

PORÓWNANIE KODOWANIA SIECIOWEGO Z TECHNIKĄ MU-MIMO W TRANSMISJI DWUKIERUNKOWEJ PRZEZ PRZEKAŹNIK DLA MODELU KANAŁU RADIOWEGO IMT-ADVANCED

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiona została idea komunikacji dwukierunkowej pomiędzy stacją bazową, a stacją mobilną, w której transmisja odbywa się za pośrednictwem stacji przekaźnikowej wyposażonej w co najmniej dwie anteny. W artykule porównano zastosowanie kodowania sieciowego i przetwarzania wieloantenowego dla transmisji rozgłoszeniowej realizowanej przez przekaźnik. Omawiany system przebadano dla modelu kanału radiowego IMT-Advanced w celu określenia wpływu korelacji między sygnałami docierającymi do anten odbiorczych na efektywność zaproponowanych algorytmów.

1. WSTĘP

Niniejszy artykuł stanowi kontynuację tematyki podjętej przez autorów w publikacjach [1] oraz [2]. W publikacji [1] przeanalizowano wydajność techniki wieloantenowej MU-MIMO (ang. *Multi User - Multiple Input Multiple Output*) w systemie LTE-Advanced (ang. *Long Term Evolution - Advanced*) dla modelu kanału radiowego IMT-Advanced (ang. *International Mobile Telecommunication - Advanced*) dla różnych algorytmów kodowania wstępnego. W publikacji [2] zaproponowano nowe podejście do transmisji dwukierunkowej przez przekaźnik w fazie rozgłoszeniowej, gdy przekaźnik wyposażony jest w co najmniej dwie anteny. Przeprowadzone w [2] badania symulacyjne zrealizowano dla nieskorelowanych kanałów radiowych między elementami antenowymi łącza radiowego przy wykorzystaniu modelu linii opóźniającej z odczepami (ang. *Tap Delay Line, TDL*). W celu weryfikacji otrzymanych w [2] rezultatów dla modelu kanału radiowego uwzględniającego korelację sygnałów docierających do układu antenowego przeprowadzono badania symulacyjne dla modelu kanału radiowego IMT-Advanced, które zostaną zaprezentowane w dalszej części pracy.

W scenariuszu rozważanym w niniejszym artykule stacje przekaźnikowe pośredniczące w komunikacji pomiędzy stacją mobilną, a stacją bazową zamontowane są na dachach zaparkowanych samochodów, tworząc dynamiczną sieć z wieloma punktami dostępowymi.

W pierwszej części artykułu przedstawiony został model badanego systemu. Następnie dokonano szczegółowej analizy fazy rozgłoszeniowej transmisji dwukierunkowej. Kolejna część artykułu poświęcona została modelowi kanału radiowego IMT-Advanced. W ostatniej części przedstawiono wyniki badań symulacyjnych oraz wnioski z nich płynące. Artykuł kończy się podsumowaniem uzyskanych rezultatów.

2. MODEL BADANEGO SYSTEMU

W niniejszym artykule badana jest komunikacja dwukierunkowa pomiędzy stacją bazową, a stacją mobilną, w której transmisja odbywała się za pośrednictwem stacji przekaźnikowej. W rozważanym scenariuszu, komunikacja przebiega zgodnie z modelem realizującym pełne dekodowanie informacji w stacji przekaźnikowej (ang. *Decode-and-Forward, DF*). Wymiana informacji między stacją bazową, a stacją mobilną została podzielona na dwie fazy: fazę wielodostępu (ang. *Multiple Access phase, MA*) oraz fazę rozgłoszeniową (ang. *Broadcast phase, BR*). Do przeprowadzenia badań wykorzystano model systemu wzorowanego na standardzie LTE, z wielodostępem OFDMA (ang. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) na łączu w dół i SC-FDMA (ang. *Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*) na łączu w górę. W skład modelowanego systemu wchodzi trzy stacje: stacja bazowa, stacja mobilna oraz stacja przekaźnikowa, przy czym stacja przekaźnikowa wyposażona jest w co najmniej dwie anteny. W najprostszym przypadku, do realizacji transmisji dwukierunkowej w systemie z dupleksem czasowym (ang. *Time Division Duplex, TDD*) wymagane są cztery szczeliny czasowe. W rozważanym systemie, liczbę wymaganych szczelin czasowych ograniczono do dwóch. Model takiego systemu zaprezentowano na rys. 1.



