



POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych
Instytut Telekomunikacji



PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Maria Małgorzata Siewierska

Optymalny przydział zasobów w sieci LTE ze stacjami Relay

Kierujący pracą:
dr inż. Piotr Gajowniczek

.....
ocena pracy

.....
data i podpis Przewodniczącego
Komisji Egzaminacyjnej

Warszawa, styczeń 2012

Optymalny przydział zasobów w sieci LTE ze stacjami Relay

Streszczenie

Niniejsza praca mierzy się z zagadnieniami optymalnego przydziału zasobów na łączu w dół w sieciach LTE ze stacjami relay. Temat umieszczania w sieciach dodatkowych stacji relay w celu poprawy ich wydajności nie jest jeszcze opisany w literaturze polskojęzycznej, nakreślono zatem jego podstawy teoretyczne.

Nierozłączną częścią pracy jest stworzony program, umożliwiający badanie zagadnienia przydziału zasobów z wykorzystaniem heurystycznego algorytmu symulowanego wyżarzania. Opisano odwzorowywany model i zaprezentowano otrzymane wyniki.

Optimal resources allocation in LTE networks with relay stations

Abstract

The purpose of this thesis is to present optimal resource allocation method in LTE networks with relay stations. As the subject of placing relay stations in cells to enhance their performance has not been described in polish literature , it is described and explained here.

The part of this thesis is the application covering heuristic algorithm simulated annealing used to solve problem of optimal resource allocation. Designed cell model and results are presented.



ŻYCIORYS

Urodziłam się w połowie sierpnia 1988. Dzieciństwo spędziłam w Radomiu, gdzie w 2004 roku ukończyłam gimnazjum przy Zespole Szkół Integracyjnych im. Jana Pawła II. Naukę kontynuowałam w VI Liceum Ogólnokształcącym im. Jana Kochanowskiego, w klasie o profilu matematyczno-informatycznym. Po maturze, w 2007 roku, rozpoczęłam studia na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej, które kontynuuję na specjalności Teleinformatyka i Zarządzanie w Telekomunikacji.

Od września 2011 roku pracuję w firmie Ericsson przy integrowaniu platformy usług zarządalnych.

Spis treści

Używane skróty	7
1 Wprowadzenie	8
1.1 Motywacje	8
1.2 Cel i zakres pracy	9
2 LTE – Long Term Evolution	10
2.1 Wprowadzeni	10
2.2 Opis warstwy fizycznej	10
2.3 Struktura ramki	11
2.4 Architektura sieci	12
2.5 OFDM	13
2.5.1 Wprowadzenie	13
2.5.2 Znaczenie transformaty Fouriera	18
2.5.3 Podsumowanie OFDM	20
2.6 EESM – Effective Exponential SINR METRIC	20
2.6.1 Wprowadzenie	21
2.6.2 Podstawy matematyczne	21
2.6.3 Idea działania	22
3 Stacje Relay	24
3.1 Wprowadzenie	24
3.2 Zalety stacji relay	24
4 Zasoby w LTE	27
4.1 Zdefiniowanie zasobów w LTE	27
4.2 Przydział podnośnych użytkownikom	28
4.3 Frequency Reuse	29
5 Optymalny przydział zasobów	30
5.1 Symulowane wyżarzanie	30
5.2 Określenie problemu optymalizacji	31
6 Opis stworzonego systemu	34
6.1 Model komórki sieci	34
6.2 Interfejs użytkownika	36
7. Badania	39
7.1 Walidacja modelu	39
7.2 Losowe przydzielanie zasobów użytkownikom	40

7.3 Badanie wpływu liczby kroków algorytmu symulowanego wyżarzania na osiągnane wyniki	41
7.4 Badanie wpływu parametru „insignificant change”	42
7.5 Badanie wpływu liczby stacji relay na sumaryczną przepływność	43
7.6 Badanie przepływności dla użytkowników znajdujących się daleko od środka komórki	45
7.7 Wpływ odległości stacji relay od środka komórki na sumaryczną przepływność	46
8 Podsumowanie	47
9 Bibliografia	48

Wykaz używanych skrótów

3GPP	3rd Generation Partnership Project
3G	3rd Generation
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
EESM	Effective Exponential SNR Mapping
EPS	Evolved Packet System
FDM	Frequency-Division Multiplexing
FR	Frequency Reuse
LTE	Long Term Evolution
MME	Mobility Management Entity
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OQAM	Offset Quadrature Amplitude Modulation
PHY	Physical
PRB	Physical Resource Block
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RNC	Radio Network Controller
RS	Relay Station
SA	Simulated Annealing
SAE GW	System Architecture Evolution Gateway
SNR	Signal To Noise Ratio
TDM	Time-Division Multiplexing
XML	Extensible Markup Language

1. WPROWADZENIE

1.1 MOTYWACJE

Mobilny komórkowy szerokopasmowy dostęp do Internetu cieszy się obecnie dużym sukcesem komercyjnym, jednak aby wyjść naprzeciw oczekiwaniom rynku potrzebny jest dalszy rozwój technologii podnoszących poziom dostarczanych usług. Metodami osiągnięcia tego jest zwiększanie dostępnych szybkości przesyłu danych, zmniejszanie opóźnień i podnoszenie pojemności sieci. Te założenia przyświecały organizacji 3GPP (3rd Generation Partnership Project) podczas tworzenia standardu Long Term Evolution (LTE) [1]. Pierwsza wdrożeniowa wersja LTE pojawiła się w grudniu 2008 i od tego czasu trwają prace nad jego ulepszaniem.

