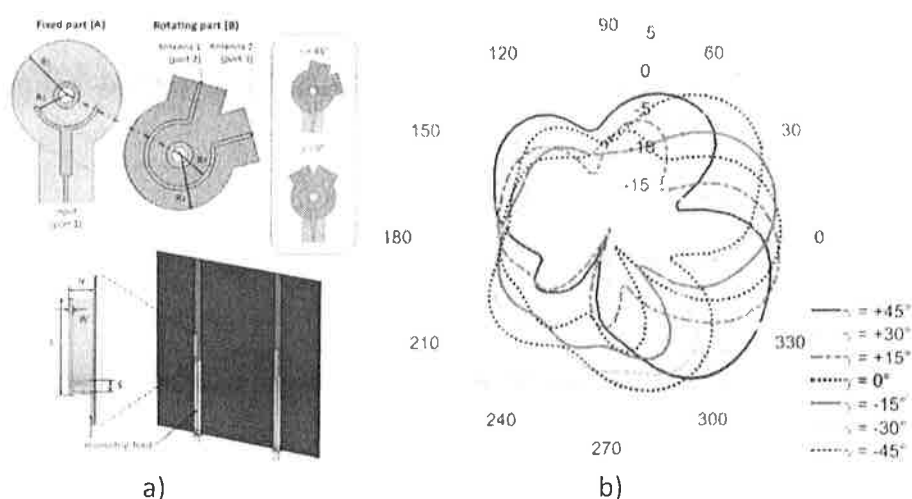
Wyniki badań opublikowano w czasopiśmie *Electronics Letters* [5].

Wkład habilitanta polegał na konsultacjach merytorycznych przy projektowaniu układu zasilającego i przesuwników fazy proponowanej anteny, jak również konsultacjach dotyczących uzyskania dobrej polaryzacji kołowej.

Handwritten signature or mark.

Wiele układów paneli fotowoltaicznych zmienia swoją orientację, w ciągu dnia śledząc wędrówkę Słońca po niebie. Stwarza to problem dla anten zintegrowanych w tych panelach, jako że kierunek wiązki głównej jest zmieniany wraz ze zmianą orientacji panelu. Możliwe jest oczywiście wykorzystanie do kompensacji tego efektu standardowego przesuwника fazy, sterowanego czujnikiem położenia i odpowiednim oprogramowaniem. Niemniej takie rozwiązanie podwyższa koszty produkcji i zużycie energii całego systemu – co stoi w sprzeczności z ekologicznie-motywowanym wykorzystaniem takich systemów.

Jako rozwiązanie systemu opracowano pasywny, 3dB dzielnik mocy zintegrowany z mechanicznym przesuwnikiem fazy, który automatycznie dostosowuje przesunięcie fazowe do zmieniającej się pozycji anteny. W ten sposób wiązka utrzymywana jest w stałej pozycji przy obrotach panelu od -45 do $+45$ stopni, z różnicą amplitudy pomiędzy dwoma wrotami wyjściowymi nie przekraczającą 0.4 dB dla żadnej z rozpatrywanych konfiguracji. Wyniki badań opublikowano w prestiżowym czasopiśmie *Electronics Letters* [6]. Rys. 5 przedstawia przykładowe wyniki badań.



Rys. 5. (a) zaprojektowany układ kontroli przesunięcia fazowe, wraz z dwu-elementowym szykiem zintegrowanym w panelu fotowoltanicznym; (b) zmiany charakterystyki kierunkowej dla różnej konfiguracji układu.

Wkład habilitanta polegał na stworzeniu koncepcji badań, zaprojektowanie układu kontroli przesunięcia fazowego, wykonanie symulacji numerycznych w programie CST Microwave Studio i przygotowanie znacznej części tekstu publikacji.