Rys. 1. Model rozważanego systemu.

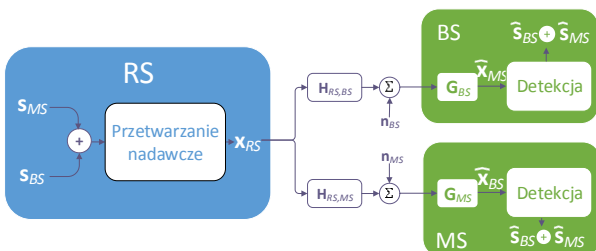
W pierwszej fazie transmisji, stacja mobilna nadaje dane zgodnie z formatem SC-FDMA, podczas gdy stacja bazowa, konkurencyjnie, transmituje dane w formacie OFDMA. Obie stacje wykorzystują do transmisji te same zasoby czasowo-częstotliwościowe tworząc system nadawczy traktowany jako system MIMO z rozdzielonymi przestrzennie stacjami nadawczymi (ang. *Virtual MIMO*). Stacja przekaźnikowa, wyposażona w przynajmniej dwie anteny odbiorcze, dekoduje odebrany sygnał, otrzymując przesłane przez stację bazową oraz mobilną bloki danych.

Druga faza transmisji polegająca na przesłaniu zdekodowanych bloków danych do docelowych stacji, korzystając z tych samych zasobów czasowo-częstotliwościowych, została zrealizowana z wykorzystaniem dwóch różnych technik: kodowania sieciowego (ang. *Network Coding*, NC) oraz przetwarzania wieloantennowego na poziomie warstwy fizycznej (techniki MU-MIMO wraz z odbiornikiem usuwającym interferencje).

3. FAZA ROZGŁOSZENIOWA

W drugiej fazie rozważanej transmisji dwukierunkowej zdekodowane przez stację przekaźnikową strumienie danych przesyłane są w formacie OFDMA do obu stacji docelowych. Pomimo tego, że zgodnie ze standardem LTE stacja bazowa jest przystosowana do odbierania danych jedynie w trybie SC-FDMA, na potrzeby badanego schematu rozszerzono funkcjonalność odbiornika stacji bazowej o możliwość odbioru sygnałów OFDMA. Zmniejszenie liczby wymaganych do transmisji szczelin czasowych w badanym scenariuszu jest możliwe dzięki wykorzystaniu jednej z dwóch technik: kodowania sieciowego lub MU-MIMO.

Zastosowanie kodowania sieciowego w warstwie transportowej systemów bezprzewodowych cieszy się w ostatnich latach dużym zainteresowaniem środowiska naukowego. Pierwsze wzmianki o kodowaniu sieciowym pojawiły się w opublikowanym w 2000 roku artykule, autorstwa Ahlswede, Cai, Li oraz Yeung pt. „Network Information Flow” [8]. Zapoczątkowało to nowy obszar badań naukowych najpierw o charakterze czysto teoretycznym, jednak wraz z rozwojem badań w tej dziedzinie zaczęły pojawiać się propozycje konkretnych rozwiązań technicznych zwiększających istotnie przepływność sieci bezprzewodowych. Ze względu na tzw. rozgłoszeniowy charakter kanału radiowego kodowanie sieciowe znalazło swoje zastosowanie między innymi w komunikacji dwukierunkowej, zmniejszając o połowę liczbę szczelin czasowych niezbędnych do transmisji danych ze stacji przekaźnikowej do stacji docelowych. Zasada działania kodowania sieciowego opiera się na łączeniu strumieni danych, wykonując na nich określone operacje matematyczne, przed przesłaniem ich w kierunku węzła docelowego. W badanym systemie stacja przekaźnikowa dokonuje sumowania binarnego bloków danych przeznaczonych do stacji mobilnej (s_{BS}) i stacji bazowej (s_{MS}) (rys. 2). Odzyskanie zakodowanych w ten sposób danych wymaga od stacji docelowych przechowania wcześniej przesłanych wiadomości i ponownego przeprowadzenia operacji sumowania binarnego.

