



Zbigniew KRAWCZYK

# KORZYŚCI Z ZASTOSOWANIA SYSTEMÓW MIMO W RUCHU DROGOWYM

### Streszczenie

Istniejące i proponowane systemy ICT wspomagające ruch drogowy wykorzystują istniejącą infrastrukturę i sieci telekomunikacyjne, teleinformatyczne. Problematyka poziomu odbieranego sygnału, zasięgu została omówiona w wielu publikacjach. W niniejszym referacie zajęto się korzyściami płynącymi z zastosowania techniki MIMO: zwiększeniem przepustowości i niezawodności w zmiennym środowisku propagacyjnym. W referacie autor prezentuje wybrane wyniki eksperymentów symulacyjnych dla prostych układów Alamaouti'ego w warunkach zaników Rayleigh'a. Dokonuje analizy porównawczej przepustowości oraz jakości kanałów radiowych (BER) dla systemu jedno i wielokanałowego.

### WSTĘP

Mobilne środowisko radiowe jest środowiskiem statystycznym. Opisuje się go modelami statycznymi propagacji, quasi-statycznymi (np. model Yakouba<sup>1</sup>[1]). Znacznie bliższe rzeczywistych procesów zachodzących w kanałach transmisyjnych są modele dynamiczne propagacji. Ujmują one chwilowe właściwości kanału radiowego. Na skutek jego zmienności ulega zmianom amplituda i faza sygnału. Występują także opóźnienia transmisji. Poziom odbioru sygnału jest zmienny na skutek zakłóceń zwanych zanikami (*fading*). Mogą być one selektywne i nie selektywne, szybkie i wolnozmiennie. Znanych jest szereg metod walki z zanikami. Oceną jakości zastosowanego systemu jest zazwyczaj elementowa stopa błędów – BER (*Bit Error Rate*) rzadziej PSR (*Packets Success Rate*).

Klasyczne zapobieganie zanikom selektywnym (rozmycie impulsu w czasie) to stosowanie np. systemu *Rake*. Przemieszczanie się odbiornika i nadajnika skutkuje zmianą widma częstotliwości odbieranego sygnału. Stosuje się wtedy OFDM (*Orthogonal Frequency Division and Multiplexing*). Osiągnięcia z zastosowaniem tej ostatnio wymienionej technologii (pomimo i jej słabych punktów) są imponujące. Dla kanału z zanikami selektywnymi wolnozmiennymi typu Nakagami zastosowano OFDM i osiągnięto [2] BER =  $10^{-12}$ !. Istnieje szereg innych metod walki z zanikami np. stosowanie filtru RCF (*Raised Cosine Filter*), filtracja LMS (*Least Mean Square*). Wspomniane metody poprawiają BER co najmniej o rząd wielkości – do minimalnego akceptowalnego poziomu  $\Rightarrow 10^{-3}$ . Pozostają jeszcze zmiany fazy sygnału pod wpływem zaników szybkich – tzw. *floor effect*<sup>2</sup>. Te ostatnie to wynik zakłóceń multiplikatywnych.

<sup>1</sup> Model generujący rozkłady: Nakagami, Rice'a, Rayleigh'a, jednostronny Gaussa

<sup>2</sup> Zmiana fazy sygnału użytecznego. Mogą one być ograniczone, głównie poprzez zmniejszenie szybkości transmisji oraz pojemności kanału.

Proponowane szybkie systemy ostrzegania w ruchu drogowym (DSRC, i- radar [3] itp.) oraz te wolne typu e-Call, czy różne systemy monitoringu korzystają z sieci telefonii komórkowej (a raczej z nakładki GPRS), sieci bezprzewodowych WLAN typu 802.11 a, b/g, p oraz systemu GPS czy DGPS. Wszystkie w/w technologie wpisały się z powodzeniem w wielu zastosowaniach łączności bezprzewodowej. Ale, w zatłoczonej przestrzeni radiowej potrzebna jest generalnie technologia tworząca w danym paśmie częstotliwości zwielokrotnioną liczbę kanałów. Zapowiadane w 2010 roku wykorzystanie standardu 802.11n (MIMO<sup>3</sup>) stało się rzeczywistością – przykład szybkiego internetu LTE. Zastosowanie systemów o dywersyfikacji przestrzennej -MIMO ma za zadanie stworzyć większą przestrzeń wyboru dróg transmisji w zmiennym środowisku. Zwiększa średnią przepustowość oraz redukuje BER o parę rzędów wielkości, co wykazano w referacie.