Innym problemem związanym z antenami o sterowalnej wiązce (wliczając struktury opracowane w ramach opisywanych badań) jest problem osiągnięcia zmiennego przesunięcia fazowego w szerokim zakresie częstotliwości. Opracowano wprawdzie układy ultra-szerokopasmowych przesuwników fazy pozwalających na uzyskanie stałego przesunięcia fazowego w obrębie bardzo szerokich częstotliwości [33]; niemniej techniki takie wykorzystywały zjawisko sprzężenia pojemnościowego i miały ograniczone możliwości rekonfiguracji. W celu rozwiązania tego problemu, habilitant (wraz z dr Vit Sipal) opracowali koncepcję rekonfigurowalnego układu, pozwalającego na zmianę fazy w – teoretycznie – dowolnie szerokim zakresie częstotliwości. Efekt ten uzyskano wykorzystując sprzężenie w polu bliskim dwóch anten o polaryzacji kołowej. Rekonfigurowalność osiągnięto poprzez wprowadzenie obrotu pomiędzy sprzężonymi antenami, co umożliwia wybór dowolnego przesunięcia fazowego. System został opracowany z myślą o kontroli charakterystyki kierunkowej w układach ultra-szeroko pasmowych (UWB).

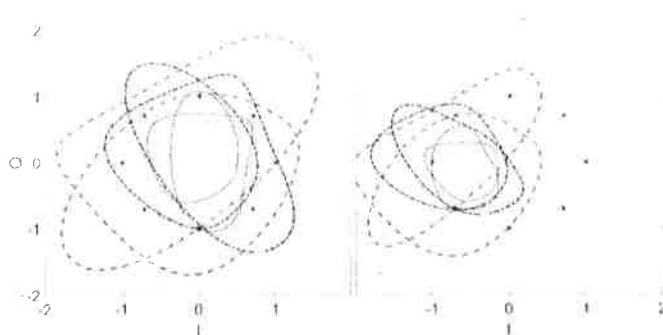
[Handwritten signature]

Wyniki badań opublikowano w czasopiśmie Electronics Letters [7]. Artykuł został wybrany przez edytora czasopisma jako „featured article” wydania w którym się ukazał i opatrzony wywiadem z pierwszym autorem (dr Vit Sipal).

Wkład habilitanta polegał na pomocy merytorycznej przy tworzeniu koncepcji badań, konsultacjach dotyczących aspektów związanych z polaryzacją polową, jak również asysty przy części pomiarów i pomoc w pisaniu tekstu publikacji.

Zastosowanie anten z rekonfigurowalną wiązką dla zwiększenia prywatności przesyłanych danych stwarza możliwość utworzenia dodatkowych poziomów zabezpieczeń, chroniących wrażliwe dane użytkowników w systemach Internetu Rzeczy i Przestrzeni Inteligentnych. Jedną z technologii wykorzystywanych w tym celu jest modulacja kierunkowa, która pozwala na odtworzenie właściwej konstelacji modulowanych symboli tylko wzdłuż jednego kierunku od anteny nadawczej [17, 34]. Metoda ta jest niekompatybilna z antenami rekonfigurowanymi przy pomocy przełączników. Z tego powodu wszystkie znane implementacje modulacji kierunkowej wykorzystywały szyki antenowe.

Badania habilitanta rozwiązały ten problem, wykazując możliwość uzyskania modulacji kierunkowej przy pomocy anten zaprojektowanych w ramach niniejszego ciągu monotematycznego. Metoda ta została zaprezentowana na przykładzie anteny opisanej przez habilitanta w [2]. Wyniki opublikowano w prestiżowym czasopiśmie *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters* w 2016 [8] oraz w tym samym roku na międzynarodowej konferencji naukowej EuCAP 2016 w Davos w Szwajcarii [12]. Rys. 6 przedstawia przykładowe wyniki badań, opisujące zniekształcenia modulacji na płaszczyźnie IQ dla kierunków innych niż kierunek uprawnionego odbiornika.



Rys. 6. Przykładowe trajektorie zniekształcenia punktu na płaszczyźnie IQ wraz ze zmianą kąta z wykorzystaniem opracowanej metody modulacji kierunkowej (w przykładzie użyto modulacji 8-PSK).