Nowy standard 3GPP znacznie zwiększa efektywność wykorzystywania zasobów radiowych względem sieci określanych mianem trzeciej generacji (3G), umożliwiając wielokrotne podniesienie liczby użytkowników obsługiwanych przez pojedynczą komórkę. Efekt ten jest uzyskiwany m.in. przez optymalizację przydzielania pasma użytkownikom oraz rozmieszczanie dodatkowych stacji typu Relay (stacji o mniejszych kosztach realizacji niż klasyczne stacje bazowe, umożliwiających np. pokrycie zasięgiem obszarów odległych od środka komórki [2]). W związku ze złożonością tego tematu oraz możliwością wielorakich rozwiązań zależnych od właściwości radiowych komórki, zapotrzebowania użytkowników oraz strategii operatora danej sieci, twórcy LTE zdecydowali się nie standaryzować algorytmów przydziału zasobów użytkownikom, pozostawiając miejsce dla prac badawczych [3-4].

Wprowadzenie do komórki dodatkowych stacji Relay (Relay Station – RS, w odróżnieniu od BS – Base Station) jest najtańszą metodą zwiększenia pojemności sieci i podniesienia jakości transmisji, szczególnie w sytuacji wystąpienia dużych zapotrzebowań w miejscach, w które sygnał ze stacji bazowej dociera w niskiej jakości. Właściwości RS mogą być wykorzystywane np. do czasowego zwiększenia ilości możliwych do obsłużenia użytkowników w związku z imprezami masowymi, udostępnienia transmisji na żywo w wysokiej jakości [5], realizacji dostępu do sieci w szybko poruszających się środkach transportu [6] czy szybkiego odbudowywania infrastruktury po klęskach żywiołowych.

W związku z możliwymi korzyściami płynącymi z rozmieszczania w sieci stacji Relay jest istotne aby dokładnie zbadać ich specyfikę pod kątem optymalnego użycia, z czym mierzy się niniejszy dokument. Zagadnienie to ze względu na swoją złożoność jest bardzo ciekawe badawczo, a dodatkową motywacją do zajęcia się nim jest jego duży potencjał komercyjny, który nie został jeszcze wykorzystany przez operatorów sieci komórkowych.

1.2 CELE I ZAKRES PRACY

Celem tej pracy dyplomowej jest przedstawienie standardu LTE, a w szczególności aspektu stacji Relay, którego opis w literaturze polskojęzycznej jest praktycznie nieobecny. Ponieważ sieci LTE opierają się na technice multipleksacji OFDM, zatem została ona dogłębnie opisana. Główny nacisk został położony na zagadnienie przydzielania zasobów w warstwie fizycznej. Jest ono realizowane za pomocą heurystycznego algorytmu symulowanego wyżarzania, który również został przeanalizowany i przedstawiony.

Komplementarną częścią pracy jest stworzony w jej ramach program, umożliwiający badanie efektywności przydziału zasobów w komórce LTE ze stacjami Relay. W treści zamieszczono wyniki i wnioski wynikające z tych badań.

Praca zawiera teoretyczny opis analizowanych zagadnień, takich jak: łącze radiowe, techniki OFDM i OFDMA oraz zasoby w sieci i zasady ich przydziału. Zaprezentowano standard LTE, a także wyzwania związane ze stacjami Relay. Zamieszczono również opis stworzonego programu i otrzymane dzięki niemu wyniki. W podsumowaniu przedstawiono zalety i wady pracy oraz zarysowano perspektywę dalszych badań w tym temacie.

2. LTE – Long Term Evolution

2.1. WPROWADZENIE

Wyliczono, że w 2008 roku średni przyrost liczby użytkowników sieci mobilnych wynosił średnio 10 na sekundę, czyli ponad 1 milion nowych klientów dziennie. Konsekwencją tego jest oczywiście dramatyczny wzrost zapotrzebowania na dostępną przepływność. Naprzeciw temu wyszli operatorzy i producenci sprzętu zrzeszeni w ramach 3GPP. Prace nad standardem LTE rozpoczęły się w roku 2004. Podstawowym założeniem jego twórców było stworzenie systemu o wysokiej wydajności pasmowej i pojemności, którego wdrożenie będzie jednocześnie w zasięgu finansowym inwestorów. Cel ten udało się zrealizować przez zastosowanie multipleksacji OFDM w łączu w dół i SC-FDM w łączu w górę, transmisję wieloantenową oraz taki dobór częstotliwości pracy, aby pokrywały się one z dotychczas używanymi, co umożliwia uniknięcie kosztów nowych koncesji. Te decyzje projektowe spotkały się z dużym zainteresowaniem wśród operatorów; w maju 2011 roku ponad dwustu prowadziło badania nad budową sieci LTE [7].

W następnych podrozdziałach opisane zostaną najważniejsze kwestie dotyczące standardu LTE.

