

Józef PAWELEC<sup>1</sup>  
Zbigniew KRAWCZYK<sup>2</sup>

## NOWE MOŻLIWOŚCI KOMUNIKACJI W SIECIACH MIMO

Artykuł dotyczy nowej techniki transmisji informacji w sieciach bezprzewodowych. Polega ona na tworzeniu wielu kanałów (ścieżek) przestrzennych między nadawcą i odbiorcą, co pozwala znacznie zwiększyć sumaryczną przepustowość łącza i/lub niezawodność. Autor wprowadza prosty model takiej transmisji, w którym uwzględnia istotne czynniki środowiskowe, w tym nie-selektywne (płaskie) zaniki sygnału. W efekcie otrzymuje się w drodze symulacji Monte Carlo krzywe elementowej stopy błędów w funkcji stosunku mocy sygnał/szum dla parametrycznej zmiany znormalizowanego pasma zaników  $BT$ , gdzie  $B$  - pasmo koherencji (niestalości) zaników,  $1/T$  - szybkość transmisji sygnału. We wnioskach autor potwierdza efektywność nowej technologii z jednoczesnym zastrzeżeniem, że faktyczne zyski są znacząco mniejsze od przewidywań teorii dla typowych warunków eksploatacji i że konieczne są duże nakłady środków finansowych w toku opracowania i wdrażania nowej technologii do praktyki

## QUALITY OF WIRELESS TRANSMISSION OVER MIMO CHANNEL

The paper deals with a new technique of signal transmission in wireless networks. It consists in creation the many space channels between transmitter and receiver, which facilitates in significant growth of aggregate link capacity and/or reliability. In the paper the simple model of such transmission is given, which takes into account the essential environment factors, including non-selective fading. In a result the BER curves are obtained via Monte Carlo simulation for different normalized fading bandwidth  $BT$ , where  $B$  is a Doppler shift and  $T$  - duration of a signal symbol. In conclusion a high efficiency of new technology is emphasized, and some limitations specified such as high complexity and cost. The real gain is, however, quite well, thou lower than predictions of the pure theory.

### 1. WSTĘP

Komunikacja bezprzewodowa rozwija się z zawrotną szybkością. Mniej więcej co dwa lata podwaja się strumień informacji przesyłanej tą drogą. Powstają obawy, że za kilka lat może nastąpić regres wywołany zajęciem wszystkich dostępnych częstotliwości i powstaniem dużych wzajemnych zakłóceń. Stan taki daje się już zauważyć w Stanach Zjednoczonych.

<sup>1</sup> Politechnika Radomska, Wydział Transportu, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, tel: 0483617757, km. 606786206, e-mail: j.pawelec@wil.waw.pl;

<sup>2</sup> Politechnika Radomska, jak wyżej, tel: 0483617714, e-mail: z.krawczyk@pr.radom.pl

Uczeni zaczęli w związku z tym szukać rozwiązań na polu nowych technologii. Potomek wielkiego Bella – Foschini<sup>3</sup> wymyślił jeszcze w końcowych latach 90. technikę MIMO (*multiple input- multiple output*), która daje szansę zwiększenia przepustowości sieci proporcjonalnie do liczby użytych anten, przy niezmienionej mocy i paśmie zajmowanych częstotliwości. Na konferencjach telekomunikacyjnych (*IEEE –VTC, IEEE-COM, MILCOM*) dominuje temat - MIMO. W chwili obecnej jest już oferowana, także w Polsce, technologia *MIMO- LTE (long term evolution)* dla sieci komórkowych.

Niniejszy artykuł wyjaśnia mechanizmy działania nowych systemów. Wykazuje jednocześnie, w oparciu o obliczenia i symulacje, że znaczący wzrost przepustowości jest możliwy, ale wymaga bardzo wielu zabiegów, które kosztują i dają w efekcie nie aż tak wielkie zyski, jakby to wynikało z teorii. Koszty te należy jednak podjąć, bo nie ma innego lepszego wyjścia. Prezentowany materiał nie był dotąd nigdzie publikowany. Przewiduje się krótką prezentację o zbliżonej tematyce na konferencji MCC w Amsterdamie