Wkład habilitanta polegał na stworzeniu koncepcji badań, napisaniu symulacji w języku Matlab która zaimplementowała proponowaną metodę na przykładzie wcześniej pomierzonych charakterystyk anten, wykonanie symulacji numerycznych w programie CST Microwave Studio i CST Design Studio, analiza danych i przygotowanie większości tekstów obu publikacji.

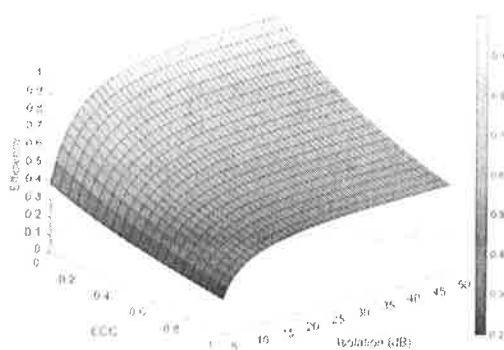
W ostatnim etapie badań wyniki z antenami wielowrotowymi i techniką MIMO zostały wykorzystane do przeanalizowania anten wykorzystywanych w tzw. „full-duplex radio” [35], czyli systemach radiowych w których transmisja i odbiór następują jednocześnie w obrębie tego samego kanału przestrzenno-czasowo-częstotliwościowego. Badania nad takimi systemami zyskują w ostatnim czasie na popularności [36]. Anteny używane w takich systemach są konstruowane w taki sposób, by zminimalizować samointerferencję, tj. silny sygnał z nadajnika przenikający do toru odbiornika i zakłócający odbiór. Jednocześnie – w odróżnieniu od anten MIMO – wiązki nadawcze i odbiorcza powinny być wypromieniowane w ramach tego samego kanału, t.j. tym samym kierunkiem i używając tej samej polaryzacji.



Badania habilitanta nad antenami wielowrotowymi pozwoliły stworzyć ogólny limit maksymalnej osiągalnej sprawności dla wszystkich pasywnych niemagnetycznych anten projektowanych z myślą o „full-duplex radio”. Sprawność ta jest zależna od izolacji pomiędzy wrotami nadawczymi i odbiorczymi, jak również od korelacji pomiędzy ich charakterystykami kierunkowymi. W szczególności jeśli charakterystyka kierunkowa nadawcza i odbiorcza są dokładnie takie same, a izolacja pomiędzy portami jest znacząco dobra (zgodnie z wymogami obniżenia samointerferencji) sprawności anteny pomierzone na porcie nadawczym T_x i odbiorczym R_x muszą spełniać nierówność:

$$\frac{\sqrt{\eta_{T_x}\eta_{R_x}}}{\sqrt{(1-\eta_{R_x})(1-\eta_{T_x})}} \leq 1$$

Gdzie η_{T_x} i η_{R_x} oznaczają sprawności na portach, odpowiednio, nadawczym i odbiorczym. W szczególnym przypadku gdy $\eta_{T_x} = \eta_{R_x}$ sprawność takiej anteny nie może przekraczać 50% (zachowując dobrą izolację i te same charakterystyki kierunkowe dla nadawania i odbioru). Rys. 7 pokazuje przykładowe wyniki badań.



Rys. 7. Przykładowa charakterystyka sprawności dla anteny dwuwrotowej do „full-duplex radio” w funkcji izolacji i korelacji charakterystyk kierunkowych.

Wyniki badań zostały opublikowane w prestiżowym czasopiśmie *IEEE Wireless Communication Magazine* [9], który zajmuje 3 miejsce na liście czasopism z najwyższym współczynnikiem cytowań w telekomunikacji (IF = 9.2). Za badania te habilitant otrzymał we wrześniu 2018 roku nagrodę Toma Brazila CONNECT Excellence in Research Award, która przyznawana jest za najlepsze badania naukowe w telekomunikacji, wykonane w obrębie międzyuczelnianego centrum CONNECT.