2.2. OPIS WARSTWY FIZYCZNEJ

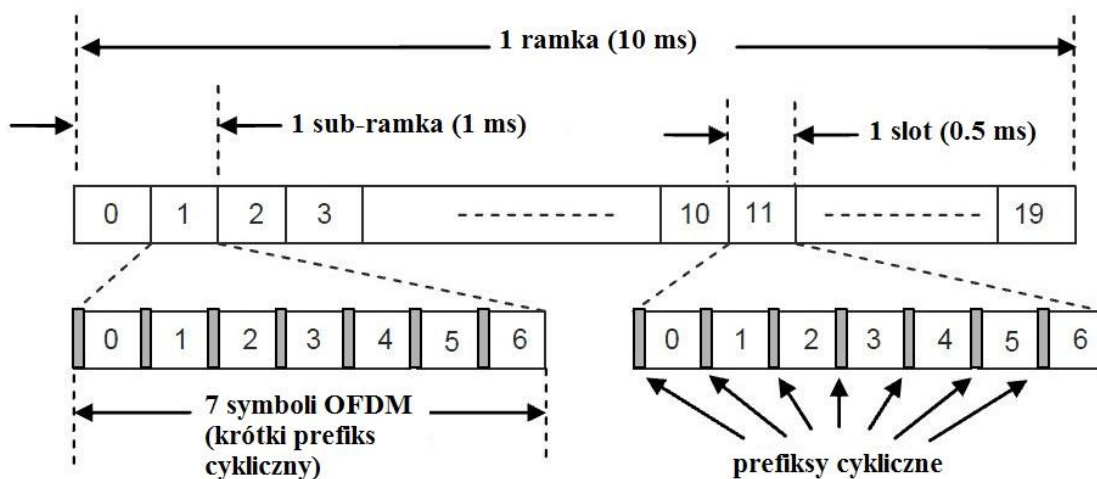
Właściwości warstwy fizycznej (PHY, od Physical) LTE były uważnie projektowane pod kątem współczesnych i przewidywanych wymagań operatorów sieci komórkowych. Cele, które sobie stawiano to między innymi:

- Wsparcie skalowalnego pasma 1.4, 3.0, 5.0, 10.0 i 20.0 MHz dla lepszego dostosowywania się do szczególnych wymagań w różnych warunkach
- Uzyskanie maksymalnej przepływności skalowalnej z pasmem systemu:
 - Przepływność na łączu w dół (od stacji do użytkownika) do 100 Mbps w paśmie 20 MHz w systemie z dwukanałowym MIMO
 - Przepływność na łączu w górę dla jednego kanału do 50 Mbps w paśmie 20 MHz
- Wspierane konfiguracje anten:
 - Łącze w dół: 4x4, 2x2, 1x2, 1x1
 - Łącze w górę: 1x2, 1x1
- Rozdzielenie łącz w górę i w dół
 - FDD – częstotliwościowe (wybrane w pracy)
 - TDD - czasowe
- Wielodostęp:

- OFDMA dla łącza w dół, by zapewnić maksymalną elastyczność przydziału zasobów i umożliwić łatwy odbiór
- SC-FDMA dla łącza w górę, by ograniczyć moc z jaką muszą nadawać stacje użytkowników
- Osiągnięcie wydajności widmowej:
 - Łącze w dół: 3 do 4 razy większa niż w HSDPA [8] wersja 6
 - Łącze w górę: 2 do 3 razy większa niż HSUPA [9] wersja 6
- Zagwarantowanie opóźnień mniejszych niż 10 ms między użytkownikiem a serwerem
- Mobilność:
 - Sieć zoptymalizowana dla małych prędkości (poniżej 15 km/h)
 - Wysoka wydajność aż do 120 km/h
 - Możliwość transmisji dla użytkowników poruszających się nawet 350 km/h
- Pokrycie:
 - Maksymalna efektywność dla komórek o promieniu do 5 km
 - Niewielkie obniżenie jakości przy transmisji na odległość 5 do 30 km
 - Standard nie powinien wykluczać komórek o rozmiarze do 100 km.

2.3. STRUKTURA RAMKI

Standard LTE na łączu w dół opiera się o schemat multipleksacji OFDM (dokładnie opisany w rozdziale 2.6.). Mimo iż multipleksacja OFDM wymaga zaawansowanych funkcji przydziału zasobów (z czym mierzy się ta praca), to jest ona bardzo efektywna, szczególnie w kontekście ograniczania opóźnień. W technice wielodostępu OFDMA użytkownikom przydzielane są zasoby, które w LTE nazywa się PRB (ang. Physical Resource Block) – fizyczne bloki zasobów. Mają one wymiar zarówno pasma częstotliwości jak i czasu. Poniżej opisano ramkę systemu opierającego się o FDD, którego dotyczy niniejsza praca.

