

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA**  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE  
WYDZIAŁ INFORMATYKI, ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI

KATEDRA TELEKOMUNIKACJI



Autoreferat rozprawy doktorskiej

**ANALIZA ZASTOSOWANIA TECHNIKI MIMO  
W BEZPRZEWODOWYCH SIECIACH  
SENSORYCZNYCH**

mgr inż. Jacek Gruca

Promotor:

dr hab. inż. Wiesław Ludwin, prof. nz. AGH

Kraków, 2012

## 1. Wstęp

W ciągu ostatnich kilkunastu lat wzrosło zapotrzebowanie na systemy, które rozlokowane na określonym obszarze, byłyby w stanie dokonywać pomiarów wybranych wielkości fizycznych i przysyłać ich wyniki do jednego centrum gromadzenia danych. Systemy takie mogą służyć, na przykład, do analizy zmian temperatury, wilgotności powietrza, jak również do ostrzegania przed pożarami lub trzęsieniami ziemi. Do ich budowy wykorzystuje się liczne czujniki (sensory) rozmieszczone na monitorowanym obszarze i transmitujące dane pomiarowe do jednego lub kilku punktów odbiorczych. Ze względu na dużą liczbę sensorów rozmieszczonych w systemie w znacznych odległościach od siebie, do wymiany informacji wykorzystuje się przeważnie technikę radiową. Takie sieci nazywa się bezprzewodowymi sieciami sensorycznymi WSN (*Wireless Sensor Networks*).

Rozmieszczenie sensorów w trudno dostępnych miejscach oraz na obszarach nieurbanizowanych (lasy, łąki, pustkowia) wymaga zastosowania zasilania bateryjnego, gwarantującego prawidłową i niezawodną pracę przez wiele miesięcy, a nawet lat. Ograniczone zasoby energetyczne czujników i długi okres ich użytkowania stanowią poważny problem techniczny, głównie ze względu na moc wyjściową nadajników, konieczną do zapewnienia wymaganego w systemie zasięgu radiowego.

Niewielkie moce sygnałów w torach nadawczych czujników stosowanych w bezprzewodowych sieciach sensorycznych przekładają się na mały zasięg radiowy, który zazwyczaj nie przekracza kilkuset metrów. Pokrycie większych obszarów działaniem sieci WSN wymaga instalacji szeregu dodatkowych radiowych zespołów nadawczo-odbiorczych (stacji przekaźnikowych), zapewnienia im stabilnego zasilania, a także połączenia z centralą systemu. Zasięg działania sieci sensorycznych można zwiększyć przez zastosowanie sensorów wyposażonych zarówno w tor nadawczy, jak i odbiorczy. Tego typu sensory mogą odbierać dane od innych sensorów i następnie retransmitować je dalej.

W roku 1998 Gerard J. Foschini zaproponował alternatywne w stosunku do powszechnie stosowanej w radiokomunikacji techniki SISO (*Single Input Single Output*) rozwiązanie, oparte na użyciu w systemie radiokomunikacyjnym układu wielu anten nadawczych i odbiorczych. Technika ta, nazwana techniką MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) pozwoliła, przy zapewnieniu wymaganej wierności transmisji informacji, wykorzystać zjawisko propagacji wielodrogowej do zwiększenia zasięgu systemów łączności bezprzewodowej bez konieczności podnoszenia wymaganej dla poprawnej i niezakłóconej transmisji łącznej mocy torów nadawczych.

W technice MIMO anteny nadawcze emitują w jednej chwili czasu i w tym samym paśmie częstotliwości sygnały radiowe niosące różne informacje, co powoduje, że na wejściu odbiornika sygnały te wzajemnie się zakłócają. Aby możliwe było rozróżnienie transmitowanych danych, a tym samym ich poprawna detekcja po stronie odbiorczej, konieczna jest znajomość transmitancji kanału radiowego, czyli macierzy funkcji przenoszenia wszystkich torów radiowych przebiegających w systemie MIMO między antenami nadawczymi i odbiorczymi. Techniki detekcji odbieranych sygnałów MIMO wymagają czasochłonnych obliczeń przeprowadzanych na liczbach zespolonych. Stopień komplikacji tych niekiedy bardzo złożonych procedur obliczeniowych prowadzi do dodatkowego zużycia energii i ograniczenia czasu działania systemu.

Dlatego też w ramach niniejszej rozprawy zaproponowano takie uproszczenie sprzętowo-programowe algorytmów implementowanych w radiowych zespołach nadawczo-odbiorczych, które pozwoliłoby na zastosowanie techniki MIMO(2,2) w sieciach sensorycznych bez konieczności stosowania wydajnych układów obliczeniowych.

