

# Analiza symulacyjna układów anten MIMO w systemach łączności ruchomej trzeciej generacji

Maciej Mazik, Wiesław Ludwin, Maciej Giersz  
(e-mail: maciej.mazik@motorola.com, wludwin@kt.agh.edu.pl), maciej.giersz@pl.ey.com  
Katedra Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków

---

## STRESZCZENIE

Systemy trzeciej generacji stanowią kolejny etap ewolucji łączności ruchomej, przed którą stawia się coraz większe wymagania dotyczące szybkości transmisji, zasięgu oraz jakości świadczonych usług. Aby sprostać tym wymaganiom, w systemach trzeciej generacji wykorzystane zostaną najnowocześniejsze techniki transmisji danych. Najbardziej obiecującym rozwiązaniem są układy wieloantenowe MIMO, opisane w niniejszym artykule. W artykule przedstawiono porównanie wyników analizy symulacyjnej systemów 3G z układami MIMO dla kanału Rayleigha z zaczerpniętymi z literatury wynikami badań eksperymentalnych. Praca prezentuje możliwość zwiększenia szybkości transmisji w systemach trzeciej generacji na drodze poprawy współczynnika wykorzystania pasma.

## ABSTRACT

### *A simulation analysis of MIMO antennas for the third generation of mobile communication systems*

*The third generation systems being a next step of evolution of mobile communication face still growing demand for throughput, coverage and quality of service. To fulfill this demand the newest data transmission technologies have to be used in 3G systems. The most promising solution are MIMO multiple antennas, described in present paper. The paper compares simulation and experimental results for MIMO antennas. Experimental results are taken from the literature. The increase of throughput for the third generation systems due to improvement of spectral efficiency factor is presented in this work.*

## 1. Wstęp

Łączność bezprzewodowa należy do najszybciej rozwijających się działów telekomunikacji. Spowodowane jest to głównie sukcesem systemów łączności ruchomej drugiej generacji, a w szczególności systemu GSM (*Global System for Mobile communications*).

Aktualnie najpopularniejsze w systemach łączności ruchomej usługi telefoniczne ustępują miejsca usługom transmisji danych, takim jak: dostęp do Internetu, komórkowy dostęp do intranetu, przesyłanie informacji multimedialnych MMS (*Multimedia Messaging System*) czy wideokonferencje [3]. Usługi te będą stanowiły integralną część systemów łączności ruchomej trzeciej generacji. W wyniku ich stopniowego wprowadzania, rośnie zapotrzebowanie na coraz to większe przepustowości połączeń, co prowadzi do nieustannego rozwoju nowych technik transmisji.

Głównym czynnikiem ograniczającym rozwój systemów bezprzewodowych jest brak wystarczająco szerokiego pasma częstotliwości radiowych. W związku z tym badania skupiają się nad metodami transmisji poprawiającymi efektywność wykorzystania pasma i poprawę niezawodności transmisji [16]. Najbardziej obiecującym rozwiązaniem wydają się być układy wieloantenowe MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), które pozwalają na osiągnięcie wielokrotnie większych szybkości transmisji niż uzyskiwane obecnie [11]. Przez wprowadzenie wielu anten po obu stronach toru radiowego oraz zastosowanie zaawansowanych algorytmów przes-

trzenno-czasowego przetwarzania sygnałów, możliwe jest uzyskanie znacznego wzrostu współczynnika wykorzystania pasma w porównaniu z tradycyjnymi systemami z jedną anteną nadawczą i jedną odbiorczą. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analizy symulacyjnej układów MIMO w systemach łączności ruchomej trzeciej generacji, przeprowadzonej metodą Monte Carlo.

Systemem trzeciej generacji wprowadzanym w Europie będzie najprawdopodobniej system UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), który wykorzystuje techniki wielodostępu WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). Już w UMTS Release '99 zostały uwzględnione układy wielu anten po stronie odbiorczej SIMO (*Single Input Multiple Output*) oraz układy wielu anten po stronie nadawczej MISO (*Multiple Input Single Output*). W obu przypadkach układy wielu anten stosowane były jedynie po jednej ze stron toru radiowego. Najnowsza wersja systemu trzeciej generacji UMTS Release 6 obejmuje wprowadzenie układów wieloantenowych MIMO, zarówno po stronie nadawczej jak i odbiorczej. Rozpatrywane jest użycie układów MIMO w szybkiej pakietowej transmisji danych HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) [14]. Równocześnie jest rozważane zagadnienie implementacji układów MIMO w interfejsie radiowym segmentu naziemnego UTRA (*Universal Terrestrial Radio Access*) systemu UMTS [13].

## 2. Technika MIMO a pojemność kanału

Zastosowanie układów wieloantenowych w systemach radiowych umożliwia osiągnięcie zysku dywersyfikacji (*diversity gain*), wynikającego z kształtowania diagramu kierunkowego układu anten (*beamforming gain*, *array gain*) oraz zysku zwielokrotnienia (*multiplexing gain*).

W nowoczesnych systemach bezprzewodowych wykorzystuje się różne techniki dywersyfikacji, polegające na równoczesnej transmisji w wielu niezależnych kanałach radiowych, dzięki czemu możliwe jest ograniczenie niekorzystnego wpływu warunków panujących w kanale transmisyjnym na jakość odbieranego sygnału. Zakłada się przy tym, że prawdopodobieństwo jednoczesnego zaniku sygnału w niezależnych torach radiowych jest bardzo małe.

Najczęściej stosowaną techniką jest dywersyfikacja przestrzenna (*space diversity*) zarówno nadawania, jak i odbioru. Stosując techniki dywersyfikacji, uzyskuje się poprawę jakości transmisji. Ta sama bitowa stopa błędów BER (*Bit Error Rate*) jest osiągana przy mniejszej wartości stosunku mocy sygnału do mocy szumu SNR (*Signal to Noise Ratio*). Różnica między wartościami SNR w systemie z dywersyfikacją i w systemie bez dywersyfikacji, przy zachowaniu tej samej bitowej stopy błędów, jest nazywana zyskiem dywersyfikacji.

W systemach opartych na układach MIMO możliwe jest osiągnięcie większej pojemności kanału, niż ma to miejsce w tradycyjnych systemach radiowych. Wzrost szybkości transmisji w kanale radiowym przy zachowaniu tego samego poziomu całkowitej mocy nadawanej jest nazywany zyskiem zwielokrotnienia.

Zastosowanie systemów wieloantenowych poprawia bitową stopę błędów i zwiększa szybkość transmisji danych.