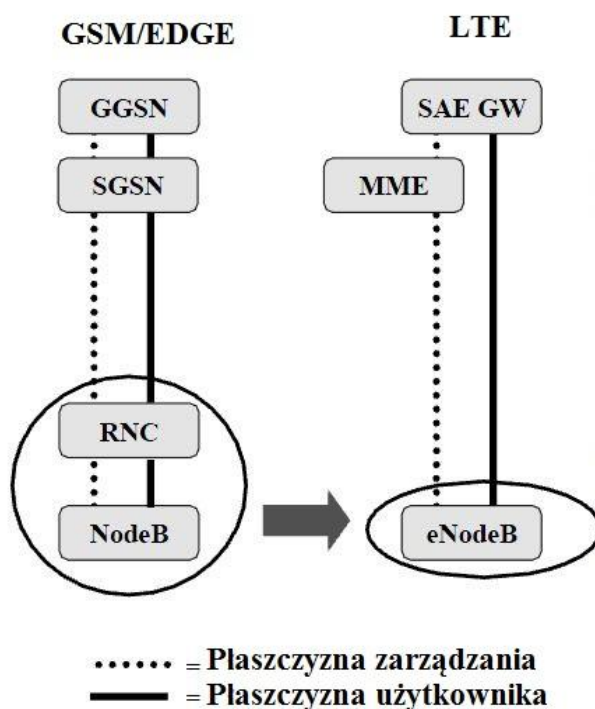


Rys. 2.1. Generyczna struktura ramki w LTE [11]

Jak można zobaczyć na rysunku 2.1. ramka w LTE trwa 10 ms. Jest ona podzielona na 10 sub-ramek, każda o czasie trwania 1 ms. Dalszym podziałem jest stworzenie z każdej sub-ramki dwóch slotów po 0.5 ms. Każdy slot składa się z 6 lub 7 symboli OFDM, zależnie od długości cyklicznego prefiksu.

2.4. ARCHITEKTURA SIECI

Wysoka pojemność sieci wymaga, poza dobrymi parametrami łącza radiowego, wydajnej architektury. Celem twórców standardu LTE było podniesienie skalowalności sieci przez obniżenie opóźnień od końca do końca. Możliwe to było między innymi przez zmniejszenie ilości elementów w systemie. W odróżnieniu od wcześniejszych standardów 3GPP, zarządzanie interfejsem radiowym, mobilnością i retransmisją pakietów znajduje się w stacji bazowej zwanej eNodeB. Oznacza to, że eNodeB przejął funkcje związane wcześniej z RNC (ang. Radio Network Controller) – kontrolerem sieci radiowej, elementem występującym wcześniej w standardzie GSM/EDGE.



Rys. 2.2. . Architektura sieci LTE [10]

Również w sieci stałej (ang. Core) nastąpiły pewne zmiany. Wyraźnie rozdzielono płaszczyznę użytkownika i zarządzania. MME (ang. Mobility Management Entity) czyli jednostka zarządzania mobilnością obsługuje jedynie płaszczyznę zarządzania, natomiast ruch

generowany przez użytkowników trafia bezpośrednio do bramy systemowej SAE GW (ang. System Architecture Evolution Gateway). Całą sieć pakietową określa się jako EPS (ang. Evolved Packet System).

2.5. OFDM

2.5.1 Wprowadzenie

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), czyli ortogonalne zwielokrotnienie w dziedzinie częstotliwości) jest jedną z technik multipleksacji sygnału, po części podobną do FDM (Frequency-Division Multiplexing). Historia OFDM sięga lat 60-tych, kiedy to pracowano nad koncepcją poprawienia efektywności widmowej transmisji [11]. Pierwszym systemem z wdrożoną techniką OFDM był KATHRYN [12], stworzony na potrzeby amerykańskiego wojska.

Współczesne systemy telekomunikacyjne wykorzystywane do transmisji multimedialnych mają coraz większe zapotrzebowanie na przepływność i jakość, szczególnie w kontekście mobilnego nadawania i odbioru. Strona odbiorcza często musi pracować na sygnale słabszym niż pożądanym i zakłóconym przez echo wynikające z transmisji wielodrogowej. Proste systemy cyfrowe nie radzą sobie dobrze z takimi wyzwaniami.

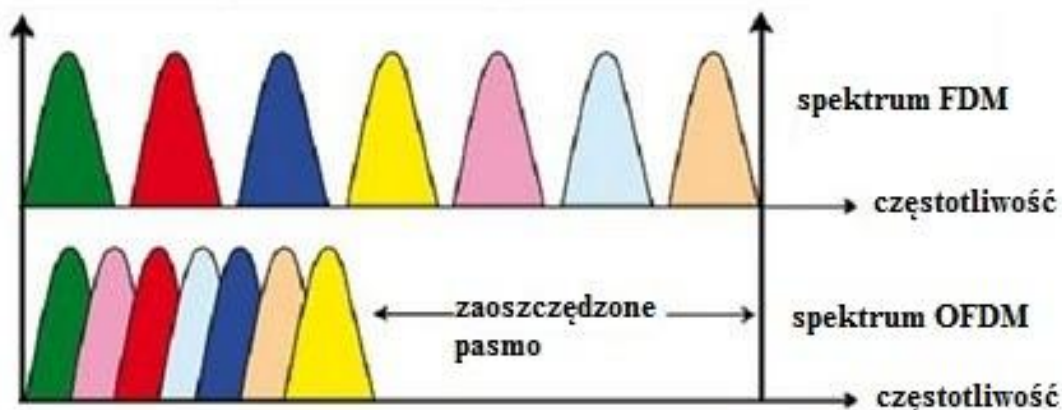
W konwencjonalnym systemie charakteryzującym się transmisją szeregową, symbole wysyłane są sekwencyjnie, przy czym każdy wysyłany symbol ma do dyspozycji całe pasmo systemu. (Tak działa np. TDM – (Time Division Multiplexing) – zwielokrotnienie w dziedzinie czasu). W systemach gdzie nadawanie odbywa się równolegle, wiele symboli współdzieli pasmo podczas wysyłany w tym samym czasie, co pozwala ominąć wiele problemów napotykanym w technice TDM.

