



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INFORMATYKI I TELEKOMUNIKACJI
Instytut Radiokomunikacji

Streszczenie rozprawy doktorskiej

**ENERGY-EFFICIENT RESOURCE ALLOCATION
IN OFDM SYSTEMS WITH COMPUTATIONAL AWARENESS**

**EFEKTYWNA ENERGETYCZNIE ALOKACJA ZASOBÓW
W SYSTEMACH OFDM ZE ŚWIADOMOŚCIĄ OBLICZENIOWĄ**

mgr inż. Bartosz Bossy

Promotor: prof. dr hab. inż. Hanna Bogucka
Promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Kryszkiewicz

POZNAŃ 2022

Wprowadzenie

W dobie wszechobecnego dostępu do Internetu z roku na rok można zaobserwować wykładniczy wzrost ruchu telekomunikacyjnego. Według prognoz Cisco w 2022 r. 4,8 miliarda użytkowników oraz 28,5 miliarda urządzeń będzie podłączonych do sieci Internet [1]. Ponadto ruch pochodzący z urządzeń mobilnych wzrośnie do 930 eksabajtów w 2022 roku. Zgodnie z raportem Ericsson Mobility Report [2], komunikacja 26,9 miliardów maszyn i urządzeń, które do 2026 roku mają stanowić Internet Rzeczy (IoT), będzie niespotykanym dotąd wyzwaniem. Jednym z problemów jest wzrost zużycia energii związany ze wzrostem ruchu telekomunikacyjnego na całym świecie. Właśnie dlatego komunikacja bezprzewodowa o zwiększonej efektywności energetycznej (EE) jest w ostatnich latach w centrum zainteresowania badań i przemysłu, dążąc do osiągnięcia 10-krotnie wyższej EE w systemach radiowych 5. generacji (5G) w porównaniu z systemami 4. generacji (4G) [3]. Co więcej, zmniejszenie ogólnego zużycia energii w sieci będzie krytycznym wymogiem dla tych przyszłych systemów bezprzewodowych.

Wraz z ukończeniem przez 3GPP wydania 15 [4] i wydania 16 [5], zdefiniowano podstawy systemu 5G. Podobnie jak w przypadku systemu czwartej generacji dla systemów 5G zaproponowano technikę OFDM (ang. Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Co więcej, OFDM jest również z powodzeniem stosowana w innych systemach komunikacji radiowej, takich jak WLANs (ang. Wireless Local Area Networks), WiMAX (ang. Worldwide Interoperability for Microwave Access) a także w DAB (ang. Digital Audio Broadcasting) oraz DVB-T (ang. Digital Video Broadcasting-Terrestrial). Popularność techniki OFDM wynika m.in. z wysokiej efektywności spektralnej (SE), elastyczności tzn. możliwości dostosowania parametrów do zmieniających się warunków kanału, odporności na interferencje międzysymbolową (ISI) i niskiej wrażliwości na błędy synchronizacji czasowej. Dodatkowo ang. Orthogonal Frequency Division Multiplexing może być wydajnie zaimplementowany przy użyciu szybkiej transformaty Fouriera (FFT) [6]. W przypadku OFDM wielodostęp może być zrealizowany w warstwie MAC (ang. Medium Access Control) z użyciem OFDMA (ang. Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

Motywowany powyższymi aspektami w rozprawie autor przedstawia swoje badania, które doprowadziły do zaproponowania nowych metod optymalizacji dla łącza i sieci bezprzewodowej OFDM/OFDMA. W przeciwieństwie do tradycyjnego podejścia np. maksymalizacji przepływności przy ograniczeniu na zużywaną moc albo minimalizacji mocy transmisji dla założonej docelowej przepływności, autor rozprawy koncentruje się na optymalizacji metryki efektywności energetycznej, definiowanej jako liczba pomyślnie przesłanych i odebranych bitów na dżul. Ponadto, autor rozprawy stosuje zaawansowane modele zużycia energii, uwzględniające moc zużywaną przez przetwarzanie sygnału w paśmie podstawowym. Ten składnik może mieć kluczowe znaczenie w przypadku komunikacji na niewielkie odległości, dla której moc zużywana na przetwarzanie sygnału może dominować nad mocą potrzebną do emisji sygnału.

Teza rozprawy oraz jej główne cele

Teza rozprawy doktorskiej jest następująca:

Można opracować nowe algorytmy, bardziej efektywne niż dotychczasowe, dla systemów opartych na OFDM/OFDMA, pozwalające na maksymalizację efektywności energetycznej z uwzględnieniem mocy zużywanej na przetwarzanie sygnału w paśmie podstawowym.

Głównym celem pracy jest zaproponowanie technik maksymalizujących EE, a w szczególności:

- Opracowanie efektywnego, nisko złożonego algorytmu maksymalizacji metryki efektywności energetycznej ze świadomością obliczeniową w łączu OFDM z adaptacyjnym doбором mocy

transmisji oraz wyborem modulacji i kodowania.

- Opracowanie algorytmu alokacji zasobów maksymalizującego EE w sieci OFDMA z wieloma użytkownikami, z uwzględnieniem ograniczeń praktycznych systemów komunikacji bezprzewodowej.
- Rozwiązanie problemu optymalizacji efektywności energetycznej dla sieci przekaźnikowej z wieloma użytkownikami oraz interferencją między nimi z uwzględnieniem mocy zużywanej na przetwarzanie sygnału w paśmie podstawowym.
- Zidentyfikowanie rekomendacji dla projektowania przyszłych wysoko wydajnych energetycznie systemów komunikacji bezprzewodowej.