## 2. POJEMNOŚĆ ŁĄCZA W SYSTEMIE WIELOANTENOWYM

Jeszcze na długo przed Foschinim uczeni przewidzieli możliwość zwiększenia przepustowości łączy na drodze dywersyfikacji przestrzennej. Wg [3]

$$c = \log_2 \{ \det[\mathbf{I}_M + (\rho / N)\mathbf{H}\mathbf{H}^*] \} \quad [b / sHz] \quad (1)$$

gdzie  $c$  – przepustowość;  $\rho$  – średni stosunek sygnał/szum (SNR);  $\mathbf{I}_M$  – macierz jednostkowa  $M \times N$ ;  $\mathbf{H}$  – macierz prostokątna  $M \times N$ ;  $M$  – liczba anten odbiorczych;  $N$  – liczba anten nadawczych;  $\mathbf{H}^*$  - macierz transponowana hermitowska<sup>4</sup>.

Ponieważ składniki macierzy  $\mathbf{H}$  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  $C$ .

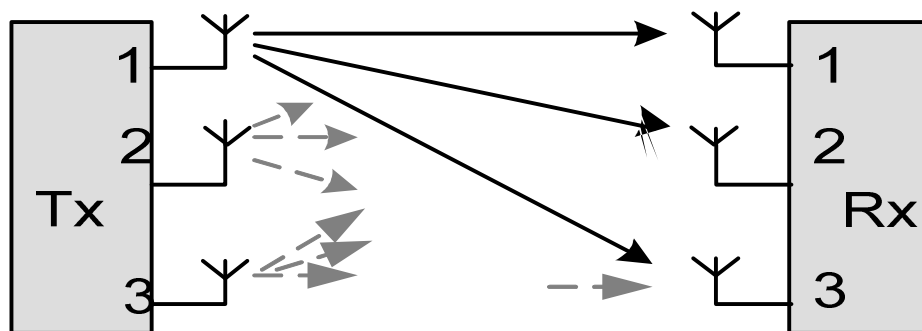
Przykład:

Przyjęto: 3 układy MIMO zawierające, odpowiednio, po jednej, po dwie i po trzy anteny z każdej strony łączy, rys.1. Niech zasięg łączy  $D=150\text{m}$ , odstęp między antenami  $d=1,5\text{m}$ , długość fali  $\lambda=15\text{cm}$  (2,4 GHz), średni stosunek mocy sygnału do szumu,  $\text{SNR}=10$ . Przepustowość łączy oblicza się według równania (1) dla losowych wartości  $\mathbf{H}$  odpowiadających rozkładowi Rayleigh'a. Dla zachowania dokładnych relacji między trzema grupami wyników zastosowano jednakowe ziarna generatora losowego *seed 0* oraz jednakowe liczby losowań 10.000 dla każdego bloku pomiarowego.

dla każdego bloku pomiarowego. Wynikiem próby będzie dystrybuanta  $C$ , jej wartość średnia, minimalna i maksymalna. Przy sumowaniu sygnałów w odbiorniku zostaną uwzględnione różnice dróg i faz sygnałów zgodnie z [2].

<sup>3</sup> (V-BLAST- Vertical-Bell Laboratories Algorithm, Space-Time, [1])

<sup>4</sup> Elementami  $\mathbf{H}$  są zmienne gaussowskie zespolone, kołowo symetryczne o wartości średniej 0 i wariancji 1 ( $z=x+jy$ ,  $\sigma_x^2/2+\sigma_y^2/2=1$ ).