## 1. PRZEPUSTOWOŚĆ W SYSTEMACH MIMO ALMAOUTI'EGO

System MIMO ma swój początek u Fochiniego [6] i Alamoutiego [7]. Jednym z podstawowych parametrów sieci komputerowej jest jej przepustowość. Jest ona określana na kilka sposobów. Podstawę stanowi jednak definicja Shannona. Rozszerzenie tej definicji podane przez Osteyee [5] pozwala zdefiniować przepustowość dla systemu wieloantenowego.

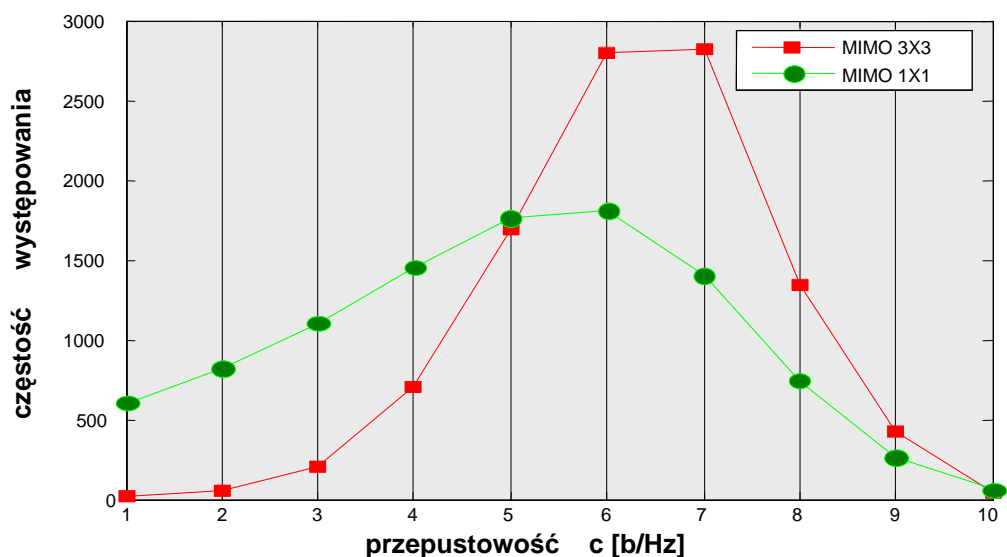
$$c = \log_2 \{ \det [ I_M + (\rho / M) H H^* ] \} \quad (1)$$

Gdzie;  $c$ -przepustowość [b/Hz],  $\rho$  -stosunek sygnał/szum [W/W],  $I_M$ - macierz jednostkowa,  $H$ - macierz prostokątna  $M \times N$ ,  $M$ - liczba anten nadawczych,  $N$ - liczba anten odbiorczych,  $H^*$ - macierz transponowana Hermitowska. Ponieważ składniki macierzy  $H$  są losowe, przeto także sama macierz i przepustowość stanowią zmienne losowe. Traktując zaniki sygnału na trasie propagacji jako funkcję odcinkowo-stałą (*slow flat fading*) i kodując kanał dla wielu takich odcinków, możemy  $c$  traktować jako wartość oczekiwaną przepustowości wg Shannona dla kanału ergodycznego. W praktyce posługujemy się dystrybuantą  $C$ . Wyliczenie przepustowości metodą analityczną jest w zasadzie niemożliwe. Znane są natomiast wyniki eksperymentów symulacyjnych dla prostych układów Almaoutiego (Pawelec, Kosmowski [8,9]). W referacie (poniżej) zamieszczono wyniki badań symulacyjnych wg programu w języku matlab.

## 2. EKSPERYMENTY SYMULACYJNE – WYZNACZENIE PRZEPUSTOWOŚCI W WARUNKACH ZANIKÓW RAYLEIGH'A

Na rysunku 1 (poniżej) widać przepustowość ulegającą zmianom. W pewnych okresach czasu przepustowość systemu jest większa, w innych mniejsza. Dla MIMO3x3 największa częstość przepustowości odpowiada wartościom średnim (odcięte 5-6) oraz dużym (odcięte 7-8). Dla MIMO1x1 natomiast większość przepustowości przypada na wartości *średnie* (5-7) oraz *małe* (1-3).

<sup>3</sup> Multiple Input Multiple Output- system omówiony w [ 4] (Pawelec, Krawczyk)



Rys.1. Rozkład przepustowości dla MIMO3x3 oraz dla pojedynczego kanału MIMO1x1 w warunkach zaników Rayleigha

Źródło: własne

Porównując wykresy z rysunku 1 zauważamy, że MIMO poprawia wyraźnie charakterystykę łącza: maleje odsetek emisji o małej przepustowości na rzecz emisji o przepustowości średniej i dużej.