Przydział zasobów maksymalizujący EE

W pierwszej części pracy autor przedstawił główne wyzwania i problemy przydziału zasobów w systemach komunikacji bezprzewodowej maksymalizujących metrykę efektywności energetycznej. W kontekście systemów bezprzewodowych efektywność energetyczna jest definiowana jako stosunek przepustowości osiąganey w systemie do całkowitej mocy zużywanej przez system:

$$\eta \left[\frac{\text{bit}}{\text{dżul}} \right] = \frac{\text{przepływność [bit/s]}}{\text{zużywana moc [W]}}. \quad (1)$$

Oznacza to, że efektywność energetyczna określa liczbę przesłanych bitów przypadających na jednostkę energii. Zatem im wyższa metryka EE tym rozpatrywany system jest bardziej wydajny energetycznie. W rozprawie autor identyfikuje różne podejścia do maksymalizacji EE oraz dokonuje klasyfikacji zadań jakie należy wykonać projektując algorytm alokacji zasobów maksymalizujący EE. Autor rozprawy wyodrębnił następujące zadania:

- (i) estymacja przepustowości,
- (ii) estymacja całkowitej zużywanej mocy w systemie,
- (iii) identyfikacja wymagań i ograniczeń systemowych,
- (iv) optymalizacja metryki efektywności energetycznej.

Dla każdego z powyższych zadań autor rozprawy zidentyfikował główne podejścia stosowane w literaturze, przedstawił ich główne wady i zalety oraz zaproponował kompromis między ich szczegółowością, a złożonością.

W kontekście estymacji przepustowości zidentyfikowano następujące podejścia:

- (i) estymacja z użyciem równania Shannona,
- (ii) estymacja z użyciem równania Shannona zmodyfikowanym przez współczynniki skalujące,
- (iii) estymacja z użyciem funkcji błędu i wydajności widmowej dla danego schematu modulacji i kodowania schematu modulacji i kodowania (MCS).

W przypadku estymacji całkowitej mocy zużywanej w systemie zidentyfikowano następujące podejścia:

- (i) wysokopoziomowy model zużycia mocy,
- (ii) estymacja mocy bazująca na pomiarach,

(iii) estymacja mocy jako sumy mocy zużywanej przez każdy komponent nadajnik i odbiornika.

Należy pamiętać, że dla bardziej szczegółowych modeli (np. z większą liczbą parametrów) problem optymalizacyjny maksymalizujący EE może być trudniejszy do rozwiązania co przekłada się na złożoność obliczeniową algorytmu alokacji zasobów. W kontekście identyfikacji wymagań i ograniczeń systemowych autor rozprawy zidentyfikował najczęściej spotykane wymagania i ograniczenia rozważane w kontekście alokacji zasobów maksymalizujących efektywność energetyczną. Ponadto, w rozprawie dokonano przeglądu oraz porównania metod optymalizacyjnych stosowanych w celu maksymalizacji efektywności energetycznej zwracając uwagę na ich wady i zalety.

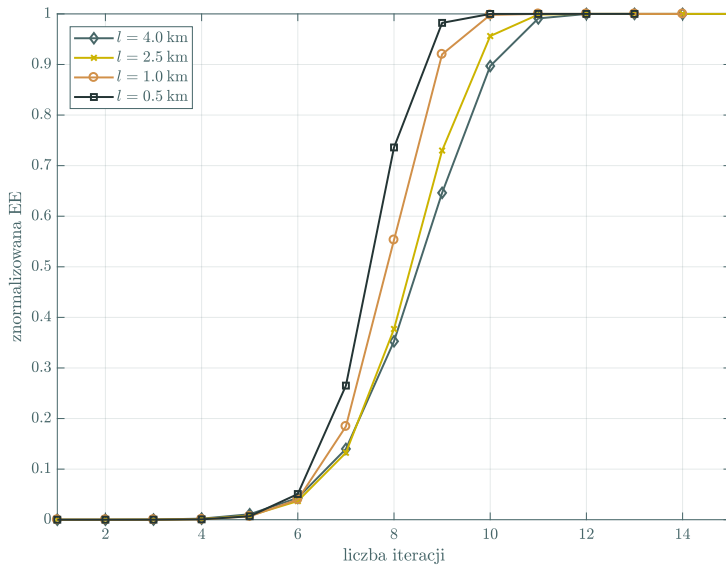
Optymalizacja EE w łączy OFDM

Kolejna część rozprawy dotyczy optymalizacji efektywności energetycznej w łączy OFDM. Zidentyfikowane w pierwszej części rozprawy zadania oraz podejścia zostały uszczegółowione w kontekście pojedynczego łącza. Ponadto, autor rozprawy zaproponował algorytm alokacji zasobów maksymalizujący efektywność energetyczną dla łącza OFDM z adaptacyjnym dobrem mocy transmisji oraz schematu modulacji i kodowania [7]. W odróżnieniu od rozwiązań dostępnych w literaturze [8]–[13] autor rozprawy w swoim modelu uwzględnił moc zużywaną na przetwarzanie sygnału w paśmie podstawowym zależne od wybranego schematu modulacji i kodowania, który jest dobierany adaptacyjnie w zależności od warunków radiowych oraz wymagań użytkownika np. bitowej stopy błędów. Ponadto, rozważany system jest ograniczony przez maksymalną moc transmisji dostępną w nadajniku.

Dla opisanego powyżej modelu systemu zdefiniowany problem optymalizacyjny, który sprowadza się do znalezienia takich wartości mocy transmisji oraz schematów modulacji i kodowania alokowanych na podnośne, które maksymalizują metrykę efektywności energetycznej przy ograniczeniu na całkowitą maksymalną moc transmisji oraz minimalną osiąganą bitową stopę błędów. Ponieważ metryka efektywności energetycznej ma postać ułamkową, dlatego też problem optymalizacyjny jest z natury niewypukły [14]. Dodatkowo, należy pamiętać, że w opisywanym problemie optymalizacyjnym mamy do czynienia z ciągłymi zmiennymi określającymi moc transmitowaną na podnośnych oraz ze zmiennymi dyskretnymi opisującymi parametry stosowanych koderów oraz dekoderów. Tak zdefiniowane problemy optymalizacyjne noszą nazwę ciąгло-dyskretnych nieliniowych problemów optymalizacyjnych (ang. Mixed-Integer Nonlinear Programming – MINLP), które są bardzo trudne do rozwiązania w oryginalnej postaci. Dlatego też autor rozprawy dokonał przekształcenia oryginalnego problemu optymalizacyjnego, a następnie zaproponował algorytm alokacji zasobów o niskiej złożoności obliczeniowej maksymalizujący EE.