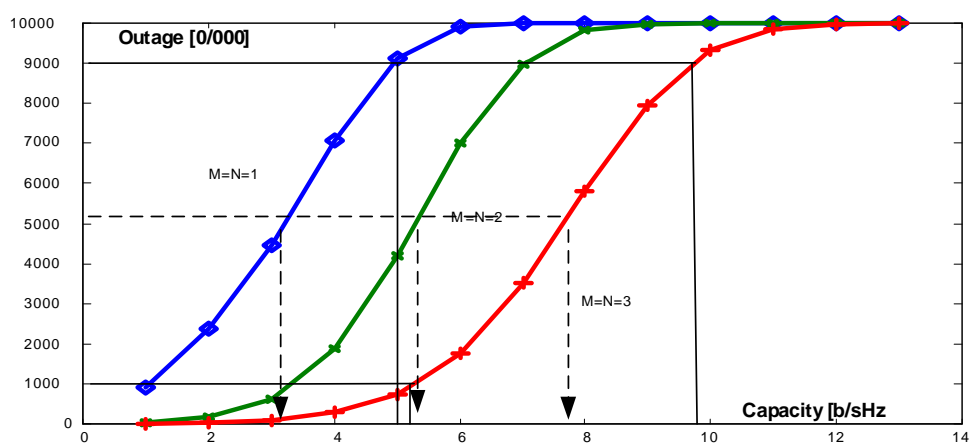


Rys.1. Ilustracja systemu MIMO o liczbie anten  $M=N=1,2,3$  Koncepcja

Przyjmuje się, że kanały są nie-skorelowane i podlegają zanikom powolnym i płaskim. Uzyskane rezultaty zamieszczono w tabelicy I oraz na rysunku 2. Z tabelicy wynika, że średnia przepustowość  $C$  rośnie w przybliżeniu liniowo ze wzrostem liczby anten:  $\sim 3$ ,  $\sim 6$ ,  $\sim 9$  [b/sHz]. Co ważne, w miarę, jak rośnie liczba anten, kurczy się również groźny obszar o bardzo małej przepustowości:  $0.0004 \rightarrow 0.07 \rightarrow 1,06$ .

Tablica I. Przepustowości  $C$  w funkcji liczby anten [b/sHz]

Przepustowości [b/sHz]	$M=N=1$	$M=N=2$	$M=N=3$
Minimalna	0,0004	0,07	1,06
Średnia	2,91	5,45	8,54
Maksymalna	6,55	10,35	13,04



Rys.2. Przebieg dystrybucji przepustowości  $C$  w zależności od liczby anten

Wykresy z rysunku 2 pokazują sumę przepustowości do określonej granicy, czyli dystrybuantę. Przy trzech antenach rozrzut przepustowości w zakresie kwantyli 0,1 – 0,9 ma się, jak 1,2 (~5 i ~10 b/sHz), natomiast przy jednej antenie aż 1,5. Wielość anten zatem wyraźnie stabilizuje zbiorczy kanał, tzn. minimalna przepustowość nie schodzi zbyt nisko, a maksymalna nie przewyższa znacznie wartości średniej.

### 3. MIMO ALAMOUTI'EGO

Schemat układu wg. Alamoutiego [4] dla 2 anten nadawczych (strzałki w górę) i 2 odbiorczych (strzałki w dół) дано na rysunku 3. W momencie  $t$  nadawane są sygnały, odpowiednio,  $s_0$  i  $s_1$ , a w następnym momencie  $t+T$ , gdzie  $T$  okres sygnału, te same sygnały, ale w odwrotnej kolejności i każdy w formie sprzężonej, przy czym  $s_1$  dodatkowo ze zmianą fazy na przeciwną ( $-s_1^*$ ). Taki układ umożliwia estymację i identyfikację obu sygnałów mimo ich emisji na tej samej częstotliwości w warunkach zaników i szumów.

Odpowiednie pary sygnałów  $r_0$  i  $r_1$  odbierane z kanałów  $h_0+h_1$  w momentach  $t$  oraz  $t+T$  oraz pary  $r_2, r_3$  odbierane z kanałów  $h_2+h_3$  w tych samych momentach wynoszą

$$r_0 = h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0, \quad r_2 = h_2 s_0 + h_3 s_1 + n_2 \quad (2)$$

$$r_1 = h_0 (-s_1^*) + h_1 s_0^* + n_1, \quad r_3 = h_2 (-s_1^*) + h_3 s_0^* + n_3$$

Na ich podstawie sumator buduje dwie estymaty sygnału i przekazuje je do detektora

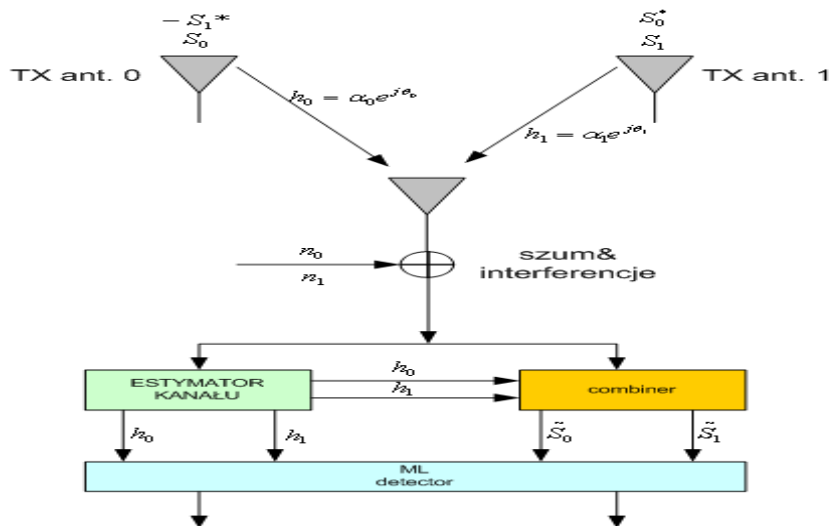
$$\tilde{s}_0 = h_0^* r_0 + h_1 r_1^* + h_2^* r_2 + h_3 r_3^* \quad (3)$$