## 2. Założenia i tezy rozprawy

Jednym z głównych celów niniejszej rozprawy było opracowanie uproszczonego algorytmu kodowania i dekodowania danych w systemie łączności bezprzewodowej opartego na technice MIMO(2,2), który poprzez eliminację operacji macierzowych wykonywanych na liczbach zespolonych pozwoliłby zrezygnować z konieczności stosowania szybkich układów obliczeniowych, a tym samym stałby się bardziej przystępny przy konstrukcji czujników bezprzewodowych sieci sensorycznych.

Opracowano i praktycznie wykonano stanowisko badawcze systemu MIMO(2,2) z zaimplementowanym uproszczonym algorytmem i modulacją OOK. Stanowisko to umożliwiło przeprowadzenie pomiarów wybranych parametrów transmisji danych w technice MIMO(2,2) dla kilku różnych scenariuszy.

Celem niniejszej rozprawy było:

- opracowanie prostej metody transmisji danych dla jednego z najpopularniejszych systemów MIMO;
- zaprojektowanie, wykonanie i uruchomienie prototypu radiowego zespołu nadawczo-odbiorczego o jak najprostszej konstrukcji sprzętowo-programowej;
- ocena wybranych parametrów transmisji zaproponowanych rozwiązań praktycznych przy wykorzystaniu skonstruowanego dla potrzeb rozprawy prototypu radiowego zespołu nadawczo-odbiorczego.

Sformułowano **główną tezę** niniejszej rozprawy doktorskiej, mówiącą o tym, że:

**Bez konieczności wyznaczania elementów macierzy funkcji przenoszenia kanału radiowego, a wykorzystując jedynie proste operacje porównywania i odejmowania, można opracować skuteczny algorytm detekcji sygnałów w systemie MIMO(2,2), który redukuje złożoność obliczeniową procedur dekodowania symboli i ułatwia zastosowanie techniki wieloantenowej w bezprzewodowych sieciach sensorycznych.**

W nawiązaniu do tezy głównej rozprawy określono następujące **tezy poboczne**:

- operacja uśredniania wartości referencyjnych otrzymanych w wyniku wielokrotnej retransmisji podstawowego ciągu symboli treningowych jest prostą i skuteczną metodą redukcji stóp błędów;
- możliwe jest w miarę precyzyjne określenie wzajemnej odległości, odpowiednio, między antenami po stronie nadawczej i odbiorczej, poniżej której następuje wyraźne pogorszenie jakości transmisji wynikające z ograniczenia zjawiska wielodrogowości;
- w systemie opartym na technice MIMO(2,2) możliwa jest poprawa detekcja sygnałów w przypadku utraty dostępności połączenia w jednym z torów odbiorczych, powstałej na skutek głębokiego zaniku radiowego lub awarii układów odbiornika.

## 3. Układ pracy

Prezentowana praca składa się z dziewięciu rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiono ogólne informacje dotyczące możliwości zastosowania techniki MIMO w bezprzewodowych sieciach sensorycznych WSN.

W rozdziale drugim wprowadzono podstawowe pojęcia i omówiono wybrane zagadnienia związane z techniką wieloantenową.

Rozdział trzeci poświęcono architekturze bezprzewodowych sieci sensorycznych WSN. Przeanalizowano problemy wynikające z zastosowania bateryjnych źródeł zasilania sensorów oraz omówiono możliwości poprawy wybranych parametrów sieci przez wprowadzenie techniki MIMO.

W rozdziale czwartym przedstawiono szczegółową budowę nadajnika i odbiornika zespołu nadawczo-odbiorczego oraz zwrócono uwagę na najważniejsze założenia konstrukcyjne. Rozdział piąty zawiera opis uproszczonego algorytmu kodowania i dekodowania danych, a także budowę ramki informacyjnej i sposób odtwarzania synchronizacji.

W rozdziale szóstym omówiono problem odległości wzajemnej anten w systemach MIMO. Zaprezentowano wyniki eksperymentu, podczas którego badano wpływ rozmieszczenia anten na minimalną odległość międzysymbolową.

W rozdziale siódmym przeprowadzono analizę zużycia energii traconej na wykonywanie obliczeń dla uproszczonego algorytmu dekodowania oraz alternatywnych metod LS i AE.

W rozdziale ósmym zaprezentowano wyniki pomiarów podstawowych parametrów transmisji w technice MIMO z zaimplementowanym uproszczonym algorytmem kodowania i dekodowania danych, przeprowadzonych przy użyciu opracowanego zespołu nadawczo-odbiorczego.