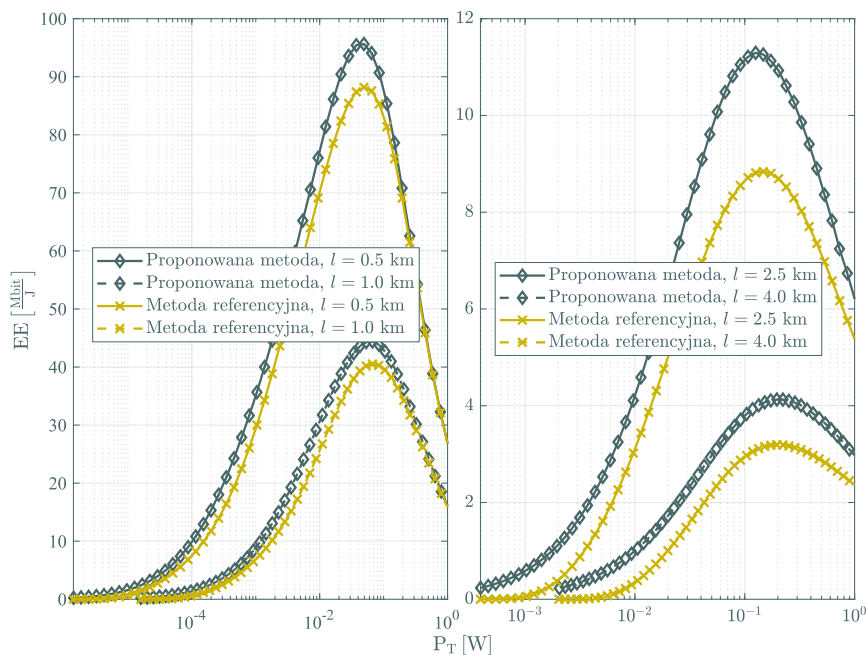
Oryginalny problem optymalizacyjny został przekształcony poprzez zastosowanie metody Dinkelbacha [14], która pozwala na transformację niewypukłej funkcji celu do sumy funkcji wypukłych z dodatkowym parametrem. Dodatkowo została wprowadzona macierz decyzyjna pozwalająca w efektywny sposób wybrać optymalny schemat modulacji i kodowania. Dla tak przekształconego problemu optymalizacyjnego autor wyznaczył analityczne wzory na obliczenie wartości mocy alokowanej na podnośne oraz schematu modulacji i kodowania używając funkcji Lagrange oraz warunków KKT (Karush-Kuhn-Tucker). Łącząc powyższe elementy autor rozprawy zaproponował algorytm alokacji zasobów oparty na algorytmie Dinkelbacha, o niskiej złożoności obliczeniowej. Został on zweryfikowany przez symulację komputerową.

Na rysunku 1 przedstawiono znormalizowaną efektywność energetyczną w funkcji liczby iteracji dla zaproponowanego w rozprawie algorytmu maksymalizacji efektywności energetycznej dla różnych odległości między nadajnikiem a odbiornikiem l . Zaprezentowany przykład numeryczny



RYSUNEK 1: Liczba iteracji w funkcji znormalizowanej EE.

pokazuje, że dla wszystkich rozważanych przypadków algorytm jest zbieżny w 12 iteracjach. Efektywność energetyczna w funkcji całkowitej mocy transmisji dla różnych odległości między nadajnikiem, a odbiornikiem l została przedstawiona na rysunku 2. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem proponowanego algorytmu zostały porównane z metodą referencyjną, która maksymalizuje przepustowość alokując moc zgodnie z zasadą „wypełniania wodą”, a następnie w zależności od wartości stosunku sygnału do szumu wybiera odpowiedni schemat modulacji i kodowania. Wyniki symulacji pokazują, że proponowany algorytm pozwala na zwiększenie EE w porównaniu do metody referencyjnej. Ponadto, można zauważyć, że istnieje optymalny punkt dla mocy nadawania maksymalizujący EE. Zysk w EE proponowanego rozwiązania w porównaniu z metodą referencyjną wynosi od 10% do 15% w zależności od scenariusza, co może skutkować zmniejszeniem zużycia energii w systemach komunikacji bezprzewodowej OFDM.



RYSUNEK 2: Efektywność energetyczna w funkcji całkowitej mocy transmisji.

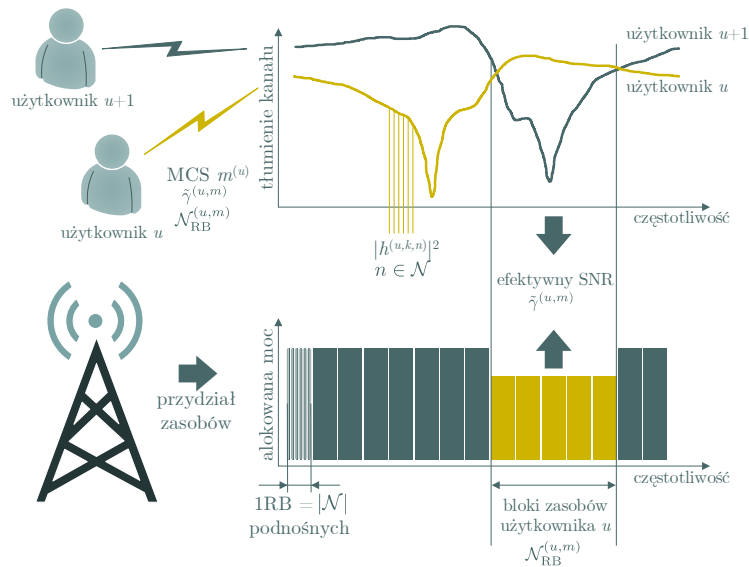
Efektywność energetyczna dla sieci OFDMA