Pojemność informacyjna  $C$  pojedynczego kanału, zakłócanego jedynie addytywnym białym szumem gaussowskim AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), zgodnie z twierdzeniem Shannona, wyraża się zależnością [10]:

$$C = B \log_2(1 + \rho) \quad [\text{bit/s}] \quad (1)$$

gdzie:  $\rho$  – stosunek mocy sygnału do mocy szumu (SNR) na wejściu odbiornika,

$B$  – szerokość dostępnego pasma w Hz.

W rzeczywistości kanał radiowy jest zmienny w czasie, a przesyłany sygnał podlega zanikom. Uwzględniając powyższe właściwości kanału, pojemność tradycyjnego systemu SISO (*Single Input Single Output*) wynosi [7]:

$$C = B \log_2(1 + \rho |h|^2) \quad [\text{bit/s}] \quad (2)$$

gdzie:  $h$  – liczba zespolona opisująca warunki propagacyjne w kanale,

$|h|^2$  – funkcja przenoszenia mocy.

W ogólnym przypadku  $h$  jest funkcją czasu, co powoduje, że pojemność kanału jest różna w różnych momentach transmisji.

Pojemność kanału przypadająca na 1 Hz szerokości pasma jest nazywana współczynnikiem wykorzystania pasma. W dalszej części artykułu oba te pojęcia będą stosowane zamiennie. Tak opisana pojemność jest zmienną losową, do której opisu wymagane jest przedstawienie jej funkcji gęstości prawdopodobieństwa lub dystrybuanty.

W systemie wieloantenowym MIMO z  $N$  antenami nadawczymi i  $M$  odbiorczymi pojemność kanału radiowego, wyprowadzona przez G. J. Foschiniego w [5], wyraża się następującym wzorem:

$$C_{EP} = B \log_2[\det(I_M + \frac{\rho}{N} HH^*)] \quad [\text{bit/s}] \quad (3)$$

gdzie:  $H$  – macierz kanału o wymiarach  $N \times M$ , której elementy opisują warunki propagacyjne pomiędzy poszczególnymi antenami,

$*$  – operacja transpozycji macierzy i sprzężenia jej elementów,

$I_M$  – macierz jednostkowa o wymiarach  $M \times M$ .

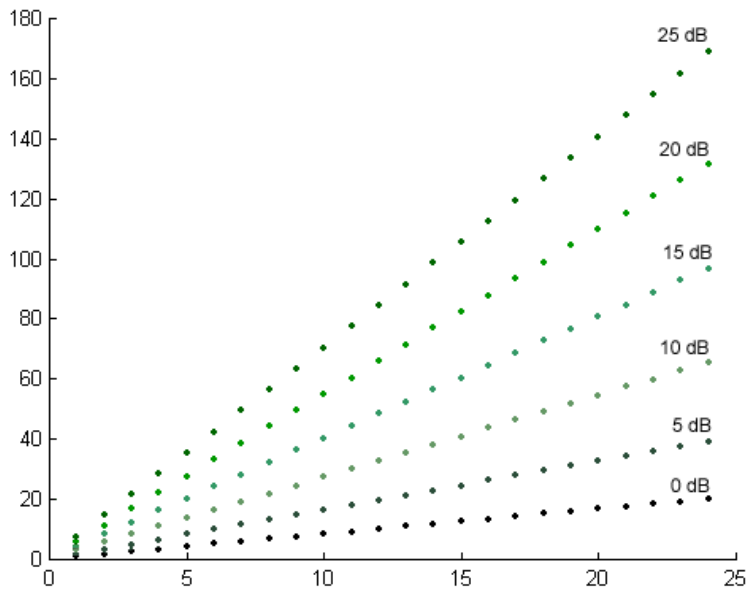
Równanie (3) dotyczy przypadku  $N$  nieskorelowanych źródeł nadających z jednakową mocą EP (*Equal Power*). Wzór (3) na pojemność kanału MIMO może zostać przekształcony [15] do postaci:

$$C_{EP} = B \sum_{i=1}^m \log_2(1 + \frac{\rho}{N} \lambda_i) \quad [\text{bit/s}] \quad (4)$$

gdzie  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  są niezerowymi wartościami własnymi macierzy  $HH^*$  lub  $H^*H$ , gdy liczba anten nadawczych jest mniejsza od liczby anten odbiorczych.

G.J. Foschini [5] i I.E. Telatar [15] wykazali, że pojemność systemu MIMO zależy w sposób liniowy od liczby anten, równej  $m = \min(M, N)$ . Zależność ta może być intuicyjnie wyjaśniona w następujący sposób. W idealnym przypadku, w systemach MIMO możliwe jest jednoczesne transmitowanie danych przez  $m$  kanałów fizycznych. Poszczególne kanały fizyczne charakteryzują się wzmocnieniem  $\lambda_i$ , gdzie  $\lambda_i$  jest wartością własną macierzy autokorelacji  $R=HH^*$ . Przy braku korelacji między funkcjami przenoszenia poszczególnych kanałów fizycznych, możliwa jest poprawna detekcja danych przesyłanych przez różne kanały fizyczne. Stąd pojemność systemu jest  $m$  razy większa niż ma to miejsce w przypadku jednej anteny nadawczej i jednej odbiorczej [7].

Na rysunku 1 przedstawiono zależność między pojemnością kanału radiowego w systemach MIMO a liczbą anten po stronie nadawczej (odbiorczej).



**Rys. 1.** Wykres zależności współczynnika wykorzystania pasma od liczby anten w systemie MIMO dla różnych wartości stosunku mocy sygnału do mocy szumu (SNR)

Gdy informacja o warunkach propagacyjnych w kanale radiowym jest dostępna w nadajniku, wtedy jest możliwe sterowanie mocą sygnałów przesyłanych przez poszczególne kanały fizyczne na drodze regulacji ich mocy w poszczególnych gałęziach nadajnika. Optymalny rozkład mocy w kanałach fizycznych jest osiągany dzięki zastosowaniu algorytmu *water-filling*. Kanałom fizycznym charakteryzującym się większą wartością wzmocnienia  $\lambda_i$  przydzielana jest większa moc. Całkowita moc nadawania pozostaje zachowana. Stosowanie algorytmu *water-filling* w układach MIMO dodatkowo zwiększa pojemność systemu [9].