W OFDM wysyłane dane są dzielone między wiele położonych blisko siebie podnośnych (ang. sub-carriers). Do tego właśnie odnoszą się litery „FDM” w nazwie. OFDM polega na równoległej transmisji wielu strumieni danych. Każda z podnośnych przenosi jedynie niewielki fragment danych. Dzięki temu, każdy z takich podstrumieni można modulować z mniejszą szybkością niż gdyby miało to mieć miejsce dla strumienia przesyłanego w całym paśmie systemu. Umożliwia to znaczące ograniczenie interferencji między podnośnymi ICI (Intercarrier Interferences). Co również istotne, na każdej z podnośnych można stosować inny schemat modulacji i kodowania, co pozwala na dalsze optymalizowanie wykorzystania kanału. Zagadnienie to zostało dokładnie opisane w rozdziale 2.7.

Przy projektowaniu systemów transmisyjnych istotne jest wzięcie pod uwagę zaników i szumów wąskopasmowych. Obydwa te zjawiska mogą spowodować zupełną degradację sygnału przesyłanego w sposób sekwencyjny, natomiast w sytuacji, kiedy symbole wysyłane są w sposób zrównoleglony istnieją możliwości przeciwdziałania negatywnym efektom w kanale. Ponieważ w OFDM pasmo podzielone jest na wiele wąskich podpasm (w LTE o szerokości 15 kHz), istnieją duże szanse, że dla danego wycinka zakłócenia będą na tyle niskie, że uda się dokonać poprawnej transmisji. Podsumowując, zamiast kompletnie zniszczonych kilku partii danych pod rząd otrzymujemy zestaw symboli, z których część jest co najwyżej nieznacznie zaszumiona.

W klasycznych systemach opierających się na transmisji zrównoleglonej całkowite pasmo jest podzielone na N nienachodzących na siebie podpasm. Każde z nich jest oddzielnie modulowane pewnym symbolem danych a następnie multipleksowane. Istnieje kilka schematów zapewniania, że podpasma na siebie nie nachodzą:

- Używanie filtrów, aby zupełnie odseparować podpasma. Na tej metodzie opiera się chociażby FDM. Ograniczenia związane z dokładnością filtrów sprawiają, że każde z podpasm musi mieć szerokość równą $(1 + \alpha)f_m$, gdzie α jest współczynnikiem *flaw rate*, określającym niedoskonałość filtru, natomiast f_m pasmem Nyquist'a. Poza faktem, że taki system jest niewydajny pasmowo pojawia się problem polegający na tym, że dla dużej ilości podpasm fizyczne umieszczenie odpowiedniej ilości filtrów w jednym urządzeniu staje się skomplikowane
- Wykorzystanie schematu OQAM [13] (offset QAM). Zwiększa on efektywność wykorzystania pasma, przez umożliwienie nakładania się brzegów kolejnych podpasm. Ortogonalność w tym systemie uzyskiwana jest przez przesunięcie kolejnych symboli o pół czasu trwania. Ten schemat wykorzystywany jest przede wszystkim w systemach opierających się na technice SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access)
- Użycie dyskretnej transformaty Fouriera (DFT) do modulowania i demodulowania zrównoleglonych danych. Dzięki temu w dziedzinie częstotliwości poszczególne sygnały mają formę funkcji *sinc*, która nie ma ograniczenia na pasmo. Multipleksacja w dziedzinie częstotliwości jest osiągnięta nie przez filtrowanie, ale przez analizę pasma podstawowego. Tę metodę łatwo jest zaimplementować używając wydajnego algorytmu FFT – Fast Fourier Transform. Zagadnienie zostało szczegółowo opisane w rozdziale 2.6.2.. Metoda ta jest bardzo efektywna pasmowo, co obrazuje rys. 2.3.

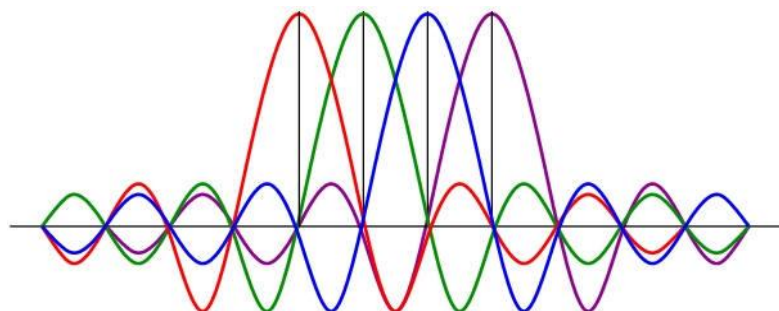


Rys. 2.3. Zestawienie FDM i OFDM

Kwestia ortogonalności rozwiązywana jest w systemach OFDM opierających się o FFT przez taki dobór czasu trwania symbolu i odległości między podnośnymi aby były one swoimi odwrotnościami, jak to pokazano we wzorze 2.1.