Kolejnym etapem badań była optymalizacja efektywności energetycznej dla sieci urządzeń używającej techniki OFDMA. Najpierw zidentyfikowano różne sposoby maksymalizacji efektywności energetycznej sieci OFDMA oraz uszczegółowiono zadania z pierwszej części rozprawy. Ponadto, autor rozprawy zaproponował algorytm przydziału zasobów dla sieci OFDMA z wieloma użytkownikami [15]. W przeciwieństwie do istniejących prac [16]–[20] autor rozprawy w swoim modelu uwzględnił ograniczenia praktycznych systemów bezprzewodowych, w których:

- (i) podnośne są grupowane w bloki zasobów (ang. resource block - RB),
- (ii) wszystkie bloki zasobów przypisane do użytkownika są transmitowane z tą samą mocą używając tego samego schematu modulacji i kodowania,
- (iii) przepustowość wynika z blokowej stopy błędów oraz efektywności widmowej zastosowanego schematu modulacji i kodowania.

Ponieważ każdy blok zasobów składa się z pewnej liczby sąsiadujących podnośnych charakteryzujących się różnymi wartościami tłumienia, konieczna jest metoda wyznaczająca efektywną wartość stosunku sygnału do szumu dla całego zbioru podnośnych zaalokowanych dla danego użytkownika. Ponadto, w celu wyznaczenia przepustowości wymagana jest estymacja blokowej stopy błędów dla każdego dostępnego w systemie schematu modulacji i kodowania. Model rozważanego systemu przedstawiono na rysunku 3, gdzie $\tilde{\gamma}^{(u,m)}$ oraz $\mathcal{N}_{\text{RB}}^{u,m}$ oznaczają wartość efektywnego stosunku sygnału do szumu (ang. Signal to Noise ratio - SNR) i zbiór bloków zasobów przypisanych dla użytkownika u korzystającego ze schematu modulacji i kodowania m , podczas gdy $h^{(u,k,n)}$ określa charakterystykę kanału dla użytkownika u na podnośnej n w k -tym RB. Ponadto, można zauważyć, że pojedynczy blok zasobów składa się $|\mathcal{N}|$ podnośnych.

Biorąc pod uwagę cechy opisanego powyżej modelu systemu okazują się, że zdefiniowany dla niego problem optymalizacyjny maksymalizujący EE nie tylko jest niewypukłym ciągiem-dyskretnym problemem optymalizacyjnym, ale również problemem kombinatorycznym. Poza ciągłymi zmiennymi określającymi efektywny SNR mamy do czynienia ze skończonym zbiorem schematów mo-

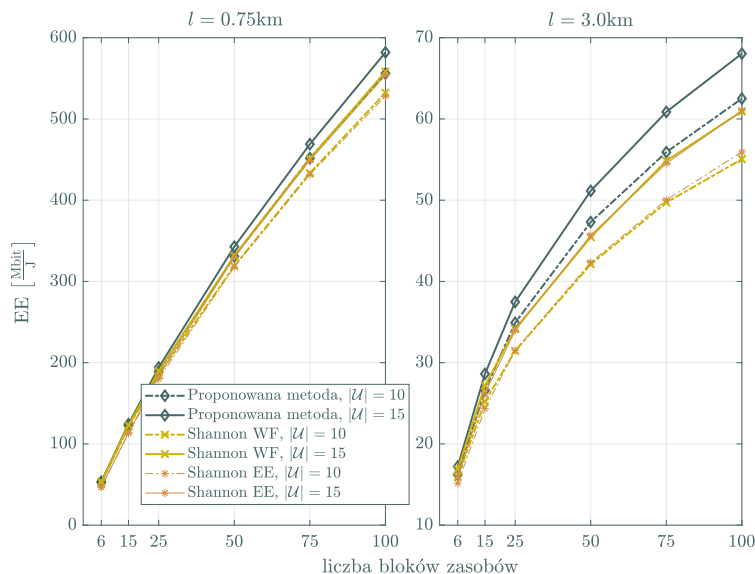


RYСУNEK 3: Przykład alokacji zasobów dla rozważanego modelu systemu z adaptacyjną alokacją mocy, bloków zasobów oraz wyborem schematu modulacji i kodowania.

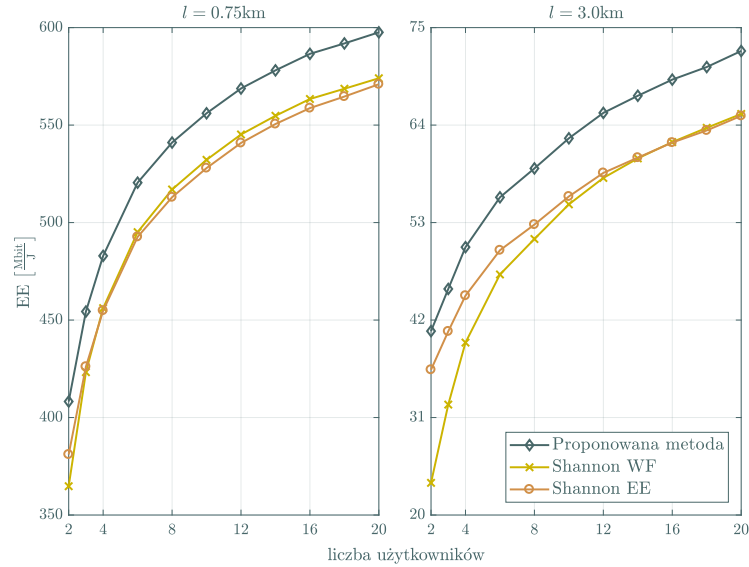
dulacji i kodowania oraz binarnymi zmiennymi określającymi czy blok zasobów jest przypisany do danego użytkownika czy nie. W związku z powyższym oryginalny problem optymalizacyjny został przekształcony poprzez wprowadzenie macierzy decyzyjnej oraz zastosowanie metody Dinkelbacha. Zaproponowano dwuetapowy, iteracyjny algorytm alokacji zasobów. Ze względu na dużą liczbę wszystkich możliwych kombinacji schematów modulacji i kodowania w każdej iteracji proponowanego algorytmu, każdy użytkownik zmienia swój MCS przy założeniu, że pozostali użytkownicy nie zmieniają swoich schematów modulacji i kodowania. Po przeanalizowaniu wszystkich schematów modulacji i kodowania dla wszystkich użytkowników wybierana jest para użytkownik-schemat modulacji i kodowania, która powoduje największy wzrost efektywności energetycznej. Procedura ta jest powtarzana aż do osiągnięcia zbieżności.