$$\tilde{s}_1 = h_1^* r_0 - h_0 r_1^* + h_3^* r_2 - h_2 r_3^*$$

Detektor pracuje w oparciu o kryterium największej wiarygodności (ML)

$$d^2(\tilde{s}_0, s_i) \leq d^2(\tilde{s}_0, s_j), \quad d^2(\tilde{s}_1, s_i) \leq d^2(\tilde{s}_1, s_j) \quad \forall i \neq j \quad (4)$$

gdzie  $\{i, j\}$  – alfabet sygnałów,  $i, j=1, 2, \dots, M$  (dla BPSK  $i=1, j=2$ ).



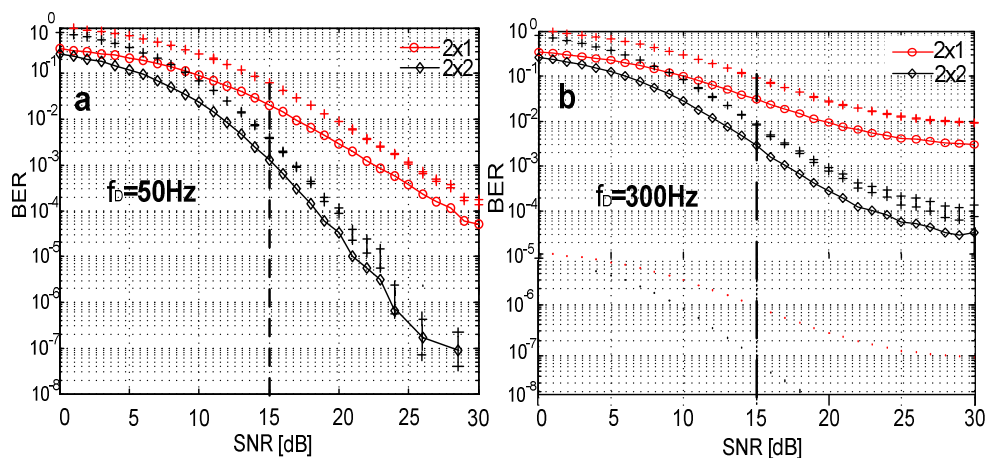
Rys.3. Ilustracja operacji sygnałowych w układzie MIMO2x2

Przedstawione rozwiązanie jest interesujące. Ma wszelako jedną słabą stronę: zakłada mianowicie jednakowe transmitancje w momentach  $t$  oraz  $t+T$ ,  $h(t)=h(t+T)$ , czyli przyjmuje, iż zaniki sygnałów na trasie propagacji są, po pierwsze płaskie (nie-selektywne) oraz po drugie, są bardzo powolne względem szybkości transmisji  $1/T$ . Autorzy niniejszego referatu odstąpili od tego założenia i przeprowadzili badania symulacyjne.

#### 4. MODELOWANIE PROCESÓW MIMO W SIECIACH WLAN

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>5</sup>. Przeprowadzono modelowanie procesów odbioru opierając się na modelu Alamaouti'ego. Przesyłany sygnał jest zmodulowany 8-wartościową modulacją DPSK z uwzględnieniem efektu Dopplera i w paśmie częstotliwości odpowiadającym standardowi 802.11b/g. Jako kryterium odbioru przyjęto ML.

Na rysunku 4a pokazano wpływ efektu Dopplera na jakość odbieranego sygnału dla konwencjonalnego systemu MISO2x1 oraz MIMO2x2. Różnica jakości w odbiorze to około rzędu wielkości już dla SNR=15dB oraz kilka rzędów wielkości dla SNR=30 dB. Na rysunku 4b pokazano to samo dla częstotliwości Dopplera 300 Hz<sup>6</sup>. Jak widać, technika MIMO łagodzi wpływ efektu Dopplera na jakość odbieranego sygnału.