$$T_s = 1 / f_s$$

Wzór 2.1. zależność między czasem trwania symbolu a odległością między podnośnymi



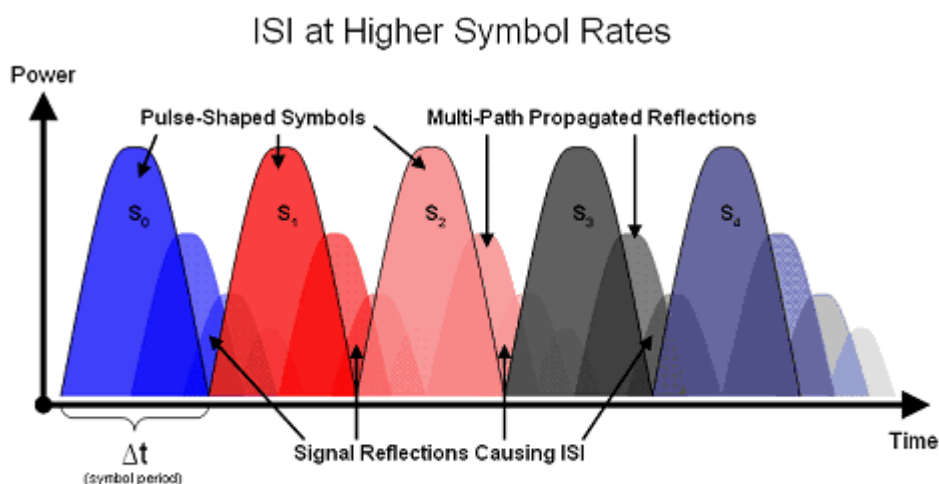
Rys 2.4. Wykres dla czterech kolejnych podnośnych

Dzięki takiemu doborowi właściwości sygnału uzyskuje się efekt zobrazowany na rysunku 2.4.: kolejne podnośne nakładają się na siebie, ale w kluczowych miejscach – maksimach kolejnych podnośnych wszystkie pozostałe wygaszają się osiągając wartość 0. W praktyce pojawia się jednak wiele wyzwań z tym związanych.

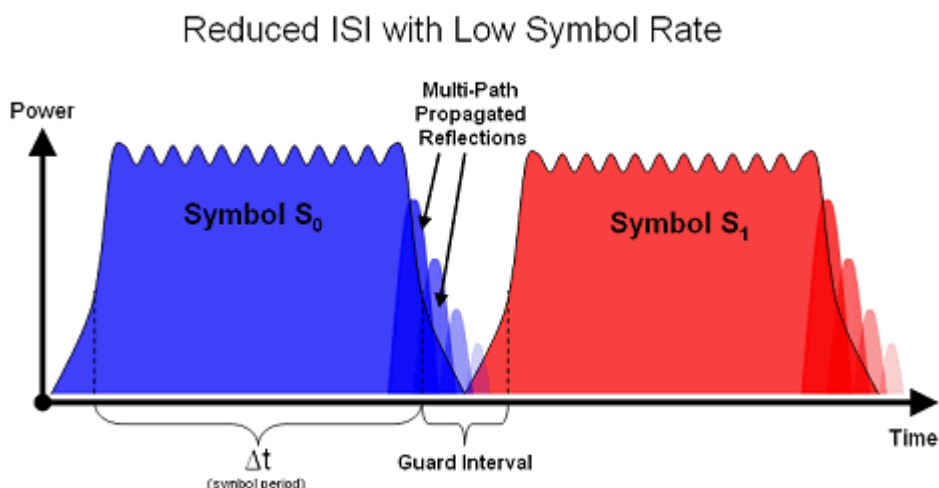
W LTE, jak to wspomniano wcześniej, szerokość odstępu między podnośnymi wynosi 15 kHz, a zatem czas trwania symbolu wynosi 66.7 μ s.

Podsumowując OFDM może być zdefiniowane jako forma modulacji wielu podnośnych, przy zachowaniu założenia, że odstęp między nimi musi gwarantować ortogonalność.

Dotychczasowe rozważania dotyczyły głównie analizy OFDM w dziedzinie częstotliwości. W dziedzinie czasu ten schemat modulacji również posiada swoje specyficzne wymagania. Jak w każdym innym systemie transmisja również i tu odbywa się w wyznaczonych slotach czasowych. Mają one stałą długość. Ponieważ, jak to stwierdzono wcześniej ortogonalność uzyskuje się przez analizę pasma, jest bardzo ważne jest, aby poszczególne symbole nie zakłócały sąsiednich (takie zjawisko określane jest mianem interferencji międzysymbolowych ISI – Intersymbol Interference – oraz by sąsiednie podnośne nie wpływały na siebie (ICI). Na rysunku 2.5. można zobaczyć, jak wyglądają takie zakłócenia.