Zaproponowany w rozprawie algorytm został zweryfikowany za pomocą symulacji komputerowej i porównany z metodami referencyjnymi. Analizowany system składał się z $|\mathcal{M}| = 15$ schematów MCS zdefiniowanych w specyfikacji systemu LTE (ang. Long-Term Evolution), podobnie jak całkowita liczba bloków zasobów należąca do zbioru $|\mathcal{N}_{\text{RB}}| \in \{6, 15, 25, 50, 75, 100\}$ oraz $|\mathcal{N}| = 12$ podnośnych w każdym RB. Przyjęty model kanału to Extended Pedestrian A [21]. Pierwszy algorytm referencyjny, nazwany jako *Shannon EE*, z którym porównano opisywaną metodą, bazuje na pracy [22] i został zaadaptowany, tak aby liczba stopni swobody była identyczna jak w proponowanej metodzie. Drugi algorytm odniesienia, nazwany *Shannon WF*, bazuje na znanej zasadzie "wypełniania wodą". Oba algorytmy referencyjne alokują moc dla poszczególnych użytkowników, w pierwszym przypadku w celu maksymalizacji EE, w drugim w celu maksymalizacji przepływności, lecz nie uwzględniają doboru schematów MCS. Dlatego też schemat MCS jest dobierany na podstawie wartości efektywnego SNR.

Rysunek 4 przedstawia EE dla proponowanej metody w odniesieniu do metod referencyjnych w funkcji liczby dostępnych bloków zasobów dla dwóch promieni komórki l oraz różnej liczby użytkowników $|\mathcal{U}|$ w sieci. Można zaobserwować, że dla wszystkich przypadków proponowana przez autora rozprawy metoda osiąga wyższe wartości EE. Dodatkowo, EE rośnie wraz z liczbą dostępnych bloków zasobów. Podobne zjawisko obserwujemy dla większej liczby użytkowników, co wynika z zysku dywersyfikacji systemu z wieloma użytkownikami. Rysunek 5 pokazuje EE w funkcji liczby użytkowników w systemie. Zauważalne jest, że proponowane rozwiązanie osiąga lepsze rezultaty niż metody referencyjne oraz, że EE rośnie wraz z liczbą użytkowników.



RYSUNEK 4: Efektywność energetyczna w funkcji liczby dostępnych bloków zasobów dla różnych promieni komórki l .

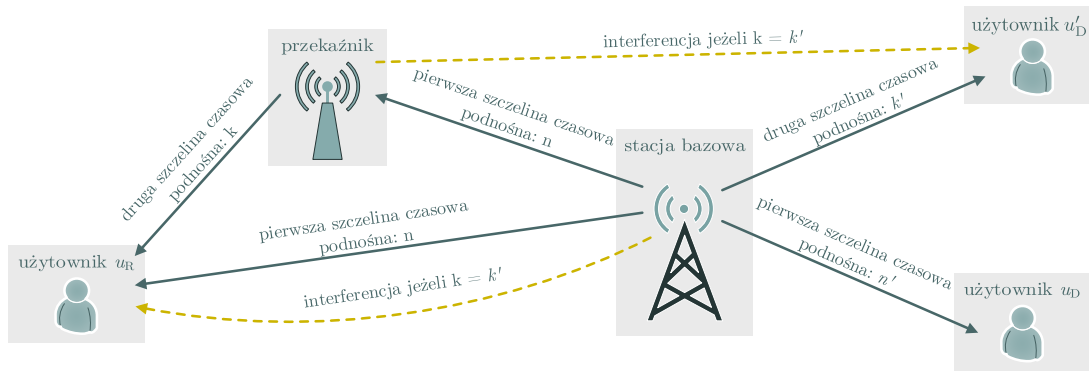


RYСУNEK 5: Efektywność energetyczna w funkcji liczby użytkowników w sieci dla różnych promieni komórki l .

Optymalizacja EE w sieci OFDMA z przekaźnikami

Kolejna część pracy dotyczy zastosowania węzłów przekaźnikowych w sieci OFDMA w celu zwiększenia efektywności energetycznej transmisji. W kontekście efektywności energetycznej zastosowanie przekaźników pozwala na zmniejszenie długości łączy, a co za tym idzie zmniejszenie zużywanej mocy dzięki niższej mocy transmisji lub zastosowaniu mniej złożonego obliczeniowo kodowania kanałowego. Z drugiej jednak strony, dodanie przekaźnika zwiększa liczbę urządzeń radiowych, których moc zużywaną trzeba dodać do całkowitego modelu zużycia mocy. Ponadto, transmisja z wykorzystaniem węzła przekaźnikowego wymaga co najmniej dwóch szczelin czasowych. Warto również zauważyć, że węzły przekaźnikowe mogą pracować w różnych trybach np. wzmocnij i przekaż (ang. amplify and forward - AF) czy też zdekoduj i przekaż (ang. decode and forward DF). W pierwszym z nich, odebrany przez przekaźnik sygnał zostaje wzmocniony, a następnie przekazany do odbiornika. W drugim trybie odebrany przez węzeł pośredniczący sygnał jest zdekodowany, a następnie ponownie zakodowany oraz wysłany do odbiornika. Z perspektywy efektywności energetycznej tryb DF wymaga dodatkowej mocy na przetworzenie sygnału lecz wynikowy SNR na wejściu ostatniego w łańcuchu odbiornika jest wyższy niż w przypadku trybu AF. Szczegółowy opis wad i zalet stosowania przekaźników oraz ich trybów pracy w kontekście maksymalizacji efektywności energetycznej został przedstawiony w rozprawie. Podobnie jak w przypadku pojedynczego łącza OFDM jak i sieci OFDMA również dla sieci OFDMA z przekaźnikami zidentyfikowano najważniejsze podejścia do estymacji szybkości transmisji, zużywanej mocy, ograniczeń i wymagań systemowych, a także przedstawiono najważniejsze techniki optymalizacyjne.

