

Sławomir PLUTA\*  
Dawid SIODLACZEK\*

## OPRACOWANIE STANOWISKA DYDAKTYCZNEGO DO BADAŃ SYMULACYJNYCH SYSTEMU WiMAX

W artykule przedstawiono stanowisko edukacyjne dla potrzeb symulacji radiowego systemu szerokopasmowego WiMAX (IEEE 802.16–2004). Opisano przegląd symulatorów systemu WiMAX oraz przegląd możliwości prezentowanego pakietu symulacyjnego. Jako narzędzie do symulacji wykorzystano zestaw skryptów i funkcji MATLAB. Korzystanie z takiego pakietu wymaga bardzo dobrej znajomości systemu WiMAX i sprawnego określania kluczowych parametrów systemu oraz parametrów wykonywania symulacji. W celu uproszczenia i zoptymalizowania zadań definiowania symulacji opracowano specjalną nakładkę w formie interfejsu graficznego. Wykorzystuje ona wyświetlane dialogowo komunikaty z możliwie dużą liczbą dodatkowych zapytań. Takie postępowanie jest uzasadnione pod kątem dydaktycznym. W artykule przedstawiono również szereg wyników symulacji, dobranych pod kątem ilustracji zasad działania systemu WiMAX.

SŁOWA KLUCZOWE: WiMAX, symulacja, MATLAB

### 1. WSTĘP

System WiMAX (ang. *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) jest bezprzewodowym systemem dostępowym o zasięgu od kilku do kilkudziesięciu kilometrów od stacji bazowej. Zapewnia on szerokopasmowy dostęp do Internetu w układzie punkt – wielopunkt dla użytkowników stacjonarnych, a także dla użytkowników ruchomych (do 120 km/h) przy wykorzystaniu pasma licencjonowanego. Maksymalne szybkości transmisji sięgają od 75 Mb/s do 1 Gb/s [1]. Do opracowania stanowiska zastosowano stacjonarną wersję standardu IEEE 802.16d lub IEEE 802.16–2004 [2]. Wprowadzono tu szereg nowych technik w postaci przestrzennego odbioru zbiorczego dzięki technice wieloantenowej MIMO, możliwości pracy w warunkach braku bezpośredniej widoczności anten NLOS (ang. Non Line of Sight), podział pasma na kanały. Aktualnie stosowany jest także standard IEEE 802.16e, który został przyjęty w 2007 roku [3]. Dopuszcza on transmisję danych dla terminala poruszającego

---

\* Politechnika Opolska.

się z prędkością do 120 km/h. Ratyfikowany w 2011 roku standard IEEE 802.16m–2011, zwany także Mobile WiMAX Release 2 umożliwia osiągnięcie transferu danych nawet do 1 Gb/s dla połączeń stacjonarnych.

Prezentowane w artykule stanowisko symulacyjne systemu WiMAX jest opracowane w celu wspomagania procesu dydaktycznego na kierunku Elektronika i Telekomunikacja oraz prac badawczo-rozwojowych w zakresie radiowych sieci teleinformatycznych. Ustalenie parametrów roboczych systemu WiMAX, a następnie przeprowadzenie symulacji systemu w różnych scenariuszach testowych, stanowi efektywną metodę dydaktyczną w trakcie zajęć z radiokomunikacji na kierunku Elektronika i Telekomunikacja.

## 2. PRZEGLĄD DOSTĘPNYCH SYMULATORÓW SYSTEMU WIMAX

Dobór symulatora dla potrzeb symulacji systemu radiokomunikacyjnego należy rozważyć w kilku płaszczyznach:

- koszt symulatora – występują rozwiązania dystrybuowane na zasadzie Open Source, licencji GPL (*General Public Licence*) lub APL (*Academic Public Licence*) oraz komercyjne;
- możliwość prowadzenia symulacji ciągłych w czasie lub dyskretnych;
- nacisk na wierne modelowanie warstwy 1 (fizycznej) i 2 (łącza danych) modelu OSI lub przeniesienie nacisku na modelowanie i symulację zdarzeń związanych z warstwą 3 (sieci) i wyższymi, przy ograniczaniu dokładności modelowania warstwy 1 i 2.