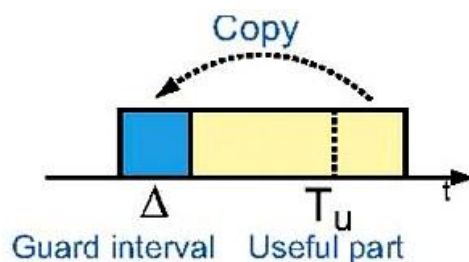
a)



b)

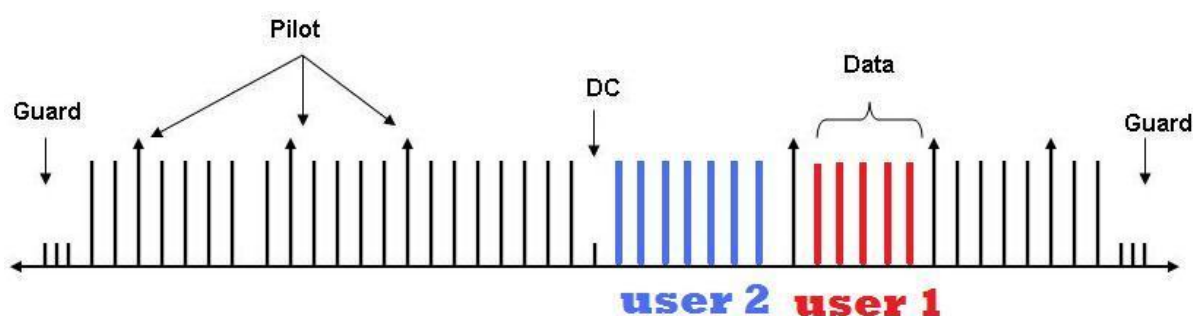
Rys. 2.5. Wpływ interferencji międzysymbolowych a) przy krótkich symbolach [14] b) przy dłuższych [15]

Jak można zauważyć, metodą walki z interferencjami ISI jest dodawanie do każdego z symboli odstępu ochronnego. Na rysunku 2.6. można zobaczyć jaki jest format symbolu z takim odstępem.



Rys. 2.6. Format symbolu OFDM

Całkowity czas trwania symbolu jest sumą czasu trwania użytecznej części (w niej przenoszone są np. dane użytkownika) i odstępu ochronnego. Odstęp ochronny ma formę cyklicznego prefiksu, co oznacza, że kopiowany jest końcowy fragment sygnału i wstawiany na początek. Jeżeli czas trwania prefiksu jest dłuższy niż odpowiedź kanału (tak jak na rys. 3b), to udało się uniknąć interferencji ISI. Należy jednak zauważyć, że dodanie cyklicznego prefiksu ogranicza czas dostępny dla transmisji symboli użytecznych. Dobór konkretnej długości prefiksu zależy od właściwości kanału i musi być ustalony podczas inicjalizacji stacji, choć oczywiście może być zmieniony przez osoby zarządzające siecią, jeżeli zauważą one spadek jakości transmisji. Zwykle dąży się do tego, aby okres ochronny był mniejszy niż 1/4 całkowitego czasu trwania.



Rys. 2.7. Typy podnośnych

Jak stwierdzono wcześniej, OFDM jest techniką modulacji (w rozumieniu funkcji między sygnałem wejściowym a wyjściowym), a nie wielodostępu. Aby umożliwić współdzielenie medium wielu użytkownikom stosuje się technikę OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access). Zasada przydziału zasobów w takim systemie opiera się na odpowiednim przydzieleniu użytkownikom grup podnośnych na określony czas. Zagadnienia optymalnego przydziału będą omówione w rozdziale 5. Wśród podnośnych można wyróżnić 3 typy (jak pokazano na rys. 2.7): sygnały pilota, podnośne danych (rozdzielane między użytkowników) i DC znakujący środek pasma.