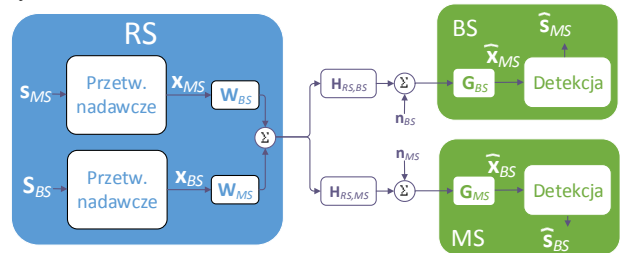


Rys. 2. Kodowanie sieciowe w fazie rozgłoszeniowej.

Kodowanie sieciowe jest techniką, którą można zrealizować przy jednej antenie nadawczej w stacji przekaźnikowej. Z racji tego, że do odbioru danych przesyła-

nych w pierwszej fazie potrzebne były co najmniej dwie anteny odbiorcze, taką samą liczbę anten postanowiono wykorzystać do transmisji w fazie rozgłoszeniowej. W podstawowej konfiguracji, przebadany więc został system z dwoma antenami nadawczymi, korzystający z przestrzenno-częstotliwościowych blokowych kodów Alamoutiego (ang. *Space-Frequency Block Codes*, SFBC) [9]. Badania systemu z kodowaniem sieciowym zostały następnie rozszerzone do czterech anten nadawczych i maksymalnie dwóch anten odbiorczych w stacjach docelowych. W przypadku czterech anten nadawczych zastosowana została kombinacja kodów SFBC oraz FSTD (ang. *Frequency Switched Transmit Diversity*). Do odbioru sygnału w stacjach z dwoma antenami odbiorczymi wykorzystany został odbiornik MRC (ang. *Maximum Ratio Combining*).

Alternatywną techniką umożliwiającą transmisję danych na tych samych zasobach czasowo-częstotliwościowych, przy założeniu przynajmniej dwóch anten po stronie nadawczej i odbiorczej, jest technika MU-MIMO. Dane każdej ze stacji docelowych podlegają niezależnemu kodowaniu w stacji przekaźnikowej, po czym mnożone są przez specyficzne macierze kodowania wstępnego (\mathbf{W}_{BS} , \mathbf{W}_{MS}), a następnie sumowane. Model takiego systemu został przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. MU-MIMO w fazie rozgłoszeniowej.

Odbierany przez stacje docelowe sygnał MU-MIMO jest liniową funkcją sygnału danych i można go przedstawić jako sumę trzech składników:

$$\mathbf{y}_{BS} = \mathbf{H}_{RS,BS} \overline{\mathbf{W}}_{BS} \mathbf{x}_{MS} + \underbrace{\mathbf{H}_{RS,BS} \overline{\mathbf{W}}_{MS} \mathbf{x}_{BS}}_{interferencja} + \mathbf{n}_{BS} \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_{MS} = \mathbf{H}_{RS,MS} \overline{\mathbf{W}}_{MS} \mathbf{x}_{BS} + \underbrace{\mathbf{H}_{RS,MS} \overline{\mathbf{W}}_{BS} \mathbf{x}_{MS}}_{interferencja} + \mathbf{n}_{MS} \quad (2)$$

gdzie $\overline{\mathbf{W}}_{BS} = \mathbf{W}_{BS} \mathbf{P}_{BS}$ i $\overline{\mathbf{W}}_{MS} = \mathbf{W}_{MS} \mathbf{P}_{MS}$ są macierzami kodowania wstępnego uwzględniającymi macierz normalizacji mocy

$$\mathbf{P} = \text{diag}(\mathbf{p})^{1/2} \quad (3)$$

gdzie wektor $\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_A]$ zawiera współczynniki mocy przypadające na każdą antenę nadawczą. Przy założeniu jednakowej mocy nadawczej dla wszystkich stacji docelowych, każdy element ma postać $p_k = P / A \|\mathbf{w}_k\|^2$, ($k = 1, \dots, A$), gdzie P jest ograniczeniem mocy sygnału nadawanego, a \mathbf{w}_k jest k -tą kolumną macierzy \mathbf{W} .