W rozdziale dziewiątym omówiono wnioski wynikające z przeprowadzonych badań analitycznych i eksperymentalnych oraz zamieszczono podsumowanie i krótką dyskusję dotyczącą możliwości zastosowania uproszczonego algorytmu do budowy między innymi sieci sensorycznych.

#### **4. Wartość dodana pracy**

W prezentowanej rozprawie zaproponowano kilka istotnych uproszczeń, umożliwiających redukcję złożoności obliczeniowej algorytmów implementowanych po stronie odbiorczej (a tym samym prowadzących do spadku zużycia energii), wykorzystujących jeden z najbardziej popularnych wariantów techniki MIMO, który składa się z dwóch anten nadawczych oraz dwóch odbiorczych.

W zakresie kodowania i dekodowania sygnałów MIMO, zaproponowano algorytm polegający na porównaniu wartości amplitud i faz odebranych symboli z wzorcowymi wartościami przesłanymi w sekwencji treningowej. Pracę algorytmu oparto na prostych operacjach odejmowania i porównywania wartości całkowitych. A co najważniejsze, algorytm ten nie wymaga przeprowadzenia jakichkolwiek obliczeń matematycznych w celu wyznaczenia elementów macierzy transmitancji kanału radiowego, poza zapisaniem wartości kilku współczynników do pamięci procesora.

W niniejszej rozprawie omówiono sposób zastosowania uproszczonego algorytmu dekodowania. Opracowano i praktycznie wykonano stanowisko badawcze systemu MIMO(2,2) z zaimplementowanym uproszczonym algorytmem i modulacją OOK. Stanowisko to umożliwiło przeprowadzenie pomiarów wybranych parametrów transmisji danych w technice MIMO(2,2) dla kilku różnych scenariuszy.

#### **5. Metoda badawcza**

Dla potrzeb niniejszej pracy badanie wpływu wzajemnej odległości anten w części nadawczej oraz odbiorczej przeprowadzono za pomocą eksperymentu pomiarowego. W tym

celu wykorzystano opracowany zespół nadawczo-odbiorczy MIMO(2,2), podłączony do anten nadawczych  $T_1, T_2$  odległych od siebie o  $l_{TX}$  oraz anten odbiorczych  $R_1, R_2$  oddalonych o  $l_{RX}$ . Dystans między zespołem anten nadawczych i odbiorczych w trakcie prowadzenia pomiarów był zawsze stały i wynosił 3,6m. Badania przeprowadzono w warunkach bezpośredniej widoczności anten nadawczych i odbiorczych *LOS (Line of Sight)*.

W trakcie badań dokonano obliczeń analitycznych pozwalających na porównanie stopnia złożoności obliczeniowej zaproponowanego uproszczonego algorytmu dekodowania danych w systemie MIMO z alternatywnymi metodami LS (*Least Squares*) oraz AE (*Averaged Estimator*). Zaprezentowano wpływ stopnia skomplikowania poszczególnych algorytmów na zużycie energii po stronie odbiorczej systemu, a także na czas zajętości procesora i możliwą do uzyskania szybkość transmisji danych w kanale radiowym.

W celu oceny parametrów transmisji omawianego systemu MIMO(2,2) przeprowadzono eksperyment, podczas którego dokonano pomiarów bitowej, symbolowej oraz bajtowej stopy błędów w zależności od wartości *SNR*, określającej stosunek mocy średniej sygnału nośnego do mocy średniej szumu na wejściu układów dekodujących odbiornika. Pomiar przeprowadzono dla różnych długości sekwencji treningowej w celu oceny skuteczności operacji uśredniania wartości referencyjnych na redukcję stóp błędów łącza radiowego. Przeprowadzono ponadto eksperyment polegający na wyłączeniu jednego z torów odbiornika zespołu nadawczo-odbiorczego, aby zbadać zdolność systemu do poprawnego dekodowania informacji w sytuacji awaryjnej lub podczas wystąpienia głębokiego zaniku w pobliżu jednej z anten odbiorczych.