Rys. 4.a.b. Wpływ efektu Dopplera na jakość odbioru: a) BER dla  $f_D=50\text{Hz}$ , b) BER dla  $f_D=300\text{Hz}$

Linia czerwona dotyczy systemu MISO2x1 (*multiple input – single output*), linia czarna – MIMO2x2. Krzyżykami oznaczono 5% przedział ufności.

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

<sup>6</sup> (oznacza to prędkości poruszających się pojazdów odpowiednio  $V=23\text{km/h}$  oraz  $136\text{km/h}$ , dla pasma 802.11b/g)

## 5. MODYFIKACJA ZAŁOŻEŃ ALMAOUT'IEGO

Przedstawione rozwiązanie przez Alamouti'ego jest interesujące. Ma wszelako jedną słabą stronę: zakłada mianowicie jednakowe transmitancje w momentach  $t$  oraz  $t+T$ ,  $h(t)=h(t+T)$ , czyli przyjmuje, iż zaniki sygnałów na trasie propagacji są, po pierwsze płaskie (nie-selektywne) oraz po drugie, są bardzo powolne względem szybkości transmisji  $1/T$ . Autorzy niniejszego referatu odstąpili od tego założenia i przeprowadzili badania symulacyjne.

Odpowiednie równania dla układu 2-antenowego (5-6) oraz 4-antenowego (7-8) dano poniżej. Indeks  $T$  przy transmitancjach oznacza stan dla momentów  $t+T$

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h_1^{T*} & -h_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \end{bmatrix} \text{ or } r = Hs + n \quad (5)$$

$$\hat{s}_0 = h_0^* r_0 + h_1^T r_1^* = |h_0|^2 s_0 + |h_1|^2 s_0 + h_1^* h_0 s_1 - h_1^T h_0^* s_1 + h_0^* n_0 + h_1^T n_1^* \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1^* \\ r_2 \\ r_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 \\ h_1^{T*} & -h_0 \\ h_2 & h_3 \\ h_3^{T*} & -h_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1^* \\ n_2 \\ n_3^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\hat{s}_0 = h_0^* r_0 + h_1^T r_1^* + h_2^* r_2 + h_3^T r_3^* \quad (8)$$

Dla obu przypadków obowiązuje to samo równanie kryterialne (9)

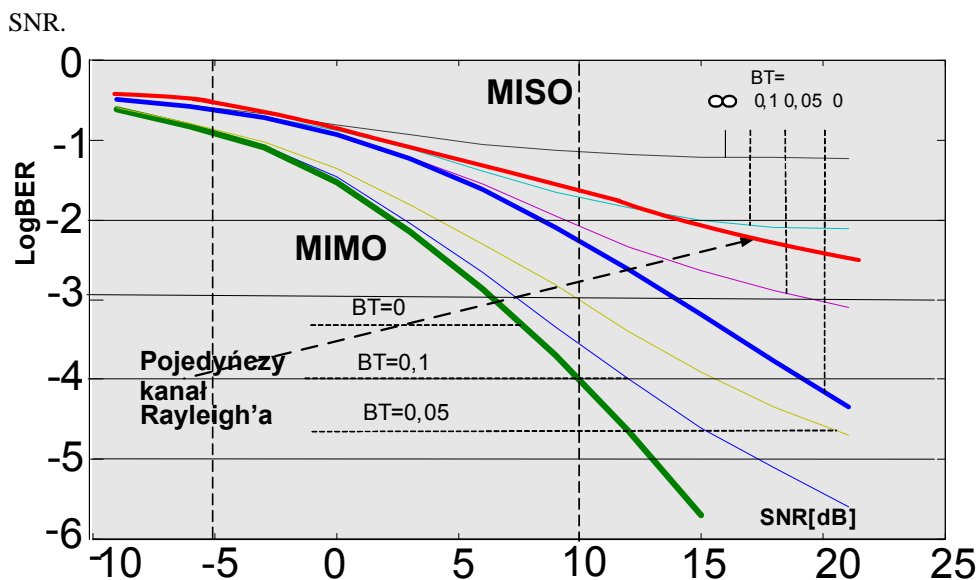
$$(\hat{s} - s)(\hat{s} - s)^* \leq (\hat{s} + s)(\hat{s} + s)^* \quad (9)$$

Jeśli jest spełnione, przyjmuje się, że odebrano sygnał  $s=s_0$ , w przeciwnym razie  $s=s_1$ .