Pojemność systemu MU-MIMO może zostać osiągnięta dzięki zastosowaniu algorytmu DPC (ang. *Dirty Paper Coding*) [4] w doborze macierzy \mathbf{W}_k . Jednak z powodu dużej złożoności obliczeniowej tego algorytmu,

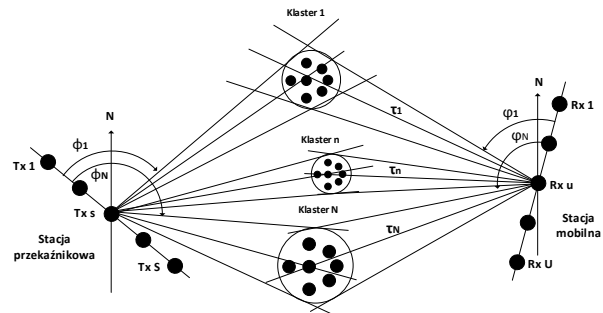
w praktyce stosuje się suboptymalne algorytmy kodowania wstępnego. W niniejszym artykule zaprezentowane zostały wyniki uzyskane dla algorytmów kodowania wstępnego opartych na diagonalizacji blokowej, takich jak BD (ang. *Block Diagonalization*), czy MU-BDBF (ang. *Multiuser Block Diagonalization Beamforming*) [7] oraz na odwracaniu macierzy kanału radiowego – algorytm ZFBF (ang. *Zero Forcing Beamforming*) [5,6]. Celem wyżej wymienionych algorytmów jest usunięcie interferencji występującej pomiędzy nadawanymi strumieniami danych przeznaczonymi do różnych stacji docelowych. W przypadku rozważanej komunikacji dwukierunkowej, w której stacje znajdują swoje sygnały interferujące (\mathbf{x}_{BS} oraz \mathbf{x}_{MS} - przy założeniu, że znane są również macierze kodowania wstępnego \mathbf{W}_{BS} oraz \mathbf{W}_{MS}), możliwe jest całkowite usunięcie interferencji w odbiorniku. W tym przypadku, do algorytmów kodowania wstępnego postanowiono zastosować algorytm SVD (ang. *Singular Value Decomposition* - stosowany dla transmisji SU-MIMO), rezygnując z usuwania interferencji w nadajniku, na rzecz algorytmu usuwającego interferencje w odbiorniku. W praktycznej realizacji tego algorytmu, wyboru macierzy kodowania wstępnego dokonywano opierając się na dostępnych w standardzie LTE ksiązkach kodowych [3].

4. MODEL KANAŁU RADIOWEGO IMT-ADVANCED

W celu zamodelowania środowiska propagacyjnego dla systemu wieloantenowego użyto modelu kanału radiowego IMT-Advanced opisanego w [1] oraz [10-12]. Z punktu widzenia prowadzonych badań istotną rolę odgrywa model pojedynczego łącza. Jest to dwukierunkowy stochastyczny geometryczny model kanału radiowego. Przez dwukierunkowość rozumiemy, że model ten specyfikuje rozkład kątów promieni zarówno po stronie odbiornika jak i nadajnika. Model ten należy do rodziny modeli stochastycznych, ponieważ jego parametry określone są poprzez podanie funkcji opisujących prawdopodobieństwo przyjęcia konkretnych wartości danego parametru. W modelu tym określona jest również dwuwymiarowa geometria środowiska propagacyjnego. Są więc określone pozycje oraz wzajemne relacje przestrzenne między węzłami sieci radiowej. Model pojedynczego łącza bazuje na modelu linii opóźniającej z klastrami. Model ten definiuje moce, opóźnienia oraz kąty promieni w celu reprezentacji środowiska wielodrogowego. Częstotliwość Dopplera nie jest jednoznacznie określona, ponieważ jest wyrażona przez moc oraz kąty promieni połączone z charakterystykami układów antenowych oraz prędkościami poruszania się terminali. Model pojedynczego łącza obrazujący koncepcję klastrów pokazano na rys. 4. W modelu IMT-Advanced zdefiniowane są parametry dla pięciu środowisk propagacyjnych. Niezależnie od scenariusza do generowania współczynników kanału używany jest tzw. model podstawowy (ang. *generic model*). W modelu tym uwzględnia się układy antenowe w nadajniku i odbiorniku, co sprawia, że odpowiedź impulsowa ma postać macierzy i opisana jest równaniem:

$$\mathbf{H}(t; \tau) = \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_n(t; \tau) \quad (4)$$

gdzie każda z macierzy $\mathbf{H}_n(t; \tau)$ reprezentuje odpowiedź impulsową dla pojedynczego klastra.