Autor rozprawy zaproponował algorytm alokacji zasobów dla sieci OFDMA z przekaźnikami działającymi w trybie DF [23], [24]. W przeciwieństwie do istniejących systemów [25]–[31] w proponowanym modelu ta sama podnośna może być wykorzystywana przez stację bazową i przez węzły przekaźnikowe w drugiej szczeliny czasowej jak pokazano na rysunku 6. Takie podejście może powodować interferencję u użytkowników końcowych lecz w przypadku gdy tłumienie łącza przez które propaguje się sygnał interferujący względem łącza dla sygnału pożądanego jest duże możliwe jest zwiększenie efektywności widmowej systemu co może skutkować zwiększeniem efektywności energetycznej. Ponadto, w rozważanym systemie uwzględniono moc zużywaną na przetwarzanie sygnału w paśmie podstawowym, a tryb transmisji (bezpośredni lub z wykorzystaniem przekaź-

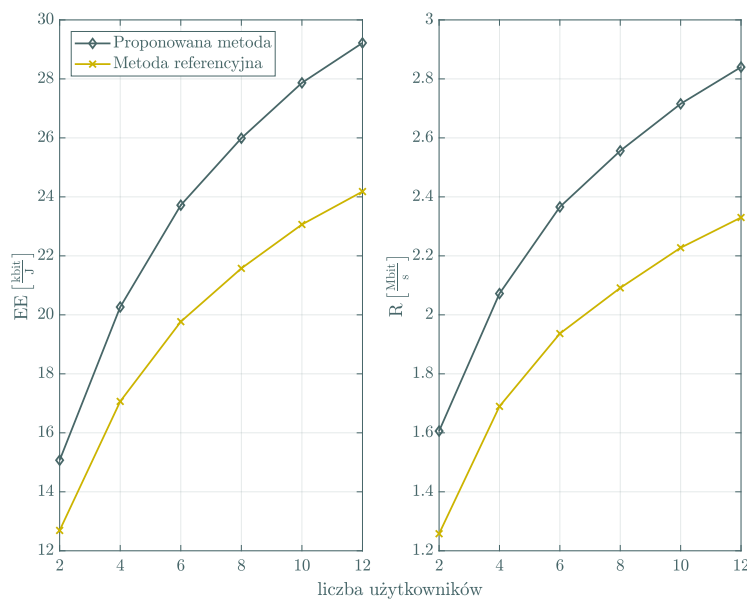


RYSUNEK 6: Przykład transmisji bezpośredniej oraz z wykorzystaniem przekaźnika dla dwóch szczelin czasowych oraz podnośnych: n , k , n' oraz k' .

nika) jest dobierany adaptacyjnie w zależności od warunków kanału.

Sformułowany dla powyższego systemu problem optymalizacyjny sprowadza się do znalezienia takich wartości mocy transmisji alokowanych na podnośne, par podnośnych alokowanych w pierwszej i drugiej szczelnie czasowej oraz trybów transmisji użytkowników sieci, które maksymalizują metrykę efektywności energetycznej. Podobnie jak w przypadku łącza OFDM jak i sieci OFDMA zdefiniowany problem optymalizacyjny jest niewypukłym, ciągle-dyskretnym problemem optymalizacyjnym. Ponadto, ze względu na niewypukłość licznika metryki EE metody rozwiązania problemów ułamkowych nie mogą zostać użyte. Dlatego też, w celu rozwiązania zdefiniowanego problemu dokonano jego przekształcenia poprzez:

- (i) zastosowanie techniki dekompozycji pierwotnej, aby rozdzielić problem optymalizacji na dwu-etapowy problem maksymalizacji [32],
- (ii) wprowadzenie pomocniczych zmiennych optymalizacyjnych,
- (iii) zastosowanie sukcesywnej aproksymacji funkcją wypukłą,
- (iv) zastosowanie metody Dinkelbacha.



RYSUNEK 7: Efektywność energetyczną oraz przepustowość w funkcji liczby użytkowników w sieci z przekaźnikami.

Dla przekształconego problemu optymalizacyjnego wartości mocy transmisji alokowane na podnośne zostały wyznaczone przy użyciu metody podwójnej dekompozycji oraz warunków KKT. Natomiast w celu określenia par podnośnych alokowanych w pierwszej i drugiej szczelinie czasowej zastosowano algorytm węgierski [33]. Ostatecznie autor rozprawy zaproponował algorytm przydziału zasobów maksymalizujący efektywność energetyczną w oparciu o metodę Dinkelbacha oraz sukcesywną aproksymację funkcją wypukłą, który został zweryfikowany poprzez symulację komputerową. Przykładowy wynik symulacji pokazujący efektywność energetyczną oraz przepustowość w funkcji liczby użytkowników w sieci pokazano na rysunku 7. Metoda referencyjna maksymalizuje efektywność energetyczną systemu podobnie jak zaproponowany algorytm, ale nie może wykorzystywać danej podnośnej równocześnie przez stację bazową i węzeł przekaźnikowy w drugiej szczelinie czasowej. Wyniki symulacji pokazują znaczący zysk zarówno w efektywności energetycznej jak i osiąganym przepływności. Podobnie zależności można zaobserwować dla innych wyników symulacji prezentowanych w rozprawie. Pokazuje to dobitnie zalety optymalizacji sieci z uwzględnieniem interferencji.