Wkład habilitanta polegał na stworzeniu koncepcji badań, wykonanie symulacji numerycznych w programach CST Microwave Studio i CST Design Studio, analiza danych numerycznych, wprowadzenia wzorów i przygotowanie większości tekstu publikacji.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych (artystycznych)

Łączny dorobek habilitanta to 24 publikacje w czasopismach indeksowanych w bazie ISI JCR, 2 aplikacje patentowe i 27 recenzowanych referatów konferencyjnych. Od czasu otrzymania doktoratu habilitant był kierownikiem dwóch projektów współfinansowanych przez Marie Skłodowska-Curie Action z łącznym budżetem ponad 400.000 Euro. Za swoją działalność habilitant zdobył liczne nagrody:

- Inauguracyjna 2018 Tom Brazil’s CONNECT Excellence in Research Award, przyznawana przez międzyuczelniane centrum badawcze CONNECT za najlepsze badania naukowe.
- Nagroda za najlepszy plakat wg. głosów uczestników na 2018 IEEE-EURASIP Summer School on Signal Processing (S3P-2018) w San Vincenzo, Włochy

AD

- Trzecie miejsce za najlepszy artykuł podczas konferencji ISAP 2017 - International Symposium on Antennas and Propagation, Phuket, Tajlandia
- Nagroda „Invention of the month” przyznana w marcu 2016 przez Dublin Region Innovation Consortium
- Nagroda w konkursie 2012 DIT Inventor Competition za najlepszy wynalazek zgłoszony przez pracownika/doktoranta

Poza osiągnięciami opisanymi w ramach jednotematycznego cyklu publikacji habilitant uzyskał następujące osiągnięcia naukowo-badawcze (wybór najistotniejszych):

- Opracowanie metody – wraz ze współpracownikami - wykorzystania sygnałów o polaryzacji kołowej od pomiaru orientacji i prędkości obrotowej. Metoda ta wykorzystuje zmianę fazy w sygnale o polaryzacji kołowej nadawanym z obracającego się nadajnika. Jak wykazał habilitant i współpracownicy takie przesunięcie fazowe jest niezależne od częstotliwości, tj. obrót o dany kąt będzie wywoływał zawsze to samo przesunięcie fazowe dla sygnału o dowolnej częstotliwości [37]. Pozwala to na rozróżnienie takiego przesunięcia fazowego od przesunięcia spowodowanego klasycznym efektem Dopplera. Wyniki tych badań zostały opublikowane w prestiżowym czasopiśmie *IEEE Sensors Journal*.
- Rozszerzenie powyższej metody pomiaru prędkości obrotowej na systemy radarowe. Metoda ta eliminuje potrzebę instalowania aktywnego nadajnika na obracającym się elemencie, zastępując ją pasywnym celem o określonej charakterystyce odbiciowej. Pomiar wymaga użycia prostego radaru Dopplerowskiego. Wyniki tych badań są przedmiotem wniosku patentowego (GB 1622442.0 i PCT/EP2017/084859). Obecnie trwają prace nad próbami wykorzystaniem tej metody w radarach do wykrywania niewielkich bezzałogowych statków powietrznych (tzw. „dronów”).
- Habilitant aktywnie zajmował się także problemami badawczymi dotyczącymi kompaktowych anten o polaryzacji kołowej. Anteny te były przedmiotem rozprawy doktorskiej habilitanta pt. „Advanced Circularly Polarised Microstrip Patch Antennas”, obronionej na Dublin Institute of Technology w 2013 roku, jak również opublikowanych przed uzyskaniem doktoratu 3 publikacji w prestiżowych czasopismach naukowych (w tym dwa w *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*), jednego zgłoszenia patentowego i 5 recenzowanych publikacji na konferencjach międzynarodowych. Tematyka ta była kontynuowana przez habilitanta po uzyskaniu doktoratu, co doprowadziło do stworzenia planarnej anteny szczelinowej o szerokopasmowej polaryzacji kołowej w całym pasmie 3.2 – 6.1 GHz (54 %). Wyniki tych badań opublikowano w prestiżowym czasopiśmie *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.