## 6. Wyniki badań

Badania wpływu wzajemnej odległości anten na transmisję danych w technice MIMO wykazały zdecydowaną poprawę detekcji symboli w odbiorniku w przypadku, gdy anteny rozsunęto na odległości  $l_{TX}$  oraz  $l_{RX}$  równe przynajmniej  $\lambda/2$ . Przy odległościach mniejszych od  $\lambda/2$  wartości minimalnej odległości międzysymbolowej  $M_{min}$  stawały się coraz mniejsze. Mimo wszystko jednak i w tym przypadku możliwa była prawidłowa transmisja danych w technice MIMO. W trakcie prowadzenia eksperymentów pomiarowych wykonano pojedyncze próby transmisji przy bardzo małych odległościach  $l_{TX}$  oraz  $l_{RX}$ . Wprowadzając próby te pokazały, że możliwy jest odbiór danych nawet w przypadku całkowitego złączenia ze sobą anten nadawczych oraz odbiorczych, jednak wówczas wyraźnie rosła bitowa stopa błędów.

W czasie pomiarów zaobserwowano także wyraźny wpływ przedmiotów oraz osób znajdujących się w pomieszczeniu na wartości minimalnej odległości  $M_{min}$ . Wszelki ruch występujący na obszarze pomiarowym, na przykład ruch ręki, czy zmiana położenia przeprowadzającego pomiary, wywoływała duże wahania poziomów mierzonych sygnałów.

Kalkulacje prowadzone w celu oceny stopnia złożoności obliczeniowej uproszczonego algorytmu dekodowania wykazały, że procedura estymacji parametrów kanału radiowego ma decydujący wpływ na potrzeby energetyczne procesora i żywotność zastosowanych źródeł zasilania w radiowych zespołach nadawczo-odbiorczych. Staje się on szczególnie widoczny dla dłuższych sekwencji treningowych, dla których czas obliczeń jest relatywnie długi w porównaniu z całkowitą aktywnością procesora.

We wszystkich analizowanych przypadkach uproszczony algorytm dekodowania, zastosowany w systemie MIMO(2,2) charakteryzował się najlepszymi wynikami (największą wydajnością), i to zarówno w aspekcie zużycia energii, jak i maksymalnej przepustowości łącza. A zatem może on z powodzeniem stanowić realną alternatywę dla innych znanych, stosowanych i opisanych w literaturze metod estymacji kanału.

Wyniki pomiarów wybranych stóp błędów w funkcji stosunku  $SNR$  na wyjściu detektorów odbiornika potwierdziły, że opracowany uproszczony algorytm kodowania i dekodowania danych umożliwia nawiązanie połączenia w systemie MIMO(2,2) oraz uzyskanie zadowalającego poziomu błędów.

Eksperyment *MISOITS* wykazał, że w wyniku awarii jednego z torów odbiornika lub w przypadku wystąpienia głębokiego zaniku sygnału w pobliżu jednej z anten odbiorczych nie następuje utrata możliwości poprawnego dekodowania danych. W odniesieniu do systemu *MIMOITS*, w którym sygnały z obu anten odbiorczych były dostępne, eksperyment *MISOITS* charakteryzował się wyższymi o około dwa rzędy wielkości stopami błędów.

W wyniku podwojenia długości sekwencji treningowej, dla eksperymentu *MIMO2TS* uzyskano poprawę wartości stóp błędów o ponad 40% w odniesieniu do wartości otrzymanych dla *MIMOITS*. Zaś wprowadzenie trzykrotnej retransmisji ciągu symboli treningowych dla *MIMO3TS* pozwoliło na obniżenie stóp błędów w przybliżeniu o kolejne 20%.

## 7. Wnioski i uwagi końcowe

Stopień złożoności algorytmów obliczeniowych, będących nieodłącznym elementem techniki MIMO, stanowi bardzo poważny problem ograniczający jej wprowadzenie do sieci WSN. Z tego względu w niniejszej pracy podjęto próbę opracowania uproszczonego algorytmu kodowania i dekodowania danych, przeznaczonego do zastosowań, między innymi w sieciach sensorycznych typu *Multi-hop*, wykorzystujących technikę MIMO oraz czujniki wyposażone w dwie anteny nadawczo-odbiorcze.

Przedstawiono podstawy teoretyczne nowego, uproszczonego algorytmu kodowania i dekodowania danych w systemie MIMO(2,2), który eliminuje konieczność wykonywania skomplikowanych obliczeń związanych z estymacją kanału radiowego. Wykazano, że proces dekodowania informacji przesyłanej w technice MIMO, może być przeprowadzony bez konieczności wyznaczania współczynników  $\hat{h}_{ij}$  macierzy transmitancji kanału radiowego  $\hat{H}$ , czyli najbardziej czasochłonnej operacji realizowanej po stronie odbiorczej systemu. Udowodniono tym samym główną tezę niniejszej rozprawy, że *bez konieczności wyznaczania elementów macierzy funkcji przenoszenia kanału radiowego, a wykorzystując jedynie proste operacje porównywania i odejmowania, można opracować skuteczny algorytm detekcji sygnałów w systemie MIMO(2,2), który redukuje złożoność obliczeniową procedur dekodowania symboli i ułatwia zastosowanie techniki wieloantenowej w bezprzewodowych sieciach sensorycznych.*