Praktyczne aspekty projektowania algorytmów EE

W kolejnej części rozprawy omówiono praktyczne aspekty alokacji zasobów maksymalizującej EE w łączach i sieciach OFDM/OFDMA. Po pierwsze, autor rozprawy rozważył wpływ rzeczywistych urządzeń radiowych. Z uwagi na istotną wadę techniki OFDM jaką jest wysoki PAPR (ang. Peak-to-Average Power Ratio) w połączeniu z nieliniową charakterystyką wzmacniacza mocy nadajnika mogą być obserwowane silne zniekształcenia sygnału nadawanego. Powinno być to uwzględnione w modelowaniu i optymalizacji efektywności energetycznej systemu. Ponadto rozważono zależności między maksymalizacją EE, a typowymi ograniczeniami systemów komunikacji bezprzewodowej. Autor omówił wpływ złożoności optymalizacji, dostępności informacji i narzutów sygnalizacji oraz dostępne stopnie swobody w kontekście maksymalizacji efektywności energetycznej. Przedstawił też zalecenia dotyczące projektowania energooszczędnych systemów OFDM/OFDMA. W związku z tym w tej części rozprawy przedstawiono spojrzenie autora na projektowanie energooszczędnych algorytmów alokacji zasobów z uwzględnieniem praktycznych przeszkód, ograniczeń i stopni swobody w celu znalezienia maksymalnej wartości efektywności energetycznej.

Podsumowanie

Maksymalizacja metryki EE definiowanej jako stosunek osiąganym przepływności do zużycia mocy nie jest trywialnym problemem. Dzieje się tak, ponieważ zwiększona przepływność w nowoczesnych systemach bezprzewodowych osiągana jest kosztem złożoności obliczeniowej urządzeń radiowych wzrastającej z uwagi na bardziej zaawansowane przetwarzanie sygnałów np. kodowanie, dekodowanie, modulacja. Powoduje to, że energia związana z przetwarzaniem sygnałów, niezależnie od energii transmisji, stanowi znaczną część całkowitego zużycia energii. W związku z tym nowoczesne, energooszczędne systemy i sieci komunikacji radiowej muszą być *świadome obliczeniowo*. Ponadto zróżnicowanie systemów komunikacji bezprzewodowej, różne implementacje sprzętowe stosowanych algorytmów oraz praktyczne ograniczenia tych systemów znacznie komplikują problemy optymalizacyjne. W rozprawie autor zidentyfikowano trzy scenariusze, które zostały dogłębnie zbadane. Autor omawia systemy o narastającym stopniu złożoności, od: (i) pojedynczego łącza OFDM poprzez (ii) sieć OFDMA, a skończywszy na (iii) sieci OFDMA z przekaźnikami. W każdym przypadku autor omawia estymację szybkości transmisji, modelowanie zużycia energii,

istniejące ograniczenia i wymagania systemowe. Proponowany jest problem optymalizacyjny oraz jego rozwiązanie. W szczególności w modelowaniu zużycia energii autor uwzględnia moc przetwarzania sygnału (i związaną z tym moc obliczeniową). Ponadto, w każdym z badanych scenariuszy autor pracy zaproponował nowatorskie rozwiązania i autorskie algorytmy alokacji zasobów, które pozwalają zwiększyć EE w stosunku do istniejących rozwiązań.

Przeprowadzone badania, których efektem jest przedstawiona rozprawa doktorska, pozwalają stwierdzić, iż teza rozprawy została udowodniona, tj. że istnieją nowe metody maksymalizacji EE w systemach OFDM/OFDMA ze świadomością obliczeniową.

Literatura

- [1] Cisco, *Complete Visual Networking Index (VNI) Complete Forecast Update (2017 – 2022)*. December 2018.
- [2] P. Cerwall, *Ericsson Mobility Report*. November 2020. adr.: <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2020/11/more-than-1-billion-people-will-have-access-to-5g-coverage-by-the-end-of-2020>.
- [3] 5GPPP, *5G Vision: the next generation of communication networks and services*. 2015. adr.: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/11/Vision-brochure.pdf>.
- [4] 3GPP, *Technical Specification Group Services and System Aspects, TR 21.915, Rel. 15*. July 2018.
- [5] —, *Technical Specification Group Services and System Aspects, TR 21.916, Rel. 16*. June 2020.
- [6] L. Hanzo i T. Keller, *OFDM and MC-CDMA : A Primer*. Wiley-IEEE Press, sierp. 2006, ISBN: 978-0470030073.
- [7] B. Bossy i H. Bogucka, “Optimization of Energy Efficiency in Computationally-Aware Adaptive OFDM Systems,” w *IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications 2016 (IEEE PIMRC 2016)*, wrz. 2016, s. 1–6. DOI: 10.1109/PIMRC.2016.7794641.
- [8] G. Miao, N. Himayat i G. Y. Li, “Energy-Efficient Transmission in Frequency-Selective Channels,” w *IEEE Global Telecommunications Conference 2008 (IEEE GLOBECOM 2008)*, list. 2008, s. 1–5. DOI: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.897.
- [9] —, “Energy-Efficient Link Adaptation in Frequency-Selective Channels,” *IEEE Transactions on Communications*, t. 58, nr. 2, s. 545–554, lut. 2010, ISSN: 0090-6778. DOI: 10.1109/TCOMM.2010.02.080587.
- [10] C. Isheden i G. P. Fettweis, “Energy-Efficient Multi-Carrier Link Adaptation with Sum Rate-Dependent Circuit Power,” w *IEEE Global Telecommunications Conference 2010 (IEEE GLOBECOM 2010)*, grud. 2010, s. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2010.5683700.
- [11] —, “Energy-Efficient Link Adaptation on Parallel Channels,” w *19th European Signal Processing Conference 2011 (EUSIPCO 2011)*, 2011, s. 874–878.
- [12] —, “Energy-Efficient Link Adaptation with Transmitter CSI,” w *IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2011 (IEEE WCNC 2011)*, mar. 2011, s. 1381–1386. DOI: 10.1109/WCNC.2011.5779331.