Literatura

- [16] Y. Ding and V. F. Fusco, “MIMO-inspired synthesis of directional modulation systems,” *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 15, str. 580–584, 2015
- [17] M. P. Daly, J. T. Bernhard, “Directional modulation technique for phased arrays,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57 (9), str. 2633–2640, wrzesień 2009.
- [18] C. Balanis, “Antenna Theory: Analysis and Design”, 3rd Ed., Wiley Interscience, 2005

- [19] S. V. Shynu M. J. Ammann "Reconfigurable antenna with elevation and azimuth beam switching" *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, str. 367-370, 2010.
- [20] S. Yong J. T. Bernhard "A pattern reconfigurable null scanning antenna" *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 10, str. 4538-4544, październik 2012.
- [21] G.-M. Zhang J.-S. Hong G. Song B.-Z. Wang "Design and analysis of a compact wideband pattern-reconfigurable antenna with alternate reflector and radiator" *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 6, no. 15, str. 1629-1635, grudzień 2012.
- [22] M. Rutschlin V. Sokol "Reconfigurable antenna simulation: Design of reconfigurable antennas with electromagnetic simulation" *IEEE Microw. Mag.*, vol. 14, no. 7, str. 92-101, listopad-grudzień 2013.
- [23] H. A. Wheeler, "Fundamental limitations of small antennas," *Proceedings IRE*, vol. 35, str. 1479-1484, grudzień 1947.
- [24] S. Gao Q. Luo F. Zhu *Circularly Polarized Antennas* New York NY USA: Wiley 2014.
- [25] M. Maqsood, S. Gao, T. Brown, M. Unwin, "Effects of ground plane on the performance of multipath mitigating antennas for GNSS," *LAPC Loughborough Antennas and Propagation Conference*, Loughborough, Wlk. Brytania, 8-9 listopad 2010, str. 2276-2279.
- [26] M. Rzymowski, P. Woznica, L. Kulas, "Single-Anchor Indoor Localization Using ESPAR Antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, str. 1183-1186, 2015.
- [27] G. Giorgetti, A. Cidronali, S. Gupta, G. Manes, "Single-anchor indoor localization using a switched-beam antenna", *IEEE Communications Letters*, vol. 13 (1), str. 58-60, styczeń. 2009.
- [28] M. S. Sharawi, "Current Misuses and Future Prospects for Printed Multiple-Input, Multiple-Output Antenna Systems", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 59 (2), str. 162-170, kwiecień 2017.
- [29] R. Cornelius, A. Narbudowicz, M. J. Ammann, D. Heberling, "Calculating the Envelope Correlation Coefficient Directly from Spherical Modes Spectrum", *EuCAP 2017 - European Conf. on Antennas and Propagation*, Paryż, Francja, marzec 2017.
- [30] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", Tata Mc Graw Hill, New York, 2001.
- [31] M. J. Roo Ons, S. V. Shynu, M. J. Ammann, S. McCormack, B. Norton, "Transparent Patch Antenna on a-Si Thin Film Glass Solar Module", *Electronics Letters*, vol. 47 (2), str. 85-86, 2011.
- [32] O. O'Conchubhair, P. McEvoy, M.J. Ammann, "Integration of antenna array with multicrystalline silicon solar cell" *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, str. 1231-1234, 2015.
- [33] A.M. Abbosh, "Ultra-wideband phase shifters", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55 (9), str. 1935-1941, 2007.
- [34] Y. Ding, V. Fusco, "A vector approach for the analysis and synthesis of directional modulation transmitters," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62 (1), str. 361-370, styczeń 2014.
- [35] Z. Zhang et al. "Full-Duplex Wireless Communications: Challenges Solutions and Future Research Directions" *Proceedings IEEE*, vol. 104 (7), str. 1369-1409, lipiec 2016.
- [36] N. Reiskarimian, H. Krishnaswamy "Magnetic-Free Non-Reciprocity Based on Staggered Commutation" *Nature Communications*, vol. 7, kwiecień 2016
- [37] V. Sipal, A. Narbudowicz, and M. J. Ammann, "Contactless Measurement of Angular Velocity using Circularly Polarized Antennas", *IEEE Sensors Journal*, vol. 15 (4), str. 3459-3466, czerwiec 2015

A. Nalini