### 3. NIEZAWODNOŚĆ W SYSTEMACH MIMO

Miarą jakości systemu łączności, niezawodności systemu łączności jest elementowa stopa błędów –BER w odniesieniu do rodzaju zaników. Te z kolei są scharakteryzowane przez tzw. znormalizowane pasmo zaników BT. Gdzie B oznacza pasmo koherencji<sup>4</sup>, natomiast T czas trwania chipa, 1/T oznacza szybkość transmisji. Im większe BT tym wolniejsza częstość zaników. Inaczej – są one bardziej szkodliwe dla jakości odbieranego sygnału.

#### 3.1. Elementowa stopa błędów, a szybkość zaników i pasmo

Poddano badaniom symulacyjnym model Alamouti’ego (prezentowano w różnych publikacjach np. w [ 9]) przy zmiennej szybkości zaników.

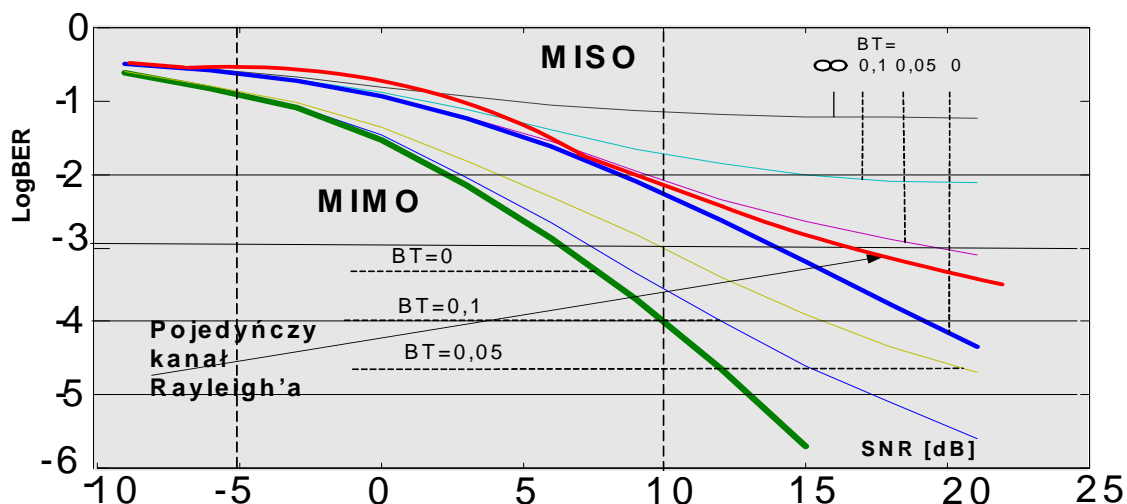
Wyniki modelowania procesów odbioru przedstawiono na rysunku 2. Oryginalne krzywe Alamouti’ego dla  $h(t)=h(t+T)$  są przedstawione liniami pogrubionymi i oznaczone przez  $BT=0$ . Inne krzywe dotyczą stanu odejścia od tego założenia i przyjęcia wartości transmitancji  $h(t)$  zgodnie z MEDS<sup>5</sup>. Stopień odstępstwa jest określony znormalizowanym pasmem zaników BT. Na rysunku 2 pokazano dwie grupy krzywych, dla tzw. układu MISO (2 anteny nadawcze, jedna odbiorcza) oraz MIMO (po 2 anteny z każdej strony). Miarą jakości układu jest elementowa stopa błędów transmisji BER dla danego systemu.

<sup>4</sup> Wg Rappaport’a – B-pasmo spowodowane rozproszeniem ech sygnału. Przykładowo : dla technologii DSSS, okresu chipa  $T_s=1\mu s$ ,  $B=2MHz$ , dla  $T_s=1/11 \times 1\mu s$   $B=22MHz$

<sup>5</sup> Method of Exact Doppler Spread

W miarę, jak wzrasta szybkość zaników  $BT^6$ , jakość pracy układu się pogarsza i przy pewnym stosunku SNR stopa przestaje reagować na podwyższenie mocy. Jest to wyraźnie widoczne dla układu MISO, gdzie powyżej  $SNR=10$  dB stopa staje się gorsza, niż dla indywidualnego kanału Rayleigh'a

Dla MIMO2x2 możliwe jest uzyskanie średniej stopy błędów  $10^{-4}$  za cenę niewielkiego zwiększenia mocy sygnału względem stanu bez zaników (ok. 6 dB). Zysk energetyczny wobec pojedynczego kanału Rayleigh'a na poziomie  $BER=10^{-4}$  (niewidoczne na rysunku) wynosi wtedy około 20 dB, czyli 100 razy. Jest to wciąż duży zysk w stosunku do konwencjonalnych łączy.