Rys. 4. Model pojedynczego łącza

5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

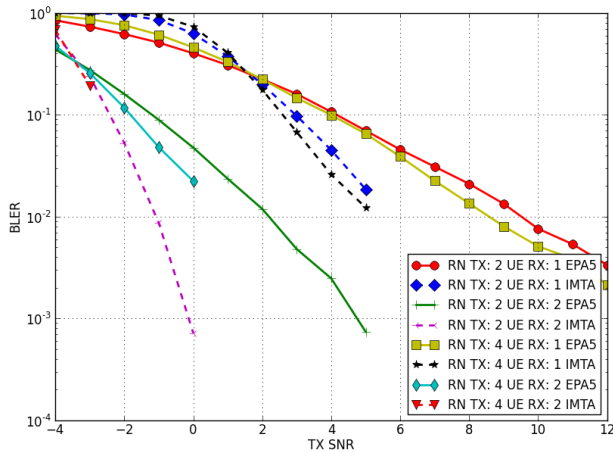
W celu przebadania fazy rozgłoszeniowej komunikacji dwukierunkowej z pośredniczącą stacją przekaźnikową przeprowadzono szereg symulacji przy wykorzystaniu programowej implementacji warstwy fizycznej systemu LTE-Advanced oraz modeli kanału radiowego EPA (ang. *Extended Pedestrian A*) 5Hz oraz IMT-Advanced. Parametry modelu kanału radiowego IMT-A zostały ustawione zgodnie ze scenariuszem miejskim dla małych komórek. Przeprowadzone symulacje należą do klasy symulacji wielu łączy na poziomie łącza (ang. *multi-link link level simulations*). W tabeli 1 zestawione zostały najważniejsze parametry przeprowadzonych symulacji.

Tab. 1. Wartości parametrów symulacji

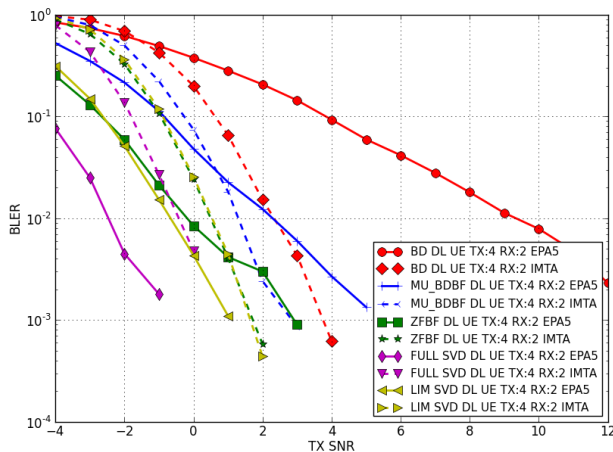
Parametry	Wartości
Pasma pracy/liczba bloków zasobów	1,4 MHz / 6
Dupleks	TDD
Konfiguracja anten w fazie rozgłoszeniowej (Schemat - RN x BS, MS)	NC - 2 x 1,1 NC - 2 x 2,2 NC - 4 x 1,1 NC - 4 x 2,2 MU-MIMO - 2 x 2,2 MU-MIMO - 4 x 2,2
Model kanału radiowego	EPA 5Hz (bez korelacji), IMT-A (z korelacją)
Algorytm kodowania wstępnego w technice MU-MIMO	ZFBF, BD, MU-BDBF, FULL CSI SVD, LIMITED CSI SVD
Modulacje	QPSK, 16QAM, 64QAM

Dla stacji bazowej i przekaźnikowej przyjęto odległość między elementami antenowymi równą 4 długości fali, natomiast dla stacji mobilnej przyjęto 0,5 długości fali. Algorytm kodowania wstępnego SVD przebadano dla pełnej (FULL) wiedzy o stanie kanału (ang. *Channel State Information, CSI*) oraz wiedzy ograniczonej (LIMITED) do indeksu książki kodowej. Rys. 5 przedstawia wpływ środowiska radiowego na transmisję wykorzystującą kodowanie sieciowe. Otrzymane rezultaty wskazują na lepsze działanie techniki NC dla bardziej zaawansowanego modelu kanału radiowego IMT-Advanced. Rezultaty pokazane na rys. 6 pokazują wpływ korelacji sygnałów docierających do układu anten od-