- [13] R. S. Prabhu i B. Daneshrad, “An Energy-Efficient Water-Filling Algorithm for OFDM Systems,” w *International Conference on Communications (ICC’10)*, maj 2010, s. 1–5. DOI: 10.1109/ICC.2010.5502818.
- [14] W. Dinkelbach, “On Nonlinear Fractional Programming,” w *Management Science*, 7, t. 13, INFORMS, 1967, s. 492–498.
- [15] B. Bossy, P. Kryszkiewicz i H. Bogucka, “Optimization of Energy Efficiency in the Downlink LTE Transmission,” w *IEEE International Conference on Communications 2017 (ICC 2017)*, 2017, s. 1–6.
- [16] A. Akbari, R. Hoshyar i R. Tafazolli, “Energy-efficient resource allocation in wireless OFDMA systems,” w *PIMRC’11*, wrz. 2010, s. 1731–1735. DOI: 10.1109/PIMRC.2010.5671913.
- [17] C. Xiong, G. Y. Li, S. Zhang, Y. Chen i S. Xu, “Energy-Efficient Resource Allocation in OFDMA Networks,” *IEEE Transactions on Communications*, t. 60, nr. 12, s. 3767–3778, grud. 2012, ISSN: 0090-6778. DOI: 10.1109/TCOMM.2012.082812.110639.
- [18] K. Yang, S. Martin, T. A. Yahiya i J. Wu, “Energy-Efficient Resource Allocation for Downlink in LTE Heterogeneous Networks,” w *IEEE 80th Vehicular Technology Conference 2014 (VTC2014-Fall)*, 2014, s. 1–5. DOI: 10.1109/VTCFall.2014.6965962.
- [19] F. Z. Kaddour, E. Vivier, M. Pischella, L. Mroueh i P. Martins, “Power Control in Opportunistic and Efficient Resource Block Allocation Algorithms for Green LTE Uplink Networks,” w *IEEE Online Conference on Green Communications 2013 (OnlineGreenComm 2013)*, 2013, s. 8–13. DOI: 10.1109/OnlineGreenCom.2013.6731021.
- [20] Z. Ren, S. Chen, B. Hu i W. Ma, “Energy-Efficient Resource Allocation in Downlink OFDM Wireless Systems With Proportional Rate Constraints,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, t. 63, nr. 5, s. 2139–2150, 2014.
- [21] 3GPP, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) Radio Transmission and Reception, TS 36.104*. September 2019.
- [22] Y. Wang, J. Zhang i P. Zhang, “Energy-Efficient Power and Subcarrier Allocation in Multiuser OFDMA Networks,” w *IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC 2014)*, czer. 2014, s. 5492–5496. DOI: 10.1109/ICC.2014.6884195.
- [23] B. Bossy, P. Kryszkiewicz i H. Bogucka, “Energy Efficient Resource Allocation in Multiuser DF Relay Interference Networks,” w *IEEE Global Telecommunications Conference Workshops 2018 (IEEE GLOBECOM Wkshps 2018)*, grud. 2018, s. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2018.8644258.
- [24] —, “Energy Efficient Wireless Relay Networks With Computational Awareness,” *IEEE Transactions on Communications*, t. 68, nr. 2, s. 825–840, 2020. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2953660.
- [25] K. T. K. Cheung, S. Yang i L. Hanzo, “Achieving Maximum Energy-Efficiency in Multi-Relay OFDMA Cellular Networks: A Fractional Programming Approach,” *IEEE Transactions on Communications*, t. 61, nr. 7, s. 2746–2757, lip. 2013, ISSN: 0090-6778. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.13.120727.
- [26] R. Arab Loodaricheh, S. Mallick i V. K. Bhargava, “Energy-Efficient Resource Allocation for OFDMA Cellular Networks With User Cooperation and QoS Provisioning,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, t. 13, nr. 11, s. 6132–6146, list. 2014, ISSN: 1536-1276. DOI: 10.1109/TWC.2014.2329877.

- [27] Y. Lu, K. Xiong, Y. Zhang, P. Fan i Z. Zhong, “Energy-Efficient Resource Allocation in OFDM Relay Networks under Proportional Rate Constraints,” w *IEEE Global Communications Conference 2016 (IEEE GLOBECOM 2016)*, grud. 2016, s. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2016.7841808.
- [28] M. S. Alam, J. W. Mark i X. S. Shen, “Relay Selection and Resource Allocation for Multi-User Cooperative OFDMA Networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, t. 12, nr. 5, s. 2193–2205, maj 2013, ISSN: 1536-1276. DOI: 10.1109/TWC.2013.032113.120652.
- [29] K. Singh, A. Gupta, T. Ratnarajah i M. Ku, “A General Approach Toward Green Resource Allocation in Relay-Assisted Multiuser Communication Networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, t. 17, nr. 2, s. 848–862, lut. 2018, ISSN: 1536-1276. DOI: 10.1109/TWC.2017.2772229.
- [30] K. Singh, A. Gupta, S. Biswas i T. Ratnarajah, “A Unified Approach Towards Green Resource Allocation in Relay-Assisted Multiuser Networks,” w *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017)*, grud. 2017, s. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2017.8254216.
- [31] K. Singh, A. Gupta i T. Ratnarajah, “Energy Efficient Resource Allocation for Multiuser Relay Networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, t. 16, nr. 2, s. 1218–1235, lut. 2017, ISSN: 1536-1276. DOI: 10.1109/TWC.2016.2641961.
- [32] S. B. L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge U.K: Cambridge Univ. Pres, 2004.
- [33] H. W. Kuhn i B. Yaw, “The Hungarian method for the assignment problem,” *Naval Res. Logist. Quart.*, s. 83–97, 1955.



© 2022 mgr inż. Bartosz Bossy

Instytut Radiokomunikacji, Wydział Informatyki i Telekomunikacji
Politechnika Poznańska

Skład przy użyciu systemu na platformie Overleaf.