Istotną sprawą jest możliwość włączenia symulacji do procesu prototypowania typu HiL (ang. hardware in the loop) z możliwością generowania kodu (np. w języku C++ lub VHDL) przesyłanego do platformy prototypowania, zwykle wykorzystującej urządzenia programowalne typu mikroprocesory, procesory sygnałowe, układy PLD/FPGA oraz układy SoC (ang. system on the chip). W tym przypadku potrzebna jest także weryfikacja eksperymentalna rzeczywistego obiektu/systemu (możliwość akwizycji i wymiany danych) w celu dostrojenia jego modelu (pomiar on-line) i otrzymania modelu zweryfikowanego. Wymagane są narzędzia do tworzenia aplikacji i do generowania kodu czasu rzeczywistego.

Obecnie dostępnych jest wiele symulatorów systemu IEEE 802.16 WiMAX. Dla potrzeb kształcenia inżynierów kierunku Elektronika i Telekomunikacja istotnym zagadnieniem jest możliwość symulacji z dokładnym uwzględnieniem właściwości warstwy fizycznej OFDM, szeregu technik kodowania i różnych modeli propagacyjnych. Szereg symulatorów sieci jak OPNET, NS-2, NS-3 i OMNeT++ są symulatorami zdarzeń dyskretnych (symulatory zdarzeniowe). Posiadają one możliwość symulacji systemu WiMAX w różnym stopniu. Jednym z najbardziej popularnych symulatorów dostępnych na licencji GNU jest

symulator o nazwie NS-3 [4]. Dla symulatorów NS-2/NS-3 opracowano stosunkowo szczegółowy model transmisji w warstwie fizycznej OFDM i kilka modułów WiMAX oferujących różne funkcjonalności [5, 6, 7, 8, 9]. Ponadto w ramach innych platform symulacji zdarzeń dyskretnych jak NCTUns, Numbat, OMNeT++ zostały również opracowane modele pozwalające symulować system WiMAX.

Z punktu widzenia zajęć dydaktycznych symulator NS-3 ma pewne wady. Jest on napisany w języku C++ (podobnie jak starsza wersja NS-2, choć oba nie są ze sobą kompatybilne) i/lub języku Python oraz nie posiada „centrali” sterowania symulacją w postaci specjalnego pliku lub interfejsu graficznego, który mógłby ułatwić zarządzanie symulacją i modyfikacją jej parametrów. Oprogramowanie NS-3 wykorzystuje biblioteki, które trzeba dobrze znać w celu dołączania i dynamicznego dopasowywania ich elementów, co nie jest wygodne w warunkach zajęć dydaktycznych.

Kolejną grupę symulatorów tworzą rozwiązania wykorzystujące pakiet MATLAB [10]. MATLAB pozwala na realizację wszystkich opisanych powyżej rozwiązań i metod symulacji systemów radiokomunikacyjnych. Zalicza się do nich zarówno rozwiązania dostępne w ramach przykładów do dokumentacji przybornika Communications Systems Tools [11], jak i propozycje specjalistycznych symulatorów komercyjnych proponowanych przez firmy trzecie [12]. Do opracowania opisanego w artykule dydaktycznego stanowiska symulacyjnego, któremu nadano nazwę *WiMAX lab*, zastosowano pakiet skryptów i funkcji MATLAB udostępnionych na zasadach akademickiej licencji niekomercyjnej przez Instytut Telekomunikacji Wiedeńskiego Uniwersytetu Technologicznego [13].

Pozostałe komercyjne rozwiązania symulatorów WiMAX, dostępne w zasobach Visual System Simulator proponowanego przez firmę National Instruments oraz Advanced Design System firmy Keysight, posiadają większość zalet i możliwości aplikacji opracowanych z pomocą pakietu MATLAB, przy jeszcze większych możliwościach integracji modelowania z rzeczywistymi realizacjami sprzętowymi oraz weryfikacji pomiarowej symulowanych modeli.

### 3. OPIS PROPONOWANEGO ROZWIĄZANIA SYMULATORA SYSTEMU WIMAX

Wybrany symulator realizuje następujące funkcje (funkcjonalności) związane z działaniem warstwy fizycznej OFDM PHY:

- system adaptacyjnego kodowania i modulacji,
- kodowanie kanału,
- kodowanie przestrzenno-czasowe,
- dobór wektora SNR (stosunku sygnału do szumu),
- dobór liczby symulowanych ramek,

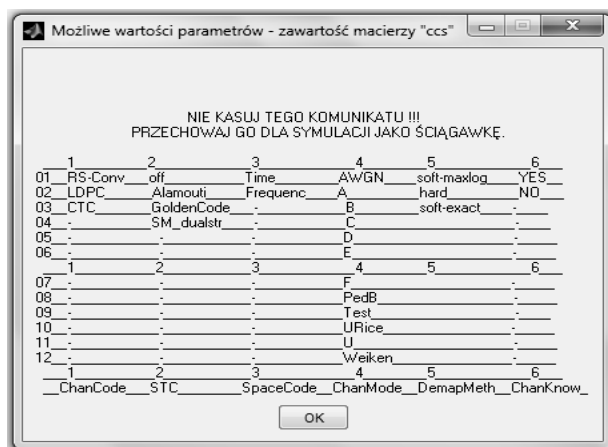
- dobór liczby anten nadawczych i odbiorczych,
- dobór modelu kanału np. AWGN, Rice'a, itd.,
- dobór estymatora kanału np. LS,
- metoda odwzorowywania odwrotnego.

Na pakiet symulatora *WiMAX lab* składa się m. in.: plik *WiMAX\_sim.m*, który jest głównym plikiem symulatora, gdzie należy wprowadzić podstawowe parametry symulacji; folder *LDPC\_codes*, który zawiera odpowiednie pliki wymagane przez koder i dekodek; folder *results*, gdzie są wyniki zapisywane po zakończeniu symulacji. Korzystanie z takiego pakietu skryptów i funkcji MATLAB wymaga bardzo dobrej znajomości systemu WiMAX i sprawnego określania kluczowych parametrów systemu oraz parametrów sterowania symulacją. Dodatkowo parametry te powinny zostać odpowiednio wprowadzone do aplikacji MATLAB. Jest to zadanie stosunkowo wymagające dla studentów kierunku inżynierskiego i trudne do zrealizowania w typowych ramach czasowych zajęć dydaktycznych. Przyjęto więc założenie o możliwie maksymalnym wykorzystaniu prostych, wyświetlanych w formie dialogu (we właściwym miejscu i czasie) komunikatów z możliwie dużą liczbą dodatkowych informacji typu: co teraz robić? gdzie? dlaczego? Takie postępowanie jest uzasadnione dydaktycznie, ponieważ może zostać maksymalnie wyeksponowana strona merytoryczna symulacji, a jej strona programowa, związana ze stosowaniem pakietu MATLAB, zostanie w pewnym sensie ukryta. Proste i logicznie dobrane elementy graficznego dialogu kontekstowego są najwłaściwsze do szybkiego wykorzystania uruchomienia symulacji.

### 3.1. Interfejs graficzny dialogowo zorientowanego definiowania parametrów i wariantów symulacji

Początkowa wspólna ścieżka definiowania wariantów symulacji zawiera dwa elementy graficzne. W opracowanym stanowisku symulacyjnym zunifikowano mechanizm dialogu w postaci: komunikatów (msgbox) i list dialogowych (listdlg). Komunikat umieszczony na rys. 1 ukazuje się pierwszy po uruchomieniu skryptu *WiMAX\_sim\_mod.m* i z założenia powinien być tłumaczem nazw i opisów parametrów używanych w symulacji, czyli powinien wyświetlać zawartość macierzy parametrów *ccs* omawianego skryptu. Wprowadzenie skrótu / zmiennej, a nie samej zmiennej, ma prozaiczną przyczynę w ustaleniu maksymalnej pojemności 74 znaków dla wiersza używanego tu komunikatu typu *msgbox* i przekroczeniem tej pojemności w ostatnim wierszu macierzy *ccs* w przypadku użycia pełnych nazw wszystkich zmiennych.

Następnie wyświetlana jest lista opcji wyboru sposobów wpisu wartości dla poszczególnych wariantów doboru parametrów, czyli nazw dla parametrów jakościowych, a potem liczb dla parametrów ilościowych. Pozwala to na adaptację do stopnia znajomości pakietu MATLAB przez studenta. Lista ta jest generowana przez wywołanie funkcji *lista* w programie *WiMAX\_sim\_mod.m*.



Rys. 1. Graficzna forma przedstawienia macierzy *ccs* z doбором parametrów symulacji wyświetlana za pomocą rozkazu `msgbox`

Dalej następuje wyświetlenie serii list wyboru, dotyczących kolejnych parametrów, których argumentami są nazwy np. kodów czy typów kanałów, czy też wartości parametrów symulacji, jak to przedstawiono na rysunku 2. Dopuszcza się przeprowadzenie kolejnych symulacji dla 1, 2 lub 3 wariantów doboru parametrów, co pozwala wykonać analizy porównawcze.

Proces symulacji uzupełniają graficznie wyświetlane komunikaty o sprzecznych warunkach symulacji dla danego wyboru parametrów symulacji. Wymagana jest wtedy korekta doboru parametrów. Po skończonej symulacji i wykreśleniu charakterystyk o zadanych parametrach, wyświetlane są za pomocą instrukcji `msgbox` komunikaty, zawierające aktualne wartości macierzy *ccn* oraz *ccc*. Jest to zademonstrowane na rys. 3.

#### 4. PRZYKŁADOWE WYNIKI SYMULACJI – PORÓWNANIE WPLYWU LICZBY ANTEN NA WYDAJNOŚĆ TRANSMISJI

Jako pierwszą wykonano symulację transmisji WiMAX dla schematu anten SISO (ang. Single Input, Single Output), pozwalającą na pełne porównanie zmienności parametru BER i przepustowości dla modeli propagacyjnych kanału: *AWGN*, *PedB*, *URice*. W kanale *AWGN* (ang. additive white Gaussian noise) do sygnału liniowo dodawany jest biały szum gaussowski. Model kanału Rice'a występujący w symulacji pod nazwą *URice* jest stochastycznym modelem propagacji fali radiowej z zanikami spowodowanymi wielodrogową trasą transmisji sygnału do odbiornika. Model kanału *PedB* jest zgodny z modelem ITU-R M.1225 Pedestrian B dla użytkownika pieszego poruszającego się z prędkością 3–4 km/h. W czasie symulacji zastosowano regułę decyzyjną (kryterium) dla

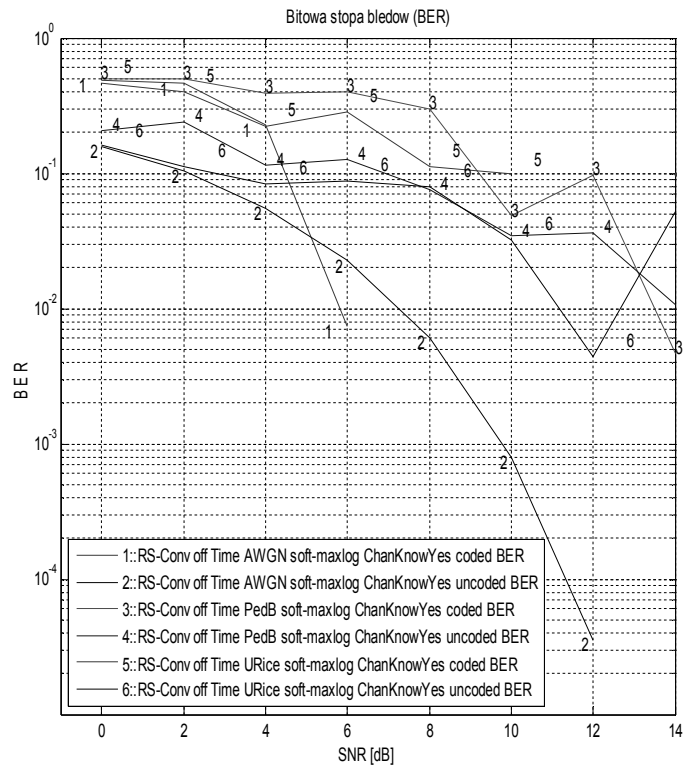
identyfikacji odbieranych sekwencji znaków w postaci miękkiej reguły max-log-MAP (ang. *soft\_maxlogmap*). Symulacje przeprowadzono z wykorzystaniem i bez wykorzystania spłotowego kodu FEC typu *RS-Conv* – *RS-CC* (ang. Reed-Solomon-convolutional code). Symulację wykonano dla korzystnego wariantu estymacji odpowiedzi impulsowej kanału (*ChanKnowYes*) i wariantu z nieprzeprowadzeniem takiej estymacji (*ChanKnowNo*).



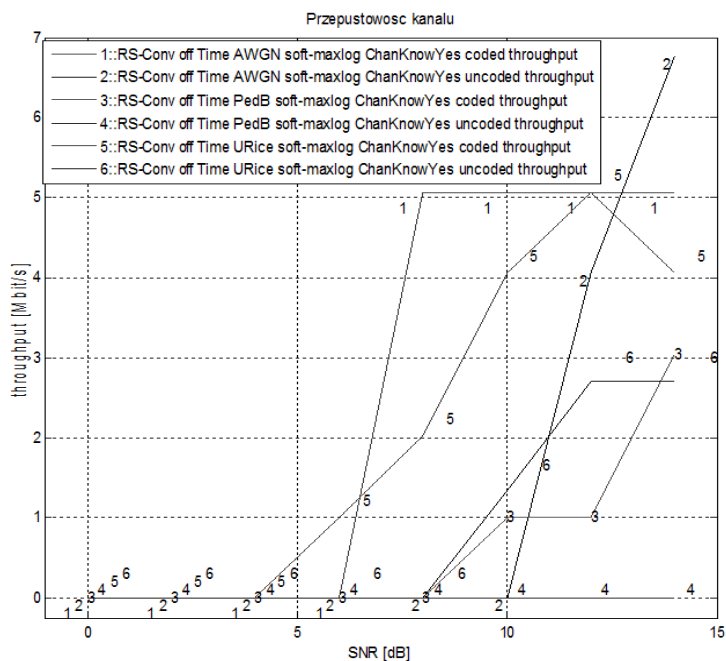
Rys. 2. Listy wyboru wartości parametrów symulacji



Rys. 3. Końcowe komunikaty zawierające końcowe wartości macierzy *ccn* i macierzy *ccc*



Rys. 4. Wykres zależności BER od SNR dla 3 modeli kanałów SISO i 5 ramek



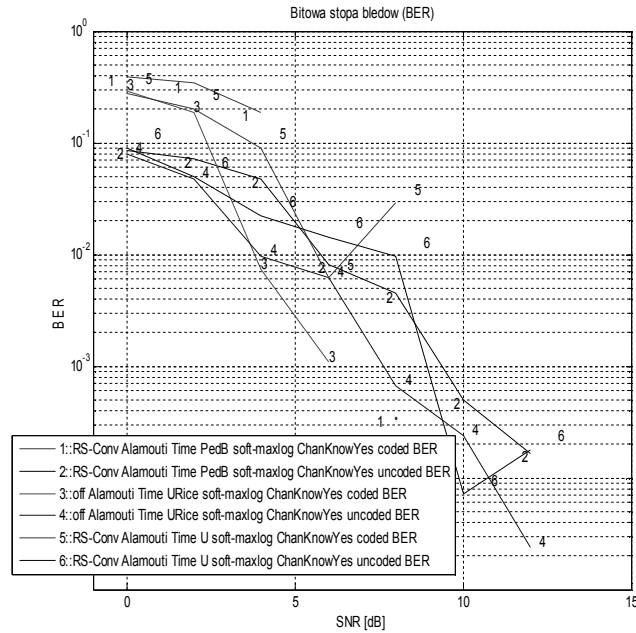
Rys. 5. Wykres zależności przepustowości od SNR dla 3 modeli kanałów SISO i 5 ramek

Modele kanałów wykorzystywane dla symulacji układu anten 2x2 MIMO (ang. Multiple Input, Multiple Output) to modele *PedB*, *URice*, *U*. Model *U* reprezentuje kanał z płaskim, nieskorelowanym zanikiem. Na rys. 6 i 7 przedstawiono typowe charakterystyki określające wydajność dla transmisji 5 ramek oraz schematu MIMO z kodem Alamouti.

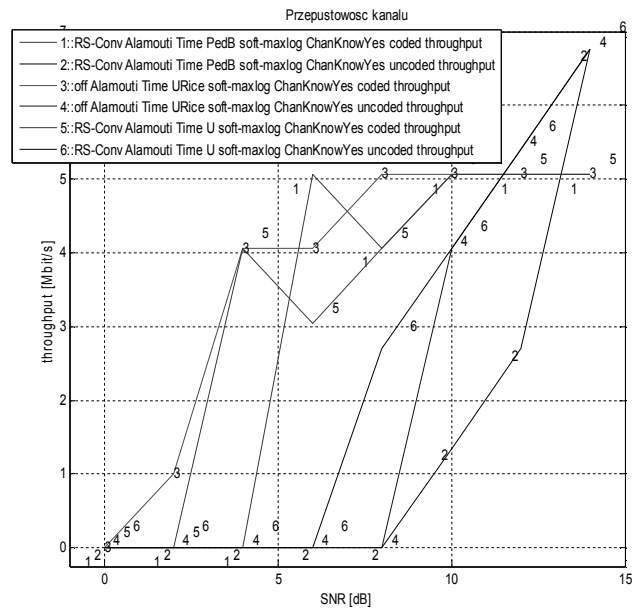
Charakterystyki z rys. 6 i 7 dla transmisji w schemacie MIMO (2x2) pokazują znaczną poprawę wydajności transmisji w stosunku do schematu SISO. Różnice te są znaczące szczególnie dla większych wartości SNR.

Z zamieszczonych na rysunkach wykresów widać, jak wielki wpływ na zwiększenie stopy BER i zmniejszenie przepustowości mają zaniki, interferencje i brak bezpośredniej widoczności anten (kanał *URice* i *PedB*). W schemacie SISO najlepsze wyniki są otrzymywane dla referencyjnego modelu kanału LOS typu AWGN. Wysoką wydajność transmisji zapewnia także stosowanie kodowania FEC oraz estymacja odpowiedzi impulsowej kanału. Dla schematu MIMO widać znaczną poprawę wydajności transmisji w kanale z zanikami *URice*. W układzie MIMO zwiększa się odporność transmisji na zakłócenia, w tym na zakłócenia wywołane niekorzystnymi warunkami propagacji. W układzie transmisji wielodrogowej, zgodnej z modelem *URice*, możliwe jest wykorzystanie multipleksacji przestrzennej co spowodowało zwiększenie przepustowości, jak wykazano na rys. 7.





Rys. 6. Wykres zależności BER od SNR dla 3 modeli kanałów MIMO i 5 ramek



Rys. 7. Wykres zależności przepustowości od SNR dla 3 modeli kanałów MIMO i 5 ramek

## 5. PODSUMOWANIE

Stanowisko do badań symulacyjnych systemu WiMAX zostało przygotowane w celu adaptacji aparatu obliczeniowego MATLAB do procesu dydaktycznego. Dzięki dialogowej formie wprowadzania wartości parametrów symulacji oraz uzyskania odpowiedniej czytelności wykresów i ich opisów, jako formy prezentacji danych wyjściowych, symulacja nie stwarza problemów studentom, którzy nie znają zasad obsługi pakietu MATLAB. Uzyskane wyniki symulacji posłużyły do opracowania instrukcji laboratoryjnych. W niektórych symulacjach, szczególnie dla bardziej złożonych modeli kanałów (np. *URice*) czy pewnych schematów transmisji (np. MIMO), pożądane jest przetwarzanie większej liczby ramek niż 5, w celu zwiększenia dokładności obliczeń. Ustalenie ich właściwej liczby jest zawsze kompromisem pomiędzy dokładnością obliczeń oraz ich czasem.

## LITERATURA

- [1] <http://www.wimax.com>.
- [2] IEEE Std 802.16™–2012, IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, August 2012.
- [3] IEEE STD 802.16–2004, Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, October 2004.
- [4] <https://www.nsnam.org/>.
- [5] Farooq J., Turetli T., An IEEE 802.16 WiMAX module for the NS–3 simulator, Simutools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques, ICST, Brussels, Belgium, 2009.
- [6] Chen J., Wang C., Tsai F., Chang C., Liu S., Guo J., Lien J. S. W., Hung C., Design and implementation of WiMAX module for NS–2 simulator. 1st International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (VALUETOOLS'06), ACM, October 2006.
- [7] N. I. of Standards and Technology. The network simulator NS–2 NIST add-on – IEEE 802.16 model (mac+phy). Technical report, June 2007.
- [8] W. Forum. WiMAX forum system level simulator NS–2 mac+phy add-on for wimax (IEEE 802.16). Technical report, July 2008.
- [9] Borina J. F., da Fonseca N. L., WiMAX module for the NS–2 simulator. In International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07), IEEE, September 2007.
- [10] <http://www.mathworks.com>.
- [11] <http://www.mathworks.com/help/comm/examples/ieee-802-16-2004-ofdm-phy-link-including-space-time-block-coding/>.
- [12] <http://is-wireless.com/wimax-phy-lab/>.
- [13] <https://www.nt.tuwien.ac.at/wimaxsimulator>.

**DEVELOPMENT OF THE EDUCATIONAL PACKAGE  
FOR THE WIMAX SYSTEM SIMULATION**

The article presents the educational tool for simulation of the broadband system WiMAX (IEEE 802.16–2004). The article presents an overview of the simulators of the WiMAX system, an overview of the possibilities of the package and describes how to use this package in practice. As a simulation tool a package of scripts and MATLAB functions is used. To use of such a simulator is required from a student a very good knowledge of WiMAX system and determination the key parameters of the system and the control parameters of the simulation. A special overlay in form of graphical interface in order to simplify and optimize of the task of simulation is made. The dialog messages are used with a large set of additional questions. Such a procedure is justified under the angle of teaching. The paper also presented a number of examples of simulation results, which allows to explain the some principles of operation of the system.

*(Received: 26. 02. 2016, revised: 3. 03. 2016)*