W systemach MIMO, opartych na zwielokrotnieniu przestrzennym, przesyłany strumień bitów jest dzielony na niezależne strumienie informacyjne – transmitowane jednocześnie w tym samym paśmie częstotliwości. Po określeniu przez odbiornik, na podstawie przesyłanych sekwencji treningowych, macierzy kanału  $H$ , poszczególne strumienie są rozpoznawane i odtwarzane. Aby możliwe było jednoznaczne rozpoznanie poszczególnych strumieni, sygnały radiowe niosące informacje o tych strumieniach muszą propagować wieloma niezależnymi drogami. Tym samym w systemach wieloantenowych MIMO propagacja wielodrogowa nie jest zjawiskiem szkodliwym, ale może być traktowana jako zjawisko pożądane, umożliwiające osiągnięcie dużej pojemności kanału radiowego. Wykorzystanie zjawiska wielodrogowości w komunikacji radiowej w celu zwiększenia szybkości transmisji zostało opisane przez J. Foschiniego [5, 6].

Liczba niezależnych dróg, po których propaguje sygnał, stanowi rząd kanału MIMO równy algebraicznemu rzędowi macierzy  $H$ . Liczba niezależnych sygnałów przesyłanych w kanale nie może być nigdy większa niż rząd kanału, który z kolei jest ograniczony liczbą anten nadawczych lub odbiorczych.

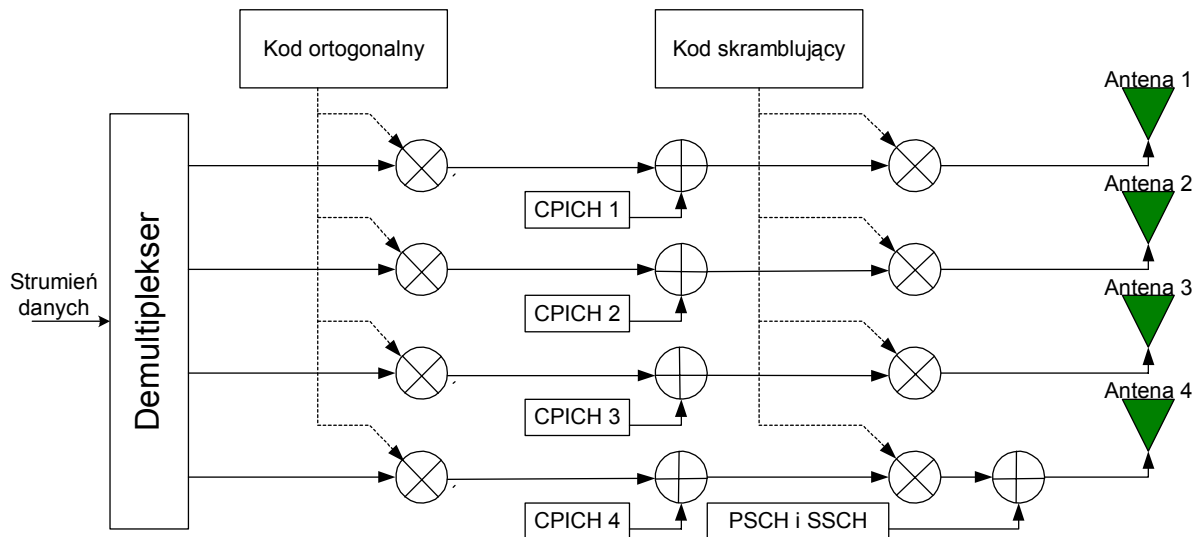
W systemach wieloantenowych MIMO możliwe jest jednoczesne zastosowanie dywersyfikacji przestrzennej i zwielokrotnienia przestrzennego.

### 3. Analiza porównawcza wyników symulacji i badań eksperymentalnych

Układy wieloantenowe po stronie nadawczej i odbiorczej pozwalają na osiągnięcie znacznego wzrostu pojemności kanału radiowego bez konieczności poszerzania jego pasma [5,6]. W tej części artykułu zaprezentowane zostaną wyniki pomiarów pojemności kanału w praktycznie działających systemach wykorzystujących układy wieloantenowe MIMO oraz wyniki symulacji przeprowadzonych w programie Matlab przy użyciu metody Monte Carlo.

W artykule [1] opisano koncepcję użycia układów MIMO w systemie UMTS z dupleksem częstotliwościowym (UTRA-FDD – *Universal Terrestrial Radio Access – Frequency Division Duplex*) dla łącza w dół w celu zwiększenia współczynnika wykorzystania pasma. Zmiany związane z wprowadzeniem układów MIMO dotyczą głównie kanałów: DPCH (*Dedicated Physical Channel*), CPICH (*Common Pilot Channel*) oraz pierwotnego i wtórnego kanału SCH (*Synchronisation Channel*). Dane przesyłane kanałem CPICH oraz dedykowanymi kanałami użytkowników są rozpraszane ortogonalnymi kodami OVSF (*Orthogonal Variable Spreading Factor*). Dla kanału CPICH kody OVSF mają stałą długość równą 256 chipów. Dane użytkowników są rozpraszane kodami o zmiennej długości, a następnie skramblowane za pomocą sekwencji Golda.

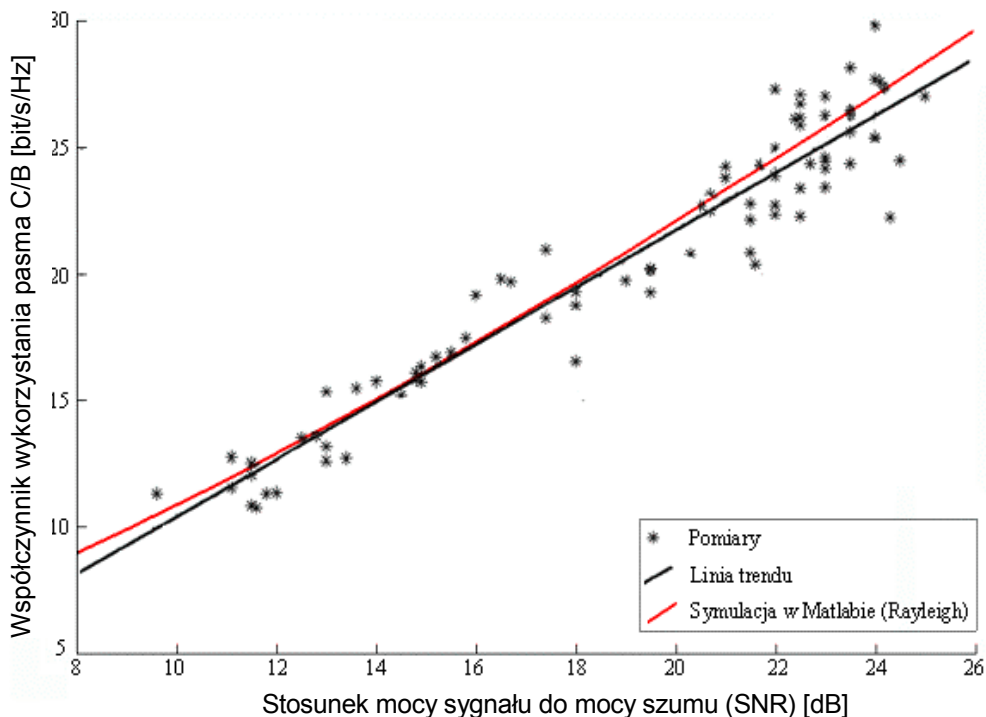
Strumień danych użytkownika jest demultipleksowany na  $N$  równoległych strumieni, z których każdy jest rozpraszany tym samym kodem ortogonalnym i skramblowany tą samą sekwencją Golda.