W ostatnim równaniu przyjęto założenie, że aprioryczne prawdopodobieństwa stanów sygnału  $s_1$  lub  $s_0$  są jednakowe i równe 0.5. W związku z tym aposterioryczne prawdopodobieństwa błędów liczono tylko dla sygnału  $s_0$ . Istotne jest równanie (6), które odbiega zasadniczo od (3a) według [4]. Wartości  $h(t)=h$  oraz  $h(t+T)=h^T$  uzyskano w eksperymencie drogą dokładnego rozwinięcia efektu Dopplera, MEDS<sup>7</sup> [6]. Na ich podstawie wyliczana jest estymata (6), którą dalej porównuje się z sygnałem  $s_0$  według kryterium największej wiarygodności (ML), równanie (9).

Wyniki modelowania procesów odbioru przedstawiono na rysunku 4. 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. Stopień odstępstwa jest określony tzw. znormalizowanym pasmem zaników BT, gdzie  $B$  oznacza pasmo koherencji (odwrotność okresu względnej stałości zaników). Na rysunku 4 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

<sup>7</sup> Method of Exact Doppler Spread



SNR. Rys.5. Przebieg stopy błędów dla MIMO/MISO w funkcji mocy w obecności zaników

W miarę, jak wzrasta szybkość zaników  $BT^8$ , 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 (krzywa dla  $BT=0,1$  i  $BT \rightarrow \infty$ ).

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  $BER=10^{-4}$  wynosi wtedy około 20 dB, czyli 100 razy. Jest to wciąż duży zysk w stosunku do konwencjonalnych łącz.

## 6.WNIOSKI

Systemy MIMO są opłacalne, bo zapewniają, albo znacznie większą średnią przepustowość łącza, proporcjonalnie do liczby użytych anten, albo odpowiednio mniejszą średnią stopę 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. Nowa technologia jest jednak złożona i kosztowna.

W modelu MIMO nie uwzględniono zaników selektywnych (nie płaskich), ponieważ można je neutralizować drogą podziału pasma kanału technikami OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*). Założono także perfekcyjną estymację transmitancji poszczególnych kanałów oraz brak wzajemnej korelacji<sup>9</sup>. Oba zjawiska są

<sup>8</sup> Parametr  $BT=0,1$  oznacza, że częstość zaników jest średnio 10 razy wolniejsza od szybkości transmisji sygnału  $1/T$ .

<sup>9</sup> Zagadnienia korelacji wzajemnej w systemach MIMO zaprezentowano w [7]

szeroko znane i rozwiązuje/neutralizuje się je znanymi metodami przy niewielkim uszczerbku dla ostatecznego zysku [8,9].

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Foschini, "Layerd Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment when using Multi-element Antennas", *Bell Lab. Tech. J.*, 1996
- [2] D. Gesbert, "Outdoor MIMO Wireless Channels: Models and Performance", *IEEE-Transactions on Communications*, December 2002
- [3] Osteyee and I. Good, *Information Weight of Evidence – the Singularity between Probability Measures and Signal Detection*, Springer Verlag, New York 1970
- [4] S. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communicati-ons", *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, October 1998
- [5] Krawczyk Z., "Application of Wireless Sensor Networks to Early Warning and Collision Avoidance in Road Transport", Doctoral Dissertation, Radom University of Technology, 2010.
- [6] M. Patzold, U. Killat, F. Laune and Y. Li, "On the Statistical Properties of Deterministic Simulation Models for Mobile Fading Channels", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v.47, no. 1, February 1998 (also *IEEE-VTC*, October 1999)
- [7] Kosmowski K., Pawelec J., "A Comparison of Receiver Strategies in STBC MIMO Systems under Challenging Environment", *The 4-th International Conf. on Comm. Theory, Reliability, and Quality of Service 2011*, April 2011
- [8] 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 16-19, 2011
- [9] R. Lamare, and R. Sampaio-Neto, "Blind Adaptive MIMO Receivers for STBC DS-CDMA Systems...", *IEEE Transactions on Com.*, v. 58, no.1, January 2010