Rys.2. Przebieg stopy błędów dla MIMO/MISO w funkcji mocy w obecności zaników

Źródło: [4]

### 3.2. Kompensacja ujemnego wpływ efektu Dopplera

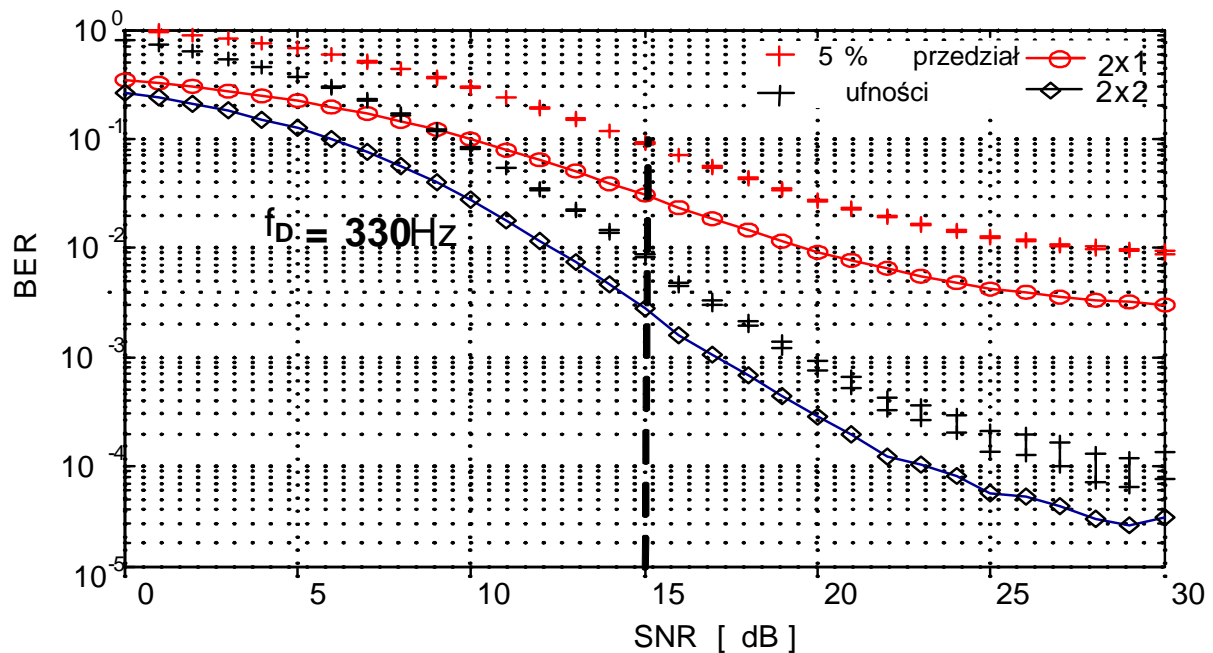
Standardy sieci WLAN (IEEE) korzystają zazwyczaj z modulacji DSSS, QPSK, QAM + OFDM oraz DPSK. Zakłada się, że system MIMO jest wykorzystany dla potrzeb transportu drogowego ze szczególnym uwzględnieniem kwestii bezpieczeństwa<sup>7</sup>. Przeprowadzono modelowanie procesów odbioru opierając się na modelu Almaouti'ego. Przesyłany sygnał jest zmodulowany 8-wartościową modulacją DPSK z uwzględnieniem efektu Dopplera w paśmie częstotliwości odpowiadającym standardowi 802.11b/g. Jako kryterium odbioru przyjęto ML (*Maximum likelihood*).

Na rysunku 3 pokazano wpływ efektu Dopplera na jakość odbieranego sygnału dla konwencjonalnego systemu MISO2x1 oraz MIMO2x2 dla częstotliwości Dopplera  $f_D=330\text{Hz}$ <sup>8</sup>. Różnica jakości w odbiorze to ponad rząd wielkości już dla  $SNR=15\text{dB}$  oraz kilka rzędów wielkości dla  $SNR=30\text{dB}$ . Nie jest to wynik rewelacyjny –  $BER=10^{-4}$  dla SNR niewiele ponad 20dB, ale należy go odnieść do stosunkowo dużej częstotliwości Dopplera. Wniosek- technika MIMO łagodzi wpływ efektu Dopplera na jakość odbieranego sygnału.