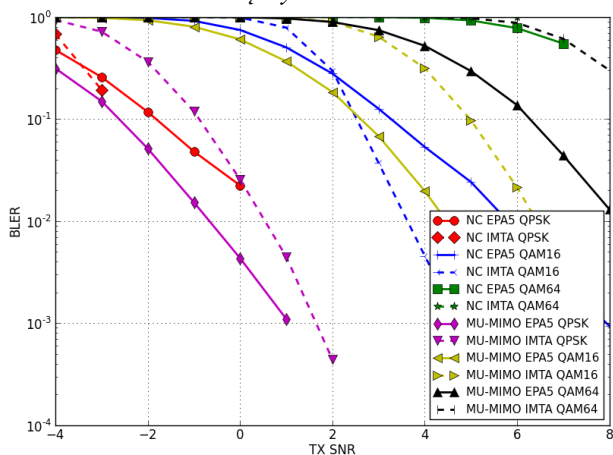
biorczych, która pogarsza uzyskiwane rezultaty. Zebrane na rys. 7 wyniki porównujące NC z MU-MIMO świadczą o pogorszeniu wyników dla techniki MU-MIMO w porównaniu z techniką NC dla modelu kanału radiowego IMT-Advanced. Niemniej uzyskiwane rezultaty ciągle pozwalają konkurować technice MU-MIMO z techniką NC. Pełniejsze omówienie wyników dla kanału EPA 5 można znaleźć w [2].



Rys. 5. Faza rozgłoszeniowa: NC, QPSK. Łącze między RN a MS.



Rys. 6. Faza rozgłoszeniowa: MU-MIMO, QPSK. Łącze między RN a MS.



Rys. 7. Faza rozgłoszeniowa: porównanie NC z MU-MIMO. Łącze między RN a MS (4x2).

6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły na zweryfikowanie zaproponowanej techniki transmisyjnej dla fazy rozgłoszeniowej transmisji dwukierunkowej przez przekaźnik. Przedstawione wyniki badań symulacyjny potwierdziły skuteczność zaproponowanych algorytmów również dla modelu kanału radiowego uwzględniającego korelację sygnałów docierających do układu anten odbiorczych.

SPIS LITERATURY

- [1] K. Ratajczak, K. Bąkowski, "Analiza wydajności techniki MU-MIMO w systemie LTE-Advanced dla modelu kanału radiowego IMT-Advanced", Przegąd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 6/2013, str. 258 -261, ISSN 1230-3496
- [2] K. Ratajczak, K. Bąkowski, K. Wesołowski, "Two-way Relaying for 5G Systems - Comparison of Network Coding and MIMO Techniques", IEEE Wireless Communications and Networking Conference, IEEE WCNC 2014, 6-9 April 2014, Istanbul, Turkey
- [3] TS 36.213: *Physical layer procedures*, Release 8 v.8.5.0, 3GPP, 2008-12
- [4] M. H. M. Costa, "Writing on dirty paper", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 29, no. 3, pp. 439-441, 1983
- [5] F. Kaltenberger, M. Kountouris, "Capacity of linear Multi-User MIMO Precoding Schemes with Measured Channel Data", Signal Processing Advances in Wireless Communication, 2008
- [6] T. Haustein, C. von Helmolt, E. Jorswieck, "Performance of MIMO systems with channel inversion", in Proceedings of the 55th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'02), vol. 1, pp. 35-39, 2002
- [7] L.-U. Choi, R.D. Murch, "A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 3, no. 1, pp. 20-24, 2004
- [8] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. R. Li and R. W. Yeung, "Network information flow," IEEE Trans. Information Theory, July 2000
- [9] S. M. Alamouti, "A Simple Transmitter Diversity Technique for Wireless Communications," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 16, pp. 1451-1458, October 1998
- [10] Report ITU-R M.2135, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced, Geneva 2008
- [11] IST-WINNER II Deliverable 1.1.2 v.1.2. WINNER II Channel Models, IST-WINNER II Technical Report 2007, (<http://www.ist-winner.org/deliverables.html>)
- [12] K. Bąkowski, K. Wesołowski, "Change the Channel: A New Model for the IMT-Advanced System", IEEE Vehicular Technology Magazine, June 2011, Volume 6, Number 2, p.82-91