Przeprowadzono analizę zużycia energii na potrzeby wykonywanych obliczeń, wynikającą z konieczności zasilenia procesorów i przeprowadzenia operacji estymacji kanału radiowego oraz dekodowania odbieranych symboli informacyjnych. Wykazano, że uproszczony algorytm kodowania i dekodowania danych w technice MIMO, w porównaniu z popularnymi algorytmami LS i AE, niezależnie od zastosowanej szybkości transmisji symboli w kanale radiowym oraz częstotliwości taktowania procesora, charakteryzuje się najmniejszą złożonością obliczeniową.

Zaprezentowano wyniki pomiarów wybranych stóp błędów w funkcji stosunku  $SNR$  na wyjściu detektorów odbiornika. Potwierdzono eksperymentalnie, że opracowany uproszczony algorytm kodowania i dekodowania danych w systemie MIMO(2,2) może być z powodzeniem implementowany w tanich i prostych układach nadawczo-odbiorczych czujników bezprzewodowych sieci sensorycznych WSN, jako alternatywa dla innych znanych metod transmisji informacji w systemach MIMO. Uzyskano zadowalające wartości stóp

błędów, pomimo braku jakiegokolwiek kodowania nadmiarowego, zabezpieczającego prowadzoną transmisję.

Poprzez wyłączenie jednego z torów odbiornika wykazano, że wystąpienie głębokiego zaniku sygnału w pobliżu jednej z anten odbiorczych lub awaria układu, nie musi oznaczać utraty możliwości poprawnego dekodowania danych. Udowodniono tym samym jedną z tez postawionych w niniejszej rozprawie mówiącą o tym, że *w systemie opartym na technice MIMO(2,2) możliwa jest poprawa detekcja sygnałów w przypadku utraty dostępności połączenia w jednym z torów odbiorczych, powstałej na skutek głębokiego zaniku radiowego lub awarii układów odbiornika.*

Zaprezentowano wyniki eksperymentu, w trakcie którego zbadano minimalną odległość międzysymbolową w funkcji wzajemnej odległości odpowiednio dwóch anten nadawczych i odbiorczych systemu MIMO(2,2). Wykazano, że rozsuniecie anten zarówno odbiorczych, jak i nadawczych do wartości wynoszących co najmniej połowę długości fali  $\lambda/2$ , skutkuje wyraźnym zwiększeniem odległości międzysymbolowej, a tym samym poprawą prawdopodobieństwa poprawnego rozróżnienia transmitowanych w systemie MIMO symboli. Tym samym udowodniono tezę, że *możliwe jest w miarę precyzyjne określenie wzajemnej odległości, odpowiednio, między antenami po stronie nadawczej i odbiorczej, poniżej której następuje wyraźne pogorszenie jakości transmisji wynikające z ograniczenia zjawiska wielodrogowości.*

Podczas badań eksperymentalnych przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy wykazano, że operacja uśredniania wartości referencyjnych, uzyskanych w wyniku kilkukrotnej retransmisji podstawowego ciągu symboli treningowych jest bardzo prostą i skuteczną metodą redukcji stóp błędów w uproszczonym systemie MIMO(2,2). Podwójna retransmisja symboli treningowych prowadziła do spadku stóp błędów o około 40%, natomiast w przypadku potrójnej retransmisji uzyskano redukcję o dalsze 20%. Potwierdziło to tezę, że *operacja uśredniania wartości referencyjnych otrzymanych w wyniku wielokrotnej retransmisji podstawowego ciągu symboli treningowych jest prostą i skuteczną metodą redukcji stóp błędów.*

### **Wybrane prace doktoranta**

[1] Gruca Jacek, Wiesław Ludwin, „*Koncepcja budowy zespołu nadawczo-odbiorczego opartego na technice MIMO i modulacji ASK*”, Zeszyty naukowe Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, czerwiec 2007, ISBN 978-83-60799-00-2

[2] Gruca Jacek, Wiesław Ludwin, „*Wpływ rozmieszczenia anten w radiowym zespole nadawczo-odbiorczym na detekcję danych w systemie MIMO(2,2) z modulacją ASK*”, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne nr 4/2008, ISSN 1230-3496