Rys. 2. Schemat nadajnika systemu UMTS z 4 antenami nadawczymi [1]

Strumienie te są następnie transmitowane z  $N$  anten nadawczych. W standardowym systemie UMTS do określenia warunków panujących w kanale radiowym wystarczał jeden kanał CPICH. W systemie z układami MIMO należy przydzielić oddzielny kanał CPICH dla każdej anteny nadawczej. Kanały synchronizacyjne są nadawane tylko przez jedną antenę z zestawu transmisyjnego. Na rysunku 2 zaprezentowano schemat nadajnika UMTS z czterema antenami nadawczymi. W badaniach, przedstawionych w pracy [1], użyto prototypowej stacji bazowej sieci 3G OneBTS firmy Lucent Technologies.

Pomiary w systemie UMTS-FDD, rozbudowanym o układy wieloantenowe MIMO, przeprowadzono wewnątrz budynku (*indoor*). Antenami stacji nadawczej były dipole ćwierćfalowe umieszczone wzdłuż linii prostej, na wysokości około 3 m i oddalone od siebie o dwie długości fali. Odbiornik posiadał cztery anteny oddzielone od siebie o jedną długość fali i umieszczone w czterech rogach obudowy wyświetlacza LCD laptopa. Współczynnik rozpraszania (*spreading factor*) wynosił 32. Pomiary wykonano dla jednego aktywnego użytkownika. W systemie zastosowano modulację QPSK przy braku kodowania kanałowego.



Rys. 3. Wykres wartości współczynnika wykorzystania pasma w funkcji stosunku mocy sygnału do mocy szumu SNR. [1]

Założono, że występują zaniki płaskie bez składowych wielodrogowych i dlatego włączono w odbiorniku RAKE danej anteny odbiorczej tylko jeden z czterech możliwych odbiorników korelacyjnych [1].

Rysunek 3 prezentuje wyniki pomiarów wartości współczynnika wykorzystania pasma w systemie UTRA-FDD z układami MIMO wyrażone w funkcji stosunku SNR na wejściu odbiornika.

Wyniki zamieszczone w pracy [1] porównano z wynikami symulacji przeprowadzonych przez autorów niniejszego artykułu w programie Matlab dla kanału Rayleigha.

Na podstawie wyników pomiarów i symulacji można stwierdzić, że kanał MIMO wewnątrz budynków może być z powodzeniem modelowany za pomocą kanału Rayleigha.

W pracy [12] podano wyniki badań układów wieloantennowych MIMO, wykonanych na Uniwersytecie Technicznym w Helsinkach HUT (*Helsinki University of Technology*), dla częstotliwości 2,15 GHz. Użyto układu nadawczego składającego się z ośmiu anten o podwójnej polaryzacji oraz układu odbiorczego złożonego z 32 anten również o podwójnej polaryzacji. Tak duża liczba anten umożliwiła analizę różnych konfiguracji i określenie optymalnego układu anten dla stacji bazowej oraz terminala ruchomego. Rozpatrzono konfiguracje od jednej anteny o podwójnej polaryzacji w terminalu ruchomym do ośmiu anten o podwójnej polaryzacji, umieszczonych w laptopie.

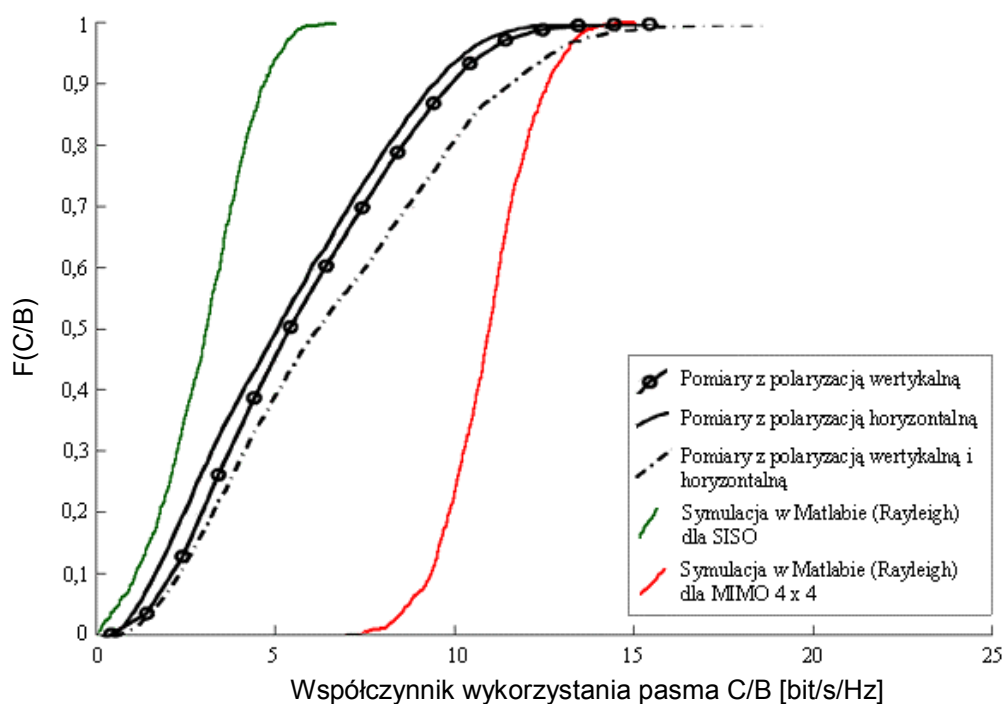
W ramach prac badawczych prowadzonych na uniwersytecie HUT sprawdzono działanie układów MIMO w środowisku pikokomórkowym oraz mikrokomórkowym. Pomiaru dla mikrokomórki wykonano w centrum

Helsinki, natomiast dla pikokomórki w dużym biurze. Analizę wpływu polaryzacji anten odbiorczych na wartość współczynnika wykorzystania pasma przeprowadzono w układzie MIMO  $4 \times 4$ . Po stronie nadawczej zastosowano dwie anteny o podwójnej polaryzacji. Użyto trzech wariantów odbiornika: z czterema antenami o polaryzacji wertykalnej, z czterema antenami o polaryzacji horyzontalnej oraz z dwiema antenami o podwójnej polaryzacji.

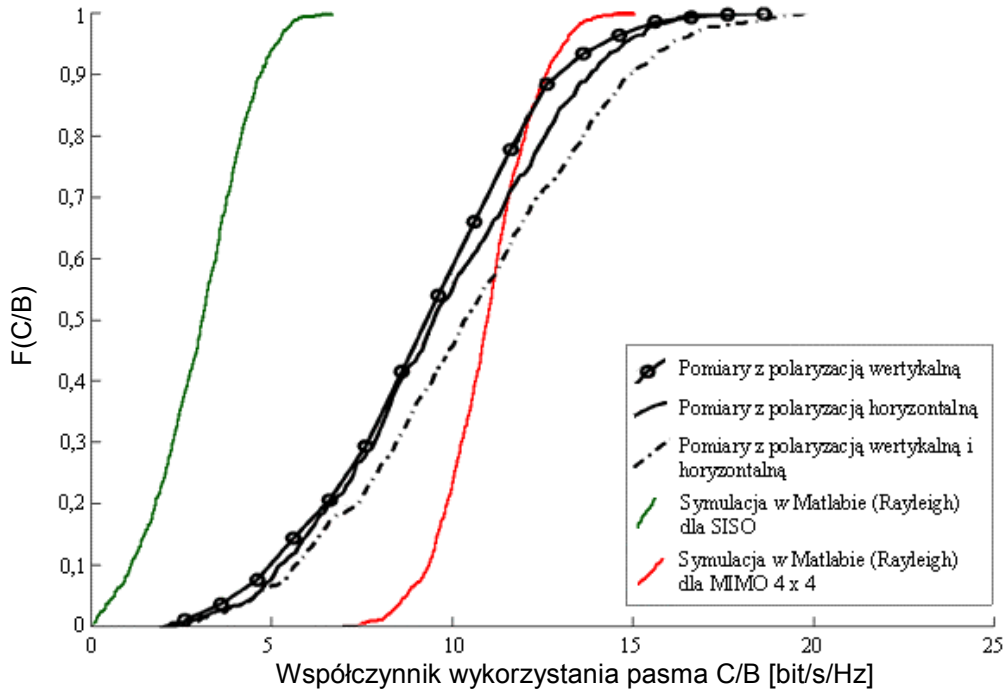
Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono funkcję dystrybuanty współczynnika wykorzystania pasma  $C/B$ , uzyskaną na drodze badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowych, przeprowadzonych w programie Matlab przy użyciu metody Monte Carlo dla układów  $4 \times 4$  oraz  $1 \times 1$  i kanału Rayleigha.

Z analizy rysunków 4 i 5 wynika, że wartości współczynnika wykorzystania pasma kanału radiowego osiągnane w systemie z antenami o podwójnej polaryzacji są większe niż w systemie z tą samą liczbą anten, ale o jednakowej polaryzacji. Poza tym wartości  $C/B$  są większe w pikokomórce niż w mikrokomórce, a funkcja rozkładu współczynnika wykorzystania pasma, otrzymana na drodze badań eksperymentalnych, jest bardziej zbliżona do funkcji rozkładu prawdopodobieństwa, uzyskanej na drodze symulacji dla kanału Rayleigha.

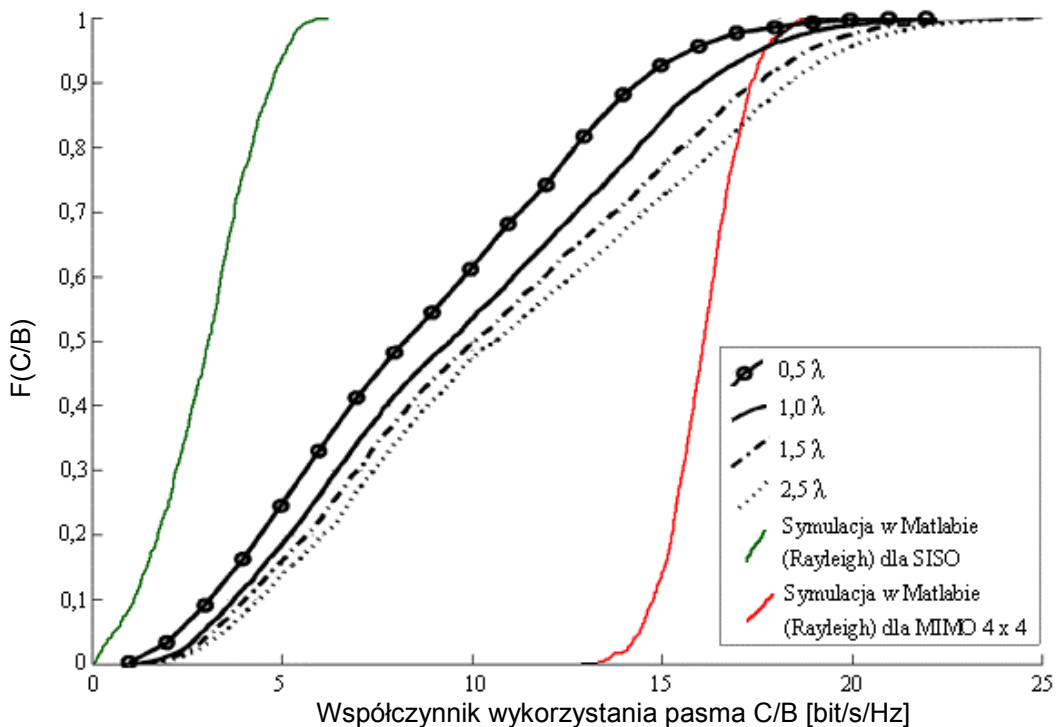
W pracy [12] analizowano także zależność pojemności kanału radiowego w systemie MIMO  $4 \times 8$  w funkcji odległości między antenami po stronie nadawczej. Na rysunkach 6 i 7 zaprezentowano dystrybuanty współczynników wykorzystania pasma dla trzech różnych odległości między antenami stacji nadawczej – odpowiednio w mikrokomórce i pikokomórce.



Rys. 4. Dystrybuanta współczynnika wykorzystania pasma w mikrokomórce dla układów anten o różnej polaryzacji [12]



Rys. 5. Dystrybuanta współczynnika wykorzystania pasma w pikokomórce dla układów anten o różnej polaryzacji [12]

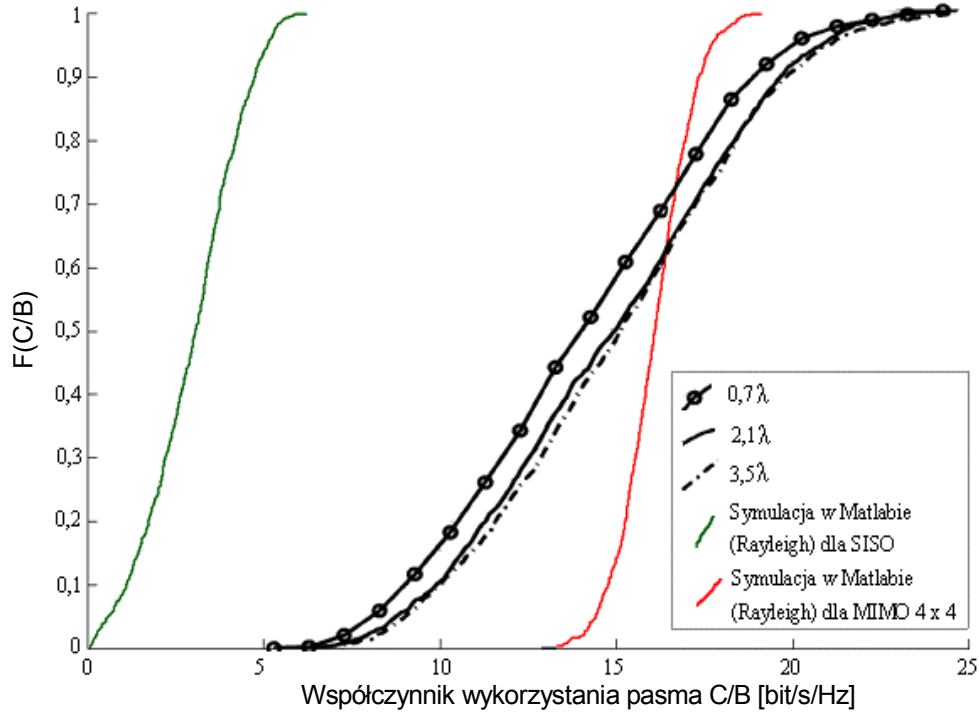


Rys. 6. Dystrybuanta współczynnika wykorzystania pasma w mikrokomórce dla trzech różnych odległości między antenami nadawczymi [12]

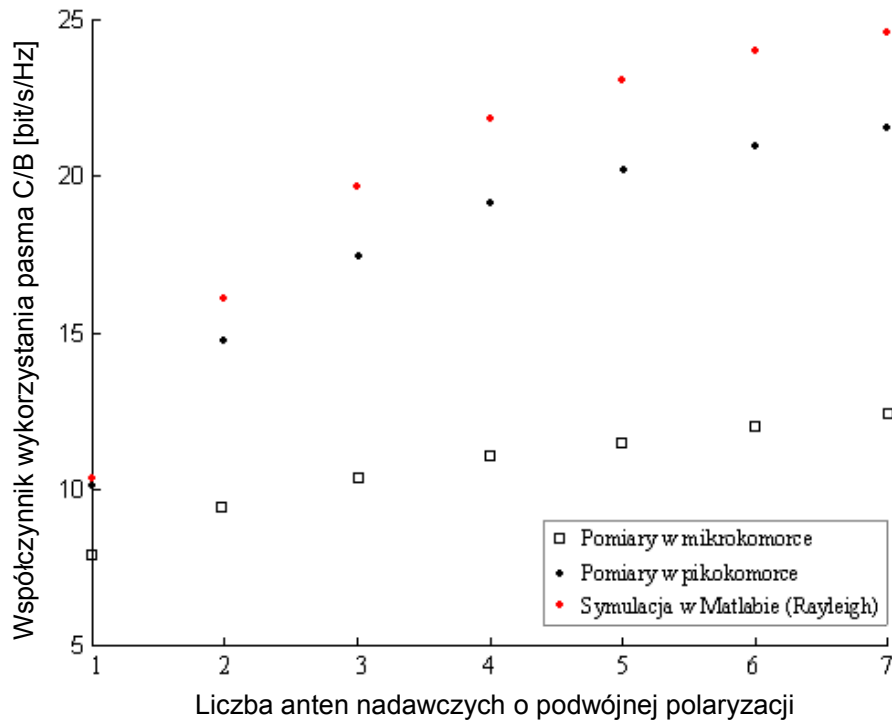
Zwiększenie odległości pomiędzy antenami w stacji nadawczej powoduje wzrost wartości współczynnika wykorzystania pasma. Dla dużych odległości między antenami drogi propagacyjne między nadajnikiem i odbiornikiem są w mniejszym stopniu skorelowane ze sobą, dzięki czemu wzrasta pojemność kanału radio-

wego. Można także zauważyć, że wpływ odległości między antenami nadajnika na współczynnik wykorzystania pasma jest większy w mikrokomórce niż w pikokomórce. W pikokomórce znajduje się więcej obiektów rozpraszających, co powoduje wzrost znaczenia propagacji wielodrogowej.





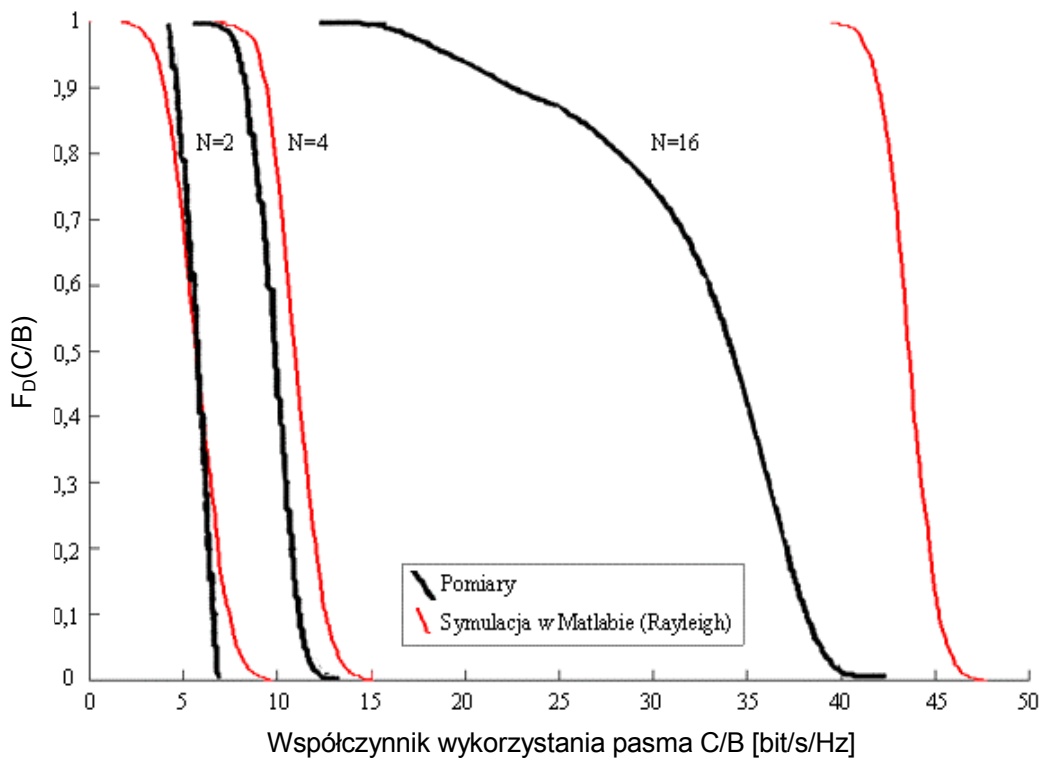
**Rys. 7.** Dystrybuanta współczynnika wykorzystania pasma w pikokomórce dla trzech różnych odległości między antenami nadawczymi [12]



**Rys. 8.** Zależność średniej wartości współczynnika wykorzystania pasma od liczby anten nadawczych o podwójnej polaryzacji przy zachowaniu stałej liczby anten odbiorczych [12]

W pracy [12] rozważono również wpływ liczby anten nadawczych na pojemność systemu w środowisku pikokomórkowym oraz mikrokomórkowym przy stałej liczbie czterech anten odbiorczych o podwójnej polaryzacji. Na rysunku 8 przedstawiono średnią wartość

współczynnika wykorzystania pasma w funkcji liczby anten nadawczych o podwójnej polaryzacji. Z największym tempem wzrostu wartości współczynnika wykorzystania pasma mamy do czynienia dla dwóch, trzech i czterech anten nadajnika o podwójnej polaryzacji.



Rys. 9. Funkcja dopełniająca dystrybuanty współczynnika wykorzystania pasma dla różnych układów antenowych [2]

Dalsze zwiększanie liczby anten nadawczych powoduje już tylko poprawę zysku dywersyfikacji nadawania.

W pracy [2] opisano przebieg eksperymentu oraz wyniki pomiarów dla układów wieloantenowych MIMO pracujących w paśmie 2,11 GHz. Badania przeprowadzono w centrum Manhattanu w Nowym Jorku.

Układ anten stacji bazowej składał się z ośmiu anten o podwójnej polaryzacji, rozmieszczonych wzdłuż linii prostej. Długość całego układu wynosiła 3 m, co odpowiada 20 długościom fali radiowej. Terminal odbiorczy wyposażono w 16 anten o naprzemiennie ortogonalnej polaryzacji, zamontowanych z tyłu wyświetlacza LCD. Odległość między poszczególnymi elementami układu wynosiła pół długości fali.

Na rysunku 9 zamieszczono dla układów MIMO  $2 \times 2$ ,  $4 \times 4$  oraz  $8 \times 8$  funkcje dopełniające dystrybuanty współczynnika pasma  $F_D(C/B)$ .

Wyniki pomiarów porównano z wynikami symulacji przeprowadzonych dla kanału Rayleigha, dla średniej wartości stosunku SNR, zmierzonej na wejściu odbiornika i równej 10 dB. Zmierzone wartości współczynnika wykorzystania pasma rzeczywistego kanału radiowego są mniejsze niż wartości otrzymane na drodze symulacji komputerowych metodą Monte Carlo dla kanału Rayleigha. Różnica między wynikami uzyskanymi z eksperymentu i symulacji rośnie wraz ze wzrostem liczby anten.

## 4. Wnioski i uwagi końcowe

Zaprezentowane w niniejszej pracy wyniki pomiarów i symulacji komputerowych, dotyczących zastosowania techniki MIMO w systemach łączności bezprzewodowej, potwierdzają zalety i możliwości techniki MIMO. Układy wieloantenowe MIMO mogą stanowić podstawę bardziej efektywnego wykorzystania dostępnego pasma radiowego. Pojemności kanału radiowego, otrzymane dla układów MIMO na drodze eksperymentu, są wielokrotnie większe od osiąganych w obecnie działających systemach.

Przedstawione wyniki pomiarów pokazują zależność wartości współczynnika wykorzystania pasma od środowiska propagacyjnego, liczby anten, ich polaryzacji i odległości między nimi. Wyniki te dowodzą, że właściwe użycie wielu anten po obu stronach toru radiowego (wystarczająca odległość między antenami, różne polaryzacje) pozwala na znaczną poprawę współczynnika wykorzystania pasma kanału radiowego.

Ponadto należy zauważyć, że wartości współczynnika wykorzystania pasma uzyskiwane w rzeczywistych systemach, opartych na technice MIMO, są nieco mniejsze niż te otrzymywane z badań symulacyjnych systemów MIMO dla kanału Rayleigha. Wartości te są jednak zawsze większe od osiąganych w tradycyjnych systemach SISO. Można również zaobserwować w miarę dobrą zgodność wyników pomiarów



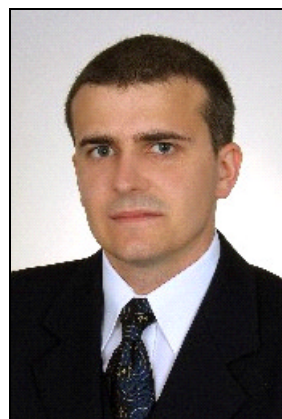
współczynnika wykorzystania pasma w rzeczywistych systemach MIMO, pracujących w pikokomórce, z wynikami symulacji komputerowych dla kanału Rayleigha. Dla mikrokomórki model kanału Rayleigha nie powinien być używany do opisu rzeczywistych warunków propagacji, w szczególności zaś dla dużej liczby anten. W środowisku mikrokomórkowym, w celu otrzymania bardziej wiarygodnych wyników, należy stosować w badaniach symulacyjnych inne, bardziej złożone modele kanału, uwzględniające między innymi wzajemną korelację anten oraz odległość między nimi, a także sposób rozmieszczenia obiektów rozpraszających fale radiowe na trasie ich propagacji.

Wiele wskazuje na to, że układy MIMO będą szeroko stosowane w systemach radiokomunikacji ruchomej (systemy komórkowe trzeciej i czwartej generacji) oraz stałej (systemy dostępowe punkt – wielopunkt). Momentem przełomowym dla systemów MIMO, prowadzącym do ich szybkiego upowszechnienia się, będzie niewątpliwie użycie ich na szerszą skalę w systemie UMTS.

Z punktu widzenia użytkownika główną korzyścią wynikającą z wprowadzenia techniki MIMO będzie znaczący wzrost przepustowości kanałów transmisyjnych, co pozwoli na szybki dostęp do Internetu, czy korzystanie z usług multimedialnych. Dla operatorów telekomunikacyjnych najważniejsze będą: wzrost pojemności systemu, jego zasięgu oraz poprawa efektywności pracy w sytuacji braku bezpośredniej widoczności między nadajnikiem i odbiornikiem (*Non-Line of Sight*) [4]. A to z kolei powinno umożliwić zmniejszenie liczby stacji bazowych, wymaganych do pokrycia sygnałami radiowymi odpowiednio dużych obszarów geograficznych.

## Literatura

- [1] Adjoundani A., Beck E.C., Burg A.P., Djuknic G.M., Gvoth T.G., Haessig D., Manji S., Milbrodt M.A., Rupp M., Samardzija D., Siegel A.B., Sizer II T., Tran C., Walker S., Wilkus S.A., Wolniansky P.W.: *Prototype Experience for MIMO BLAST Over Third-Generation Wireless System*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no. 3, April 2003
- [2] Chizhik D., Ling J., Wolniansky P.W., Valenzuela R.A., Costa N., Huber K.: *Multiple-Input-Multiple-Output Measurements and Modelling in Manhattan*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no. 3, April 2003
- [3] Dąbrowski M.: *Perspektywy wdrożenia systemów komórkowych 3G – aspekty polskie*. Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, Maj 2003
- [4] Dziunikowski W., Ludwin W.: *Układy wieloantenowe MIMO w sieciach bezprzewodowych*. Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, Maj 2003
- [5] Foschini G.J., Gans M.J.: *On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when using Multiple Antennas*. Wireless Personal Telecommunications, vol. 6, pp.311-335, March 1998
- [6] Foschini G. J.: *Layered Space-Time Architecture for Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multielement Antennas*. Bell Labs Technical Journal, vol. 1, pp. 41-59, Autumn 1996
- [7] Gesbert D., Shafi M., Shiu D., Smith P.J., Naguib A.: *From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no. 3, April 2003
- [8] Giersz M., Mazik M.: *Układy wieloantenowe MIMO w systemach łączności bezprzewodowej trzeciej i czwartej generacji*. Praca Magisterska, Lipiec 2004
- [9] Hanlen L.: *Water-filling with Channel Correlation*. Australian Communication Theory Workshop proceedings 2003, pp. 19-13, Feb 2003, AusCTW 2003
- [10] Haykin S.: *Systemy telekomunikacyjne*. Wydawnictwa komunikacji i łączności, Warszawa 1998
- [11] Rappaport T.S., Annamalai A., Buehrer R.M., Tranter W.H.: *Wireless Communications: Past Events and a Future Perspective*. IEEE Communications Magazine, May 2002
- [12] Sulonen K., Suvikunnas P., Vuokko L., Kivinen J., Vainikainen P.: *Comparison of MIMO Antenna Configurations in Picocell and Microcell Environment*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no. 5, June 2003
- [13] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network 25.876 v.1.3.0: *Multiple-Input Multiple Output in UTRA*. February 2004
- [14] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network 25.848 v.4.0.0: *Physical Layer Aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access*. March 2001
- [15] Telatar I.E.: *Capacity of Multiantenna Gaussian Channels*. Bell Laboratories Technical Memorandum, June 1995
- [16] Wesolowski K.: *Perspektywy rozwoju systemów i sieci bezprzewodowych*. Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, Kwiecień 2003



Maciej Mazik – otrzymał tytuł magistra inżyniera telekomunikacji na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w lipcu 2004 roku. Podczas studiów był członkiem koła naukowego Katedry Telekomunikacji. W ramach stypendium Socrates-Erasmus studiował jeden semestr na Tampere University of Technology w Finlandii.

Od sierpnia 2004 roku jest pracownikiem Motorola Polska Electronics Sp. z o.o. Jego głównymi zainteresowaniami są zagadnienia związane z sieciami bezprzewodowymi, w szczególności systemy łączności ruchomej trzeciej i czwartej generacji.



*Wiesław Ludwin – uzyskał stopnie zawodowe i naukowe: magistra inżyniera i doktora nauk technicznych na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej odpowiednio w roku 1978 i 1983. W latach 1978-1986 pracował w Instytucie Automatyki, Inżynierii Systemów i Telekomunikacji. Od 1986 roku jest adiunktem w Katedrze Telekomunikacji AGH w Krakowie.*

*Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na problemach dotyczących systemów radiokomunikacyjnych. W szczególności obejmują*

*zagadnienia projektowania sieci i systemów radiowych oraz analizy ruchu telekomunikacyjnego w systemach łączności ruchomej o strukturze komórkowej. Jest autorem książek o telefonii komórkowej (1994), systemie łączności bezprzewodowej Bluetooth (2003), projektowaniu sieci komórkowych w aspekcie ruchowym (2003) i autorem bądź współautorem ponad 40 artykułów naukowych.*



*Maciej Giersz – otrzymał tytuł magistra inżyniera telekomunikacji na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w lipcu 2004 roku. Podczas studiów był członkiem koła naukowego Katedry Telekomunikacji. W ramach stypendium Socrates-Erasmus studiował jeden semestr na Tampere University of Technology w Finlandii.*

*Od sierpnia 2004 roku pracuje w Dziale Zarządzania Rysykiem Informatycznym w Ernst & Young Audit Sp. z o.o. Interesuje się zagadnieniami związanymi z bezpieczeństwem danych oraz systemami telekomunikacji bezprzewodowej.*

---