<sup>6</sup> Parametr  $BT=0,1$  oznacza, że częstość zaników jest średnio 10 razy wolniejsza od szybkości transmisji sygnału  $1/T$ .

<sup>7</sup> Koncepcja wczesnego ostrzegania i-radar zaprezentowana w [5]

<sup>8</sup> (oznacza to prędkość poruszającego się pojazdu odpowiednio  $V=150\text{km/h}$ , dla pasma 802.11b/g)



Rys.3. Wpływ efektu Dopplera na jakość odbioru sygnału dla systemów 2x1 i 2x2

Źródło: własne

## WNIOSKI

Korzyści płynące z zastosowania systemów MIMO to albo znacznie większa średnia przepustowość łącza, proporcjonalnie do liczby użytych anten, albo odpowiednio mniejsza średnia stopa błędów w stosunku do indywidualnego kanału z zanikami Rayleigha. Zysk energetyczny dla 4-antenowego układu MIMO w warunkach umiarkowanie szybkich zaników płaskich ( $BT=0.1$ ) wynosi blisko 100 razy względem indywidualnego kanału Rayleigha. Ujemną stroną nowej technologii jest jej złożoność oraz znacznie większe koszty. Obecnie nie ma innej alternatywy dla coraz bardziej zatłoczonej przestrzeni radiowej.

W modelu MIMO nie uwzględniono zaników selektywnych (nie płaskich), ponieważ można je neutralizować drogą podziału pasma kanału technikami OFDM. Nie uwzględniono korelacji między antenami odbiorczymi. Pominięto też zagadnienie zmiany fazy i amplitudy zachodzące w czasie trwania pojedynczego bitu. Rozszerzone zagadnienia związane z korelacją sygnałów odbiorczych są prezentowane w referacie - J. Pawelec, Z. Krawczyk, „Modelowanie Systemów MIMO w środowisku zaników szybkich“, Transcomp XV<sup>th</sup> Conference 2012.

## ROAD TRAFFIC COMMUNICATION

### Abstract

*Dedicated ICT systems for road traffic are based on infrastructure and telecommunications wireless networks. Some problems connected with level of received signal as well as have been discussed in many publications. In this paper the following advantages resulting from application of MIMO technique have been taken into account: increase of the capacity of channel as well as reliability in varied transmission medium. There have been also presented results of simulation experiments for simple Alamouti systems under conditions of Rayleigh fading. Comparison of capacity and quality (BER) of channel for SISO and multichannel systems has been also presented.*

## BIBLIOGRAFIA

1. M. Yacoub, „k-m Distribution”, *XIX Simposio Brasileiro de Telecomunicacoes* 2001
2. Ch. Kaligorias, C. Robertson, “ Performance Analysis of the IEEE 802.11a WLAN Standard Optimum and Sub-Optimum Receiver in Frequency-Selective, Slowly Fading Nakagami Channels with AWNG and Pused- Noise Interference”, *IEEE MILCOM04*, Monterey, November 2004
3. Z. Krawczyk , “Application of Wireless Sensor Networks to Early Warning and Collision Avoidance in Road Transport”, Doctoral Dissertation, Radom University of Technology, 2010.
4. J. Pawelec, Z. Krawczyk “Nowe możliwości komunikacji w sieciach MIMO”, *Transcomp, XIV<sup>th</sup> International Conference*, Zakopane 2011, 4-6 December
5. Osteyee and I. Good, *Information Weight of Evidence – the Singularity between Probability Measures and Signal Detection*, Springer Verlag, New York 1970.
6. Foschini, “Layerd Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment when using Multi-element Antennas”, *Bell Labs Technical Journal*, vol.2 pp.41-59, Autumn1996
7. S. Alamouti, “A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communicati-ons”, *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1452-1458, October 1998
8. Kosmowski K., Pawelec J., “A Comparison of Receiver Strategies in STBC MIMO Systems under Challenging Environment”, in *proc. The 4-th International Conf. on Comm. Theory, Reliability, and Quality of Service (CTRQ 2011)*, 17-22 April 2011. <http://www.thinkmind.org/index.php?view=instance&instance=ctrq+2011>.
9. J. Pawelec, “Performance of Alamouti’s MISO and MIMO Systems over Flat Fading Channels with Cross-correlation”, *Military Communications and Information Systems Conference*, Amsterdam, October 17-19, 2011

### *Autor:*

**dr inż. Zbigniew KRAWCZYK** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu