

## MINIMALIZACJA INTERFERENCJI MIĘDZYKOMÓRKOWEJ W BEZPRZEWODOWEJ SIECI WIE- LOPOZIOMOWEJ PRZY UŻYCIU RÓWNOWAGI KORELACYJNEJ I ALGORYTMU UCZĄCEGO RE- GRET-MATCHING

**Streszczenie:** W artykule omówiono zagadnienie długo-  
okresowej minimalizacji interferencji w wielowarstwowym  
systemie komórkowym. Zaproponowano rozwiązanie będą-  
ce rozszerzeniem prac opisanych w [1, 2], wykorzystujące  
równowagę skorelowaną i algorytm uczący regret-  
matching. Przedstawione wyniki badań symulacyjnych  
wskazują, że opisana metoda zapewnia znaczący zysk prze-  
pływności w porównaniu z systemem bez minimalizacji  
interferencji oraz z systemem stosującym rozwiązanie  
zaproponowane dla LTE-Advanced.

### 1. WSTĘP

W systemach komórkowych nowej generacji coraz  
większą popularność zyskują małe punkty dostępowe  
tworzące tzw. femto- lub piko komórki. Ze względu na  
możliwość współistnienia małych komórek oraz dotych-  
czasowej sieci stacji bazowych typu makro, architektura  
systemu komórkowego może mieć charakter wielowar-  
stwowo z dużą liczbą małych punktów dostępowych  
rozmieszczonych w obszarach największego zagęszcze-  
nia użytkowników (UE) [3]. Zastosowanie dodatkowych  
małych komórek umożliwia znaczną poprawę wykorzysta-  
nia dostępnego pasma transmisyjnego oraz znaczne  
zwiększenie przepływności użytkowników związane ze  
zmniejszeniem odległości między stacją bazową (BS) i  
użytkownikiem. Jednak jednym z największych proble-  
mów związanych z wprowadzaniem małych stacji bazo-  
wych jest znaczący wzrost interferencji międzykomór-  
kowej, w szczególności między komórkami z różnych  
warstw sieci.

W literaturze zaproponowano szereg metod mini-  
malizacji interferencji, z których część polega na zasto-  
sowaniu teorii gier w procesie optymalizacji [1, 2, 4].  
Jednak większość tych rozwiązań poświęcona jest trady-  
cyjnym systemom komórkowym, w których występują  
stacje bazowe jednego rodzaju, lub systemom radia ko-  
gnitywnego. Dodatkowo, bardzo częstym założeniem w  
analizie tych rozwiązań jest idealna znajomość charakte-  
rystyki kanałów transmisyjnych, interferencji i decyzji  
pozostałych węzłów sieci.

Metody minimalizacji interferencji w wielowar-  
stwowym systemie komórkowym są też przedmiotem  
badań prowadzonych przez organizację 3GPP, która  
zaproponowała rozwiązanie wykorzystujące tzw. prawie  
puste podramki (ABS – ang. *almost blank subframes*)  
dla systemu LTE-Advanced [3,5]. Podstawowym zało-  
żeniem tej metody jest minimalizacja interferencji do  
małych stacji bazowych przez chwilowe przerwanie  
przesyłania danych w stacjach bazowych typu makro.

W zależności od konfiguracji i uczestniczących  
węzłów metody minimalizacji interferencji mogą mieć  
charakter scentralizowany, w którym jednostka centralna

koordynuje działania wszystkich węzłów, lub rozproszo-  
ny, gdzie każdy z węzłów podejmuje decyzje samodzielnie.  
Zaletą rozwiązań scentralizowanych jest łatwość  
procesu optymalizacji, gdyż jest on realizowany w jed-  
nym miejscu, natomiast wymagają one bardzo intensyw-  
nej wymiany informacji między węzłami sieci i jedno-  
stką centralną. Z kolei w przypadku systemów rozproszo-  
nych obciążenie systemu informacjami sterującymi jest  
mniejsze, jednak optymalizacja zdecydowanie trudniej-  
sza i często dająca gorsze rezultaty niż rozwiązania scen-  
turalizowane.

W niniejszym artykule kontynuowana jest praca  
przedstawiona w [1, 2], której celem jest opracowanie  
rozproszonej metody minimalizacji interferencji w wie-  
lowarstwowym systemie komórkowym. Działanie pro-  
ponowanego rozwiązania polega na analizie tzw. żalu  
związanego ze stosowaniem wybranych strategii i dąże-  
niu do minimalizacji jego wartości wraz z upływem  
czasu. Założono, że stacje bazowe wymieniają między  
sobą okresowo informacje sterujące o wybranych strate-  
giach oraz charakterystykach kanałów transmisyjnych i  
interferencji, przy czym jednym z celów tej pracy jest  
możliwe zmniejszenie ilości wymienianych danych  
sterujących. Dlatego w artykule zaproponowano długo-  
okresową metodę minimalizacji interferencji (okres  
rzędu dziesiątek lub setek milisekund) polegającą na  
efektywnym wykorzystaniu podziału zasobów w czasie i  
częstotliwości. Dodatkowo, zaproponowano szereg roz-  
wiązań w celu uproszczenia metody i zmniejszenia ilości  
przesyłanych niezbędnych informacji sterujących.

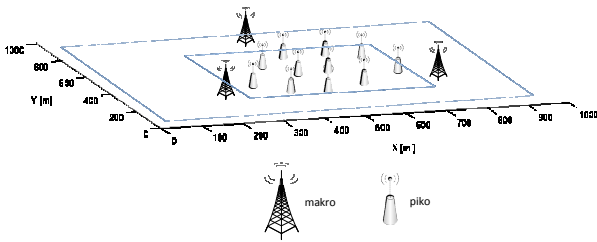
Dalsza część artykułu przedstawia się następująco: w  
rozdziale 2 przedstawiono model rozważanego systemu  
oraz definicję podstawowych pojęci i gry. Rozdział 3  
opisuje algorytm uczący regret-matching zastosowany w  
proponowanej metodzie oraz ewentualne konfiguracje,  
których celem jest uproszczenie przeprowadzanej proce-  
dury optymalizacyjnej. W rozdziale 4 omówiono prze-  
prowadzone badania symulacyjne, przedstawiając kolej-  
no: podstawowe założenia, wyniki otrzymane dla trans-  
misji w dół oraz wyniki otrzymane dla transmisji w górę.  
Ostatnia część – rozdział 5 – stanowi podsumowanie  
przedstawionego tematu.

## 2. MODEL SYSTEMU I DEFINICJA GRY

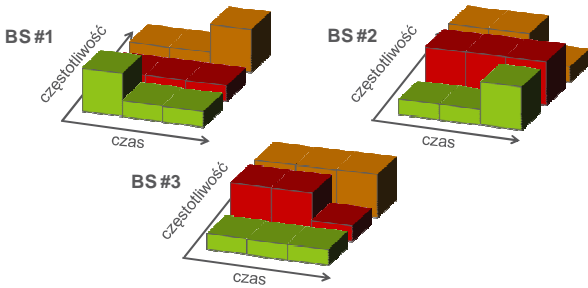
### 2.1. Model systemu

W niniejszej pracy rozważany jest dwuwarstwowy  
system komórkowy, w którym zastosowano technikę  
wielodostępu częstotliwościowego z wykorzystaniem  
nośnych ortogonalnych (OFDMA – ang. *orthogonal  
frequency division multiple access*). Założono obecność  
 $M=9$  stacji bazowych typu makro oraz  $K=11$  małych

stacji bazowych typu piko, co przedstawiono na Rys. 1, realizujących transmisję z wykorzystaniem tego samego pasma transmisyjnego. Dostępne zasoby w czasie i częstotliwości podzielono na bloki, w których stacja bazowa może zrealizować transmisję korzystając z jednego z dwóch dostępnych poziomów mocy nadawczej - niskiego i wysokiego ( $P=\{P_n, P_w\}$ ). W obszarze obserwacji (zaciemniony obszar na Rys. 1) rozmieszczono  $J$  użytkowników, z których większość znajduje się w pobliżu stacji bazowych piko (ciemniejszy obszar na Rys. 1). Każda ze stacji bazowych posiada zbiór obsługiwanych użytkowników  $J_i$ , gdzie  $i$  to indeks BS, przy czym w danej szczelinie czasowej (TTI – ang. *transmission time interval*) można zrealizować jednocześnie transmisję do najwyżej 10 UE. Zasoby są rozdzielane między użytkowników zgodnie z kryterium proporcjonalnej sprawiedliwości (PF – ang. *proportional fairness*).



Rys. 1. Rozważany układ stacji bazowych



Rys. 2. Przykładowy model wybranych strategii transmisji

Oznaczając wzmocnienie kanału między nadajnikiem  $i$  oraz odbiornikiem  $j$  na podnośnej  $s$  jako  $|h_{i,j}^{(s)}|^2$  ( $h_{i,j}^{(s)} \in \mathbb{C}$ ), a także moc szumu w odbiorniku jako  $\sigma^2$ , można wyznaczyć stosunek mocy sygnału odbieranego do szumu i interferencji (SINR – ang. *signal to interference and noise ratio*) jako:

$$\gamma_{i,j}^{(s)} = \frac{|h_{i,j}^{(s)}|^2 p_i^{(s)}}{\sigma^2 + \sum_{l \in (M \cup K) \setminus i} |h_{l,j}^{(s)}|^2 p_l^{(s)}}, \quad (1)$$

gdzie  $p_i^{(s)}$  to moc sygnału nadawanego przez  $i$  na podnośnej  $s$ .

W rozważanym systemie każda ze stacji bazowych dąży do maksymalizacji łącznej przepływności w komórce jednocześnie starając się zminimalizować koszt w postaci obniżenia przepływności innych stacji bazowych z powodu wprowadzonej interferencji. Łączną przepływność BS  $i$  można wyznaczyć korzystając z zależności:

$$R_i(\alpha_i, \alpha_{-i}) = \sum_{j \in J_i} \sum_{s=1}^S \Psi(\gamma_{i,j}^{(s)}) 1_{j,s}, \quad (2)$$

gdzie  $\Psi(x)$  oznacza przepływność wyznaczoną ze wzoru Shannona z ograniczeniami [6] dla wartości SINR wynoszącej  $x$ , a  $1_{j,s}$  wynosi 1 jeżeli transmisja do UE  $j$  odbywa się z wykorzystaniem podnośnej  $s$  lub 0 w przeciwnym razie. Każda ze stacji bazowych wybiera akcję (strategię)  $\alpha_i$ , co odpowiada wyborowi jednego z dwóch poziomów mocy w poszczególnych blokach zasobów czasowo-częstotliwościowych, co zobrazowano na Rys. 2. Każda ze stacji bazowych może wybrać jedną z akcji (strategii) ze zbioru  $A$  o liczności  $N$ . Oznaczając zbiór akcji wybranych przez wszystkie stacje bazowe poza  $i$  jako  $\alpha_{-i}$ , zbiór strategii wszystkich stacji bazowych można opisać jako  $\alpha = \{\alpha_i \cup \alpha_{-i}\}$ . W celu optymalizacji wyboru akcji i maksymalizacji łącznego zysku systemu (a więc łącznej przepływności) można zastosować mechanizm aukcji Vickrey'a-Clarke'a-Groves'a (VCG), w którym każda ze stacji bazowych dąży do maksymalizacji wartości użyteczności  $U_i$  określonej wzorem:

$$U_i(\alpha_i, \alpha_{-i}) = R_i(\alpha_i, \alpha_{-i}) - \zeta_i(\alpha_i, \alpha_{-i}), \quad (3)$$

gdzie  $\zeta_i$  oznacza koszt (obniżenie przepływności) wszystkich stacji bazowych poza  $i$ , spowodowany działaniem BS  $i$ . Wartość kosztu dla każdego  $i$  można wyznaczyć korzystając z zależności:

$$\zeta_i(\alpha_i, \alpha_{-i}) = \sum_{l \neq i} R_l(\alpha_l, \{\alpha_{-l} - \alpha_i\}) - \sum_{l \neq i} R_l(\alpha_l, \alpha_{-l}), \quad (4)$$

gdzie  $R_l(\alpha_l, \{\alpha_{-l} - \alpha_i\})$  to przepływność stacji bazowej  $l$  w sytuacji gdy stacja bazowa  $i$  nie nadaje, natomiast  $R_l(\alpha_l, \alpha_{-l})$  to przepływność stacji bazowej  $l$  gdy stacja bazowa  $i$  korzysta ze strategii  $\alpha_i$ .

## 2.2. Definicja gry

Jednym z możliwych sposobów rozwiązania przedstawionego powyżej problemu optymalizacyjnego jest zastosowanie teorii gier. Opisany problem minimalizacji interferencji międzykomórkowej można przedstawić jako grę w postaci normalnej korzystając z następującej zależności:

$$\mathbf{G} = (\{M \cup K\}, A, \{U_i\}_{i \in \{M \cup K\}}), \quad (5)$$

gdzie  $\{M \cup K\}$  to zbiór graczy (wszystkich stacji bazowych).

Stacja bazowa  $i$  w każdej chwili czasowej  $t$  dokonuje wyboru akcji (strategii) ze zbioru  $A$  zgodnie z rozkładem prawdopodobieństwa określonym poniższym równaniem:

$$\pi_i(t) = \left( \pi_i^{(\alpha_i^{(1)})}(t), \pi_i^{(\alpha_i^{(2)})}(t), \dots, \pi_i^{(\alpha_i^{(N)})}(t) \right), \quad (6)$$

gdzie  $\pi_i^{(\alpha_i^{(n)})}(t)$  oznacza prawdopodobieństwo wyboru akcji  $\alpha_i^{(n)}$  przez stację bazową  $i$  w chwili  $t$ . W związku z tym, że każda BS wybiera jedną z akcji  $\alpha_i^{(n)}$ ,  $1 \leq n \leq N$  i zbiór wszystkich strategii  $A$  jest dyskretny i skończony, można stwierdzić że istnieje przynajmniej jeden stan równowagi dla rozważanego problemu. Stacje bazowe dążąc do maksymalizacji własnego zysku  $U_i$  współpracują ze sobą, co w efekcie powinno pozwolić na osią-

gnięcie tzw. stanu równowagi korelacyjnej [7], zdefiniowanego następująco:

$$\sum_{\alpha_{-i} \in A} \pi_i(\alpha_i^*, \alpha_{-i})(U_i(\alpha_i^*, \alpha_{-i}) - U_i(\alpha_i', \alpha_{-i})) \geq 0 \quad (7)$$

$$\forall \alpha_i', \alpha_i^* \in A, \forall i \in \{M \cup K\}$$

Wartość  $\pi_i(\alpha_i^*, \alpha_{-i})$  oznacza prawdopodobieństwo wyboru akcji  $\alpha_i^*$  przez stację bazową  $i$  w przypadku gdy pozostałe stacje bazowe wybrały własne strategie  $\alpha_j, j \neq i$ . Nierówność (7) oznacza, że jeśli rekomendowaną akcją dla BS  $i$  jest  $\alpha_i^*$ , to wybór jakiegokolwiek innej strategii nie może zapewnić większego zysku tej stacji bazowej [1].

### 3. ALGORYTM UCZĄCY REGRET-MATCHING

W celu osiągnięcia stanu równowagi korelacyjnej, a więc rozwiązania przedstawionego problemu minimalizacji interferencji, można zastosować rozwiązania z programowania liniowego, np. algorytm Simplex [2]. Jednak wadą tego rozwiązania jest jego scentralizowany charakter oraz złożoność obliczeniowa. Dlatego alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie algorytmu uczącego regret-matching, który pozwala na osiągnięcie równowagi korelacyjnej w sposób iteracyjny [1, 2]. Zakładając że każda stacja bazowa korzysta z tych samych zasad procedury regret-matching możliwe jest osiągnięcie stanu równowagi korelacyjnej gdy czas optymalizacji (liczba iteracji) dąży do nieskończoności [8].

Zasada działania algorytmu regret-matching opiera się na minimalizacji tzw. żalu związanego z wyborem określonej akcji. Wartość żalu  $REG_i^{(T)}$  spowodowana wyborem strategii  $\alpha_i^{(n)}$  przez stację bazową  $i$  w chwili  $T$  można wyznaczyć ze wzoru:

$$REG_i^{(T)}(\alpha_i^{(n)}, \alpha_i^{(-n)}) = \max\{D_i^{(T)}(\alpha_i^{(n)}, \alpha_i^{(-n)}), 0\}, \quad (8)$$

gdzie

$$D_i^{(T)}(\alpha_i^{(n)}, \alpha_i^{(-n)}) = \max_{j \neq n} \frac{1}{T} \sum_{t \leq T} (U_i^t(\alpha_i^{(j)}, \alpha_{-i}) - U_i^t(\alpha_i^{(n)}, \alpha_{-i})), \quad (9)$$

gdzie  $U_i^t(\alpha_i^{(j)}, \alpha_{-i})$  oznacza użyteczność (zysk) stacji bazowej  $i$  w chwili  $t$  dla wybranej akcji  $\alpha_i^{(j)}$ .  $D_i^{(T)}(\alpha_i^{(n)}, \alpha_i^{(-n)})$  oznacza średni zysk stacji bazowej  $i$  jeśli wybrałaby ona w każdej poprzedniej chwili  $t$  inną strategię niż  $\alpha_i^{(n)}$ . Dlatego jeśli  $D_i^{(T)}(\alpha_i^{(n)}, \alpha_i^{(-n)}) > 0$  zysk BS  $i$  byłby większy gdyby wybrała inną akcję niż  $\alpha_i^{(n)}$ , natomiast jeśli  $D_i^{(T)}(\alpha_i^{(n)}, \alpha_i^{(-n)}) \leq 0$  żal stacji bazowej  $i$  jest zerowy, a strategia  $\alpha_i^{(n)}$  najlepszym możliwym wyborem.

Znając wartości współczynników żalu dla każdej z  $N$  akcji, można wyznaczyć prawdopodobieństwo wyboru  $n$ -tej strategii korzystając ze wzoru:

$$\pi_i^{(\alpha_i^{(n)})}(T) = 1 - \frac{1}{\mu^{(T-1)}} REG_i^{(T-1)}(\alpha_i^{(n)}, \alpha_i^{(-n)}), \quad (10)$$

gdzie:

$$\mu^{(T-1)} = \frac{\sum_n REG_i^{(T-1)}(\alpha_i^{(n)}, \alpha_i^{(-n)})}{N-1}, \quad (11)$$

Zastosowanie algorytmu regret-matching pozwala osiągnąć stan równowagi korelacyjnej w sposób iteracyjny i rozproszony, tzn. wybór akcji przez każdą ze stacji bazowych jest dokonywany samodzielnie. Jednak dla podanej definicji zysku i procedury optymalizacji niezbędna jest znajomość w każdej BS strategii wybranych poprzednio przez pozostałe stacje bazowe, a także oczekiwanych wartości zysku dla poszczególnych strategii (lub przynajmniej znajomości charakterystyki kanałów transmisyjnych oraz interferencji). W praktycznym systemie komórkowym zapewnienie dostępności tych informacji i ich częsta aktualizacja są bardzo trudne, dlatego rozważane są dwa następujące podejścia:

- Optymalizacja ma charakter długoterminowy, tzn. wybór akcji przez stacje bazowe odbywa się co kilkadziesiąt ramek (kilkadziesiąt lub kilkaset milisekund), a iteracyjna procedura ucząca regret-matching jest realizowana poza działaniem systemu (tzw. optymalizacja offline).
- Działanie algorytmu regret-matching i decyzje podejmowane w kolejnych iteracjach są bezpośrednio wykorzystywane w działaniu systemu, a kolejne iteracje wykonywane są np. co ramkę danych (10 ms w przypadku LTE). W tym przypadku ewentualne stany niestabilności (w trakcie dążenia do osiągnięcia równowagi korelacyjnej) mogą powodować obniżenie łącznej przepływności systemu, jednak pozwala to na szybsze reagowanie na zmiany charakterystyki kanału.

Założono, że stacje bazowe okresowo wymieniają informacje o wyborze strategii oraz o charakterystyce kanałów transmisyjnych i interferencji. Dodatkowo, aby zmniejszyć liczbę niezbędnych obliczeń, szczególnie w przypadku optymalizacji offline, rozważono dwa warianty uproszczenia obliczeń zysku stacji bazowych:

- Przepływność stacji bazowej jest wyznaczana jako średnia przepływność użytkowników w całym paśmie (zakładając że każdy z użytkowników korzysta z wszystkich bloków zasobów), zgodnie z równaniem:

$$R_i = \frac{1}{|J_i|} \sum_{j \in J_i} \sum_{s=1}^S \Psi(\gamma_{i,j}^{(s)}). \quad (12)$$

- Koszt  $\zeta_i$  pozostałych stacji bazowych jest wyznaczany na podstawie spadku przepływności użytkowników doświadczających najsilniejszej interferencji od stacji bazowej  $i$ .

## 4. BADANIA SYMULACYJNE

### 4.1. Założenia symulacyjne

W celu zbadania wpływu zaproponowanego rozwiązania na osiągnięte przepływności przeprowadzono badania symulacyjne typu Monte Carlo systemu komórkowego o konfiguracji wzorowanej na LTE-Advanced. W rozważanym obszarze obserwacji znajdowało się 9 stacji bazowych makro (skupionych w trzech punktach geograficznych) i 11 stacji bazowych typu piko, co przedstawiono na Rys. 1. Założono, że oba typy stacji bazowych wykorzystują te same

częstotliwości środkowe: 1,8 GHz dla transmisji w górę i 2,6 GHz dla transmisji w dół. Szerokość pasma transmisyjnego dla obu kierunków transmisji wynosiła 10 MHz. Parametrem symulacji była łączna liczba użytkowników w systemie dobierana jako jedna z wartości ze zbioru {100, 150, 200, 250, 300}, przy czym rozmieszczenie użytkowników było deterministyczne: 90% użytkowników w okolicach stacji bazowych piko (ciemniejszy obszar na Rys. 1) i 10% w pozostałym obszarze. Założono maksymalne moce nadawcze:

- stacji bazowej makro: 46 dBm,
- stacji bazowej piko: 24 dBm,
- użytkownika: 24 dBm.

Rozważany model propagacyjny w symulacji był wzorowany na modelu przedstawionym w specyfikacji ITU-T dla IMT-Advanced [9], z uwzględnieniem tłumienia ścieżki, przesłaniania (ang. *shadowing*) oraz uproszczonego modelu zaników selektywnych w częstotliwości. Założono, że użytkownicy są nieruchomi, a charakterystyka kanału nie zmienia się w trakcie pojedynczego przebiegu symulacyjnego (100 ms). Rozważano jedynie transmisję typu SISO, a więc z jedną anteną nadawczą i jedną anteną odbiorczą.

W niniejszej pracy przebadano proponowane rozwiązanie wykorzystujące równowagę korelacyjną w czterech konfiguracjach:

- optymalizacja offline wykorzystująca wyznaczenie przepływności na podstawie przepływności użytkowników w całym paśmie – oznaczona dalej jako  $CE1_o$
- optymalizacja offline wykorzystująca uproszczone obliczanie kosztu pozostałych stacji bazowych (tylko dla użytkowników doświadczających najsilniejszej interferencji) – oznaczona dalej jako  $CE2_o$
- optymalizacja z bezpośrednim zastosowaniem decyzji podejmowanych w kolejnych iteracjach algorytmu regret-matching i obliczaniem przepływności na podstawie przepływności użytkowników w całym paśmie – oznaczona dalej jako  $CE1_i$
- optymalizacja z bezpośrednim zastosowaniem decyzji podejmowanych w kolejnych iteracjach algorytmu regret-matching i uproszczonym obliczaniem kosztu pozostałych stacji bazowych – oznaczona dalej jako  $CE2_i$

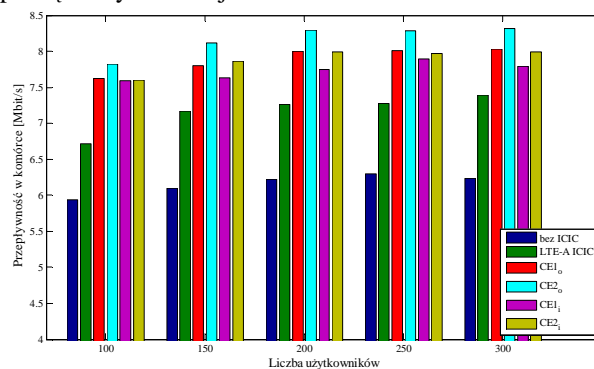
Otrzymane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi dla systemu bez mechanizmów usuwania interferencji międzykomórkowej (oznaczony jako *bez ICIC*) oraz systemu stosującego zaproponowaną dla systemu LTE-Advanced metodę minimalizacji interferencji wykorzystującą tzw. prawie puste podramki (ABS – ang. *almost blank subframes*) – oznaczoną dalej jako *LTE-A ICIC*. Dla metody *LTE-A ICIC* założono występowanie do dwóch podramek ABS w ramce danych.

Porównanymi wartościami były:

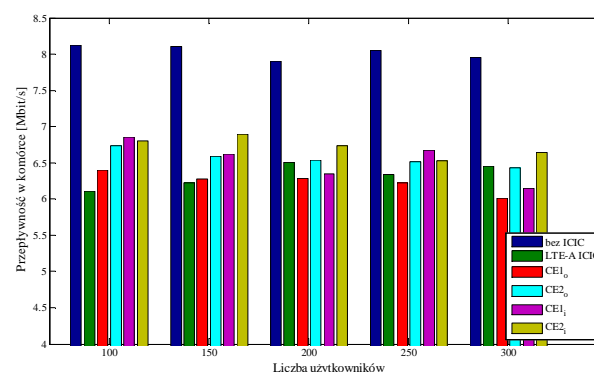
- średnia łączna przepływność w komórce,
- średnia łączna przepływność w komórce makro,
- średnia łączna przepływność w komórce piko,
- dystrybuanta przepływności użytkowników

## 4.2. Wyniki symulacji dla transmisji w dół

Na Rys. 3 przedstawiono porównanie średniej łącznej przepływności uzyskanej dla wszystkich rodzajów komórek w zależności od liczby użytkowników w systemie. Można zauważyć, że zastosowanie metod minimalizacji interferencji powoduje znaczący wzrost uzyskiwanych przepływności. W przypadku wykorzystania techniki zaproponowanej dla LTE-Advanced jest to zysk wynoszący ok. 1 Mbit/s (ok. 15%). Z kolei zastosowanie metod wykorzystujących równowagę skorelowaną i algorytm regret-matching pozwala na jeszcze większy wzrost przepływności, wynoszący nawet ponad 2 Mbit/s (ok. 30%). Zysk  $CE$  w odniesieniu do metody zaproponowanej dla LTE-Advanced wynosi natomiast do 15%. Spośród różnych zaproponowanych konfiguracji najlepsze rezultaty uzyskano dla  $CE2_o$ , a więc optymalizacji offline z uproszczoną metodą wyznaczania kosztu pozostałych stacji bazowych. Z kolei użycie optymalizacji z bezpośrednim zastosowaniem decyzji podejmowanych w kolejnych iteracjach ( $CE1_i$  oraz  $CE2_i$ ) zapewnia nieco niższe przepływności (różnice poniżej 0,5 Mbit/s) niż  $CE2_o$ , co spowodowane jest niestabilnością algorytmu w początkowych iteracjach.

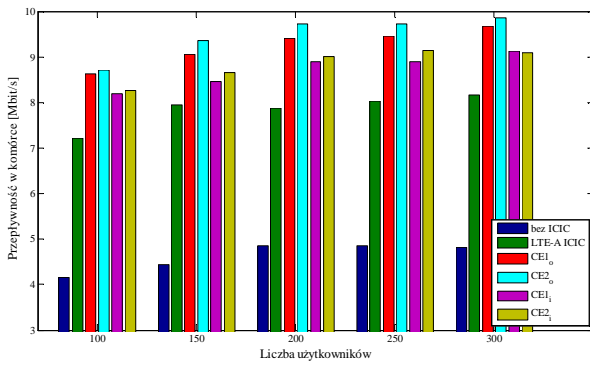


Rys. 3. Średnia łączna przepływność w komórce



Rys. 4. Średnia łączna przepływność w komórce makro

Kolejną badaną wartością była średnia łączna przepływność w komórce typu makro, której porównanie przedstawiono na Rys. 4. Można zauważyć, że zastosowanie metod minimalizacji interferencji powoduje znaczne obniżenie średniej przepływności w komórce makro. Co ciekawe, spadek przepływności jest bardzo podobny zarówno w przypadku metody zaproponowanej dla LTE-Advanced, jak i metod wykorzystujących równowagę korelacyjną.



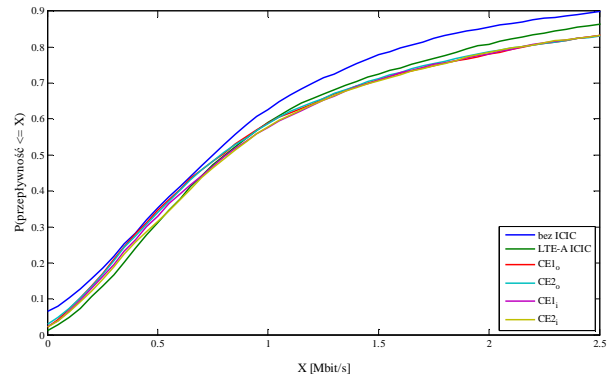
Rys. 5. Średnia łączna przepływność w komórce piko

Ciekawe wnioski nasuwa analiza porównania średniej łącznej przepływności w komórkach typu piko, przedstawionego na Rys. 5. Okazuje się, że dominujący wpływ na całkowitą przepływność w systemie mają użytkownicy znajdujący się w małych komórkach, gdyż zysk z zastosowania metod minimalizacji interferencji jest tutaj bardzo duży i wynosi ok. 3-5 Mbit/s (nawet ponad 100%). Można więc stwierdzić, że w przypadku transmisji w dół największy wpływ interferencji można zaobserwować w małych komórkach. Zastosowanie metod minimalizacji interferencji polegających na efektywnym wykorzystaniu zasobów czasowo-częstotliwościowych powoduje, że kosztem zmniejszenia przepływności w komórkach makro można poprawić całkowitą łączną przepływność w systemie. Dodatkowo można stwierdzić, że zastosowanie proponowanych metod wykorzystujących równowagę korelacyjną daje wyraźnie lepsze rezultaty niż metoda zaproponowana dla LTE-Advanced.

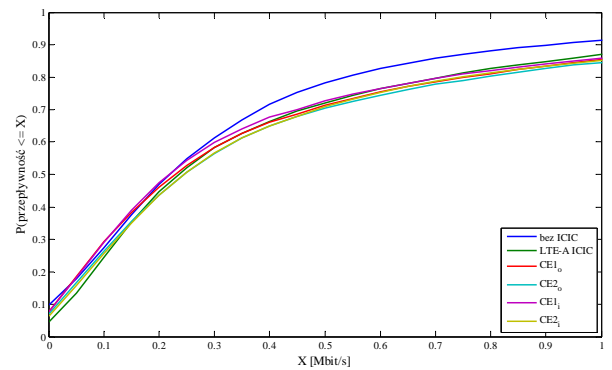
Badane rozwiązania porównano również analizując dystrybuantę przepływności użytkowników uzyskaną dla 100 (na Rys. 6) i 300 (na Rys. 7) aktywnych terminali rozmieszczonych w obszarze obserwacji. Można stwierdzić, że dla mniejszego zagęszczenia użytkowników (100 terminali) metody wykorzystujące równowagę korelacyjną pozwalają użytkownikom na osiąganie większych przepływności niż w przypadku zastosowania rozwiązania z ABS zaproponowanego dla LTE-Advanced. Z kolei w przypadku dużego zagęszczenia użytkowników (300 terminali) wszystkie metody minimalizacji interferencji dają podobne wyniki, co świadczy o fakcie, że małe przepływności użytkowników spowodowane są zbyt dużym obciążeniem stacji bazowych (brak wystarczających zasobów do zapewnienia odpowiednich warunków transmisyjnych użytkownikom).

Podsumowując, w przypadku rozważania transmisji w dół zastosowanie metod wykorzystujących równowagę skorelowaną daje najlepsze rezultaty, zapewniając łączny zysk przepływności rzędu 30% w odniesieniu do systemu bez minimalizacji interferencji oraz zysk wynoszący do 15% w odniesieniu do systemu z rozwiązaniem zaproponowanym dla LTE-Advanced. Na podstawie analizy dystrybuanty przepływności użytkowników można stwierdzić, że w przypadku dużej liczby użytkowników obsługiwanych przez jedną stację bazową, metody minimalizacji interferencji nie mają wielkiego wpływu na poprawę przepływności części użytkowników, co spowodowane jest zbyt małą dostępnością zasobów radiowych. Rozwiązaniem w tym przypadku może

być wprowadzenie jeszcze większej liczby małych stacji bazowych, co jednak skutkuje wzrostem interferencji.



Rys. 6. Dystrybuanta przepływności użytkowników dla 100 aktywnych terminali w obszarze obserwacji



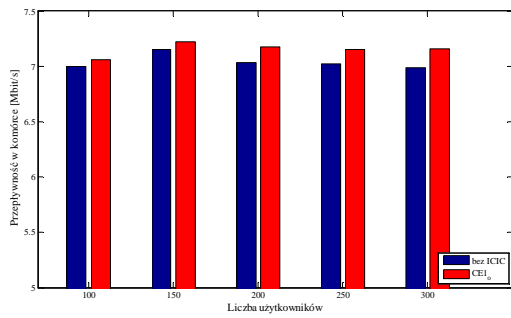
Rys. 7. Dystrybuanta przepływności użytkowników dla 300 aktywnych terminali w obszarze obserwacji

### 4.3. Wyniki symulacji dla transmisji w górę

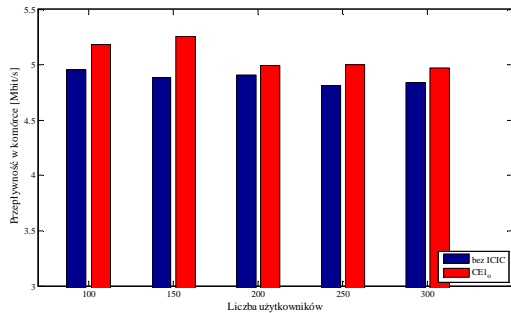
Podobną analizę jak w podrozdziale 4.2 przeprowadzono dla transmisji w górę, jednak przy prezentacji wyników ograniczono się do porównania systemu bez minimalizacji interferencji i systemu z rozwiązaniem CE1<sub>o</sub>, ze względu na bardzo zbliżone wyniki otrzymane dla wszystkich rozwiązań minimalizacji interferencji.

Na Rys. 8, Rys. 9 i Rys. 10 przedstawiono kolejno: średnią łączną przepływność w komórce, średnią łączną przepływność w komórce makro i średnią łączną przepływność w komórce piko.

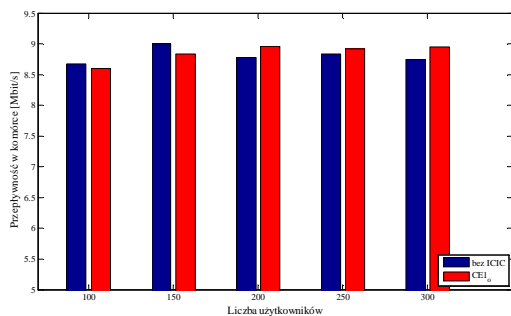
Można stwierdzić, że wpływ interferencji na otrzymywane przepływności jest znikomy, a zysk wynikający z zastosowania metod minimalizacji interferencji - pomijalny. Spowodowane jest to zastosowaniem mechanizmu sterowania mocą nadawczą w przypadku transmisji w górę, co powoduje, że metody minimalizacji interferencji polegające na redukcji mocy w wybranych fragmentach zasobów czasowo-częstotliwościowych nie dają żadnych rezultatów. Jedynie na Rys. 9 można zauważyć niewielki zysk przepływności w komórce typu makro dla małej liczby użytkowników w obszarze obserwacji (100 i 150 użytkowników).



Rys. 8. Średnia łączna przepływność w komórce dla transmisji w górę



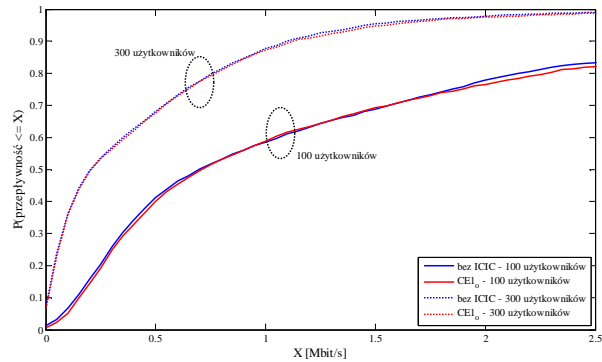
Rys. 9. Średnia łączna przepływność w komórce makro dla transmisji w górę



Rys. 10. Średnia łączna przepływność w komórce piko dla transmisji w górę

Rys. 11 przedstawia dystrybucję przepływności użytkowników w dwóch przypadkach: dla 100 i 300 terminali aktywnych w obszarze obserwacji. W obu przypadkach nie zaobserwowano zysku przepływności wynikającego z zastosowania metod minimalizacji interferencji.

Podsumowując, w przypadku transmisji w górę metody minimalizacji interferencji polegające na efektywnym wykorzystaniu dostępnych zasobów czasowo-częstotliwościowych nie dają poprawy przepływności osiąganych w systemie ze względu na zastosowanie pętli kontroli mocy. Dlatego ewentualnym rozwiązaniem w tym przypadku może być zastosowanie technik bazujących na optymalizacji innych parametrów (np. tworzeniu grup użytkowników uprawnionych do transmisji w danej chwili).



Rys. 11. Dystrybuanta przepływności użytkowników dla transmisji w górę

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule omówiono problem długookresowej minimalizacji interferencji w wielowarstwowym systemie komórkowym. Zaproponowano rozwiązanie wykorzystujące zagadnienia z teorii gier, w tym pojęcie równowagi korelacyjnej oraz algorytm uczący regret-matching. Proponowana metoda jest rozwiązaniem zdecentralizowanym, a więc decyzje są podejmowane samodzielnie przez stacje bazowe. Należy jednak zauważyć, że w realizacji przedstawionego procesu optymalizacji niezbędna jest znajomość wcześniejszych decyzji innych stacji bazowych oraz charakterystyk wzmocnień kanałów i interferencji, co wymaga dostępności interfejsu umożliwiającego wymianę informacji między stacjami bazowymi. Zaproponowano szereg rozwiązań, których celem jest uproszczenie opisanej metody. Przedstawione wyniki symulacyjne pokazują, że zaproponowane rozwiązanie wykorzystujące równowagę korelacyjną i algorytm regret-matching pozwala na znaczny wzrost osiąganych przepływności w przypadku transmisji w dół. Ewentualny zysk przepływności wynosi do 30% w porównaniu z systemem bez minimalizacji interferencji oraz do 15% w odniesieniu do systemu stosującego rozwiązanie zaproponowane dla LTE-Advanced.

## PODZIĘKOWANIE

Niniejszą pracę zrealizowano w zakresie międzynarodowego projektu ICT-317669 METIS, częściowo finansowanego w ramach 7 Programu Ramowego Unii Europejskiej.

Redakcja artykułu została zrealizowana w ramach projektu działalności statutowej DS 138/2013 finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## SPIS LITERATURY

- [1] M. Charafeddine, Z. Han, A. Paulraj, and J. Cioffi, "Crystallized Rate Regions of the Interference Channel via Correlated Equilibrium with Interference as Noise", *IEEE ICC 2009*, Drezno, Niemcy, 14-18 czerwca 2009
- [2] A. Kliks, P. Sroka, M. Debbah, "Crystallized Rate Regions for MIMO Transmission", *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010

- [3] 3GPP TS 36.300, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description”, v. 11.3.0, wrzesień 2012
- [4] H. Li, “Multi-agent Q-Learning of Channel Selection in Multi-user Cognitive Radio Systems: A Two by Two Case”, *IEEE Conference on SYSTEM, Man and Cybernetics (SMC)*, 2009
- [5] LG Electronics, “3GPP TSG RAN WG1 Meeting #62 R1-104661 Comparison of Time-domain eICIC Solutions”, sierpień 2010
- [6] ETSI TR 136 942, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios (3GPP TR 36.942 wersja 10.2.0 Release 10)”, v. 10.2.0, maj 2011
- [7] R. J. Aumann, “Subjectivity and correlation in randomized strategy”, *Journal of Mathematical Economics*, tom 1, nr. 1, str. 67-96, 1974
- [8] S. Hart, A. Mas-Collel, “A simple adaptive procedure leading to correlated equilibrium”, *Econometrica*, tom 68, nr. 5, str. 1127-1150, wrzesień 2000
- [9] ITU-R M.2135, “Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced”, 2008