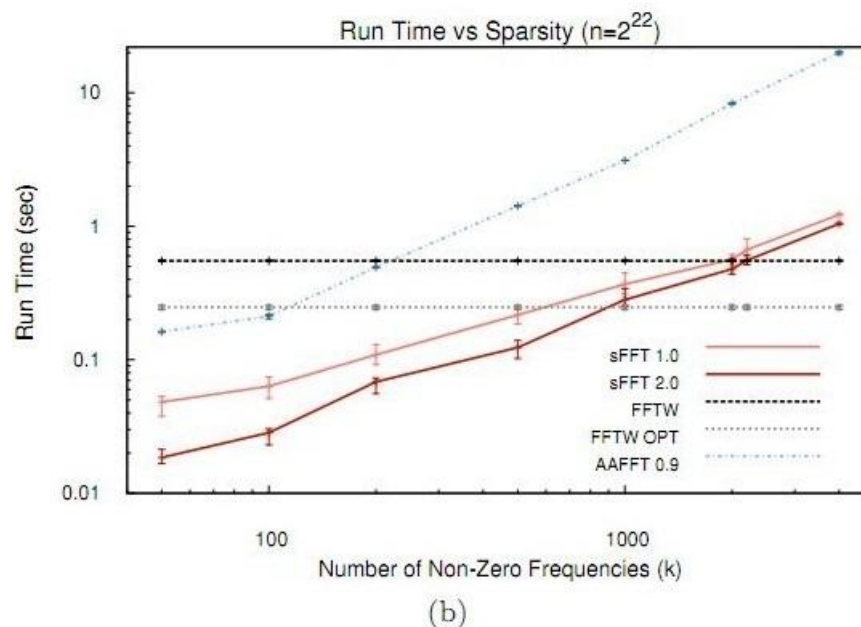
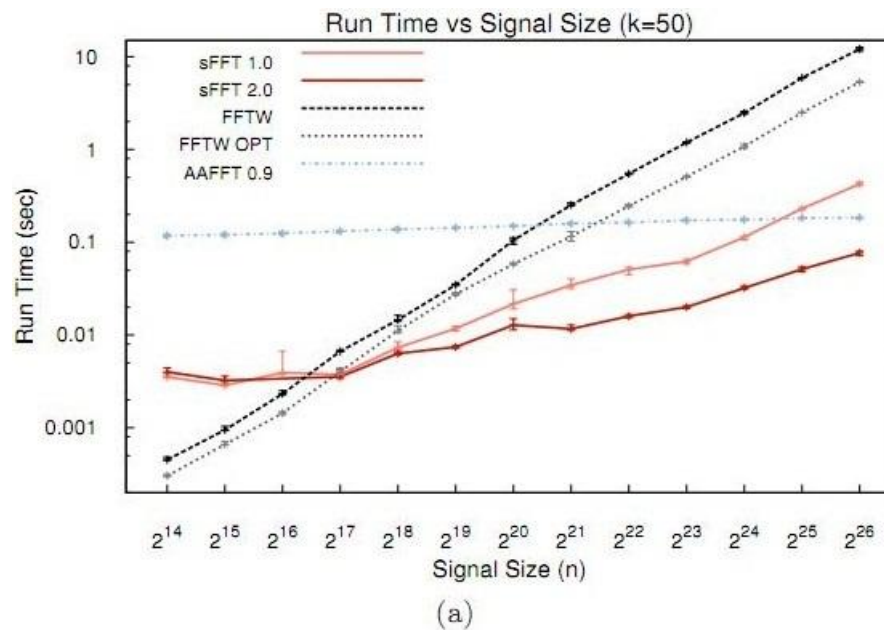
2.5.2. Znaczenie transformaty Fouriera

W LTE nadawany sygnał ma postać odwrotnej dyskretnej transformaty Fouriera (ang. IDFT - Inverse Discrete Fourier Transform) wyliczonej z każdego symbolu QAM. W praktycznych zastosowaniach korzysta się z odwrotnej szybkiej transformaty Fouriera (IFFT – Inverse Fast Fourier Transform). Po stronie odbiorczej sygnał poddawany jest operacji odwrotnej czyli wyliczeniu szybkiej transformaty Fouriera (FFT – Fast Fourier Transform).

Jak wspomniano powyżej brak ICI jest kluczową kwestią dla wydajności systemów opierających się na multipleksacji OFDM. Osiąga się to przez precyzyjne dostrajanie transmisji w dziedzinie częstotliwości, tak aby wysyłane sygnały były względem siebie ortogonalne. To też jest powodem stosowania IFFT i FFT – są to dobrze znane, efektywne metody przenoszenia sygnałów próbkowanych w dziedzinie czasu (kolejno napływające pakiety) w dziedzinę częstotliwości.

Teoretyczne podstawy i pierwsze wojskowe próby wdrożenia systemów opierających się na OFDM i transformatę Fouriera powstały, jak to stwierdzono we wcześniejszym podrozdziale, w latach 60-tych XXw. Wtedy jednak rozwój prac został zahamowany przez brak wydajnych metod wyliczania IDFT i DFT. Złożoność obliczeniowa ówczesnych algorytmów wynosiła $O(N^2)$, co w dużej mierze ograniczało praktyczne zastosowania. Obecnie stosowana szybka transformata Fouriera ma złożoność obliczeniową $O(N/2 * \log_2 N)$, a istniejące metody jej implementowania sprzętowego sprawiają, że jest ona powszechnie stosowana, również w standardzie LTE.

Warty odnotowania jest fakt, że prace nad zoptymalizowaniem algorytmu wyznaczania FFT trwają nadal. 18 stycznia 2012r. amerykański uniwersytet Massachusetts Institute of Technology (MIT) upublicznił pracę [16], w której zaprezentowano algorytm sFFT („sparse” FFT co można tłumaczyć jako „rozrzucone” FFT). Pokazano, że jego złożoność obliczeniowa jest lepsza od „zwykłego” FFT o $O(N/\log_2 N)$, czego zestawienie pokazuje rys. 1. Tak wysoką efektywność uzyskano dzięki zauważeniu, że w każdym sygnale można rozpoznać składowe istotne i takie, które pominięte, a w zasadzie potraktowane w obliczeniach z mniejszą wagą i dokładnością, nie zmieniają zasadniczo przebiegu funkcji wynikowej. Na podstawie tej wiedzy dokonuje się podziału sygnału wejściowego na regiony, w taki sposób, aby zapewnić właściwe uwzględnienie składowych istotnych i wziąć pod uwagę wystarczająco dużo mniej istotnych. Nazwa algorytmu odnosi się do faktu, że w wielu przypadkach ok. 89% danych może być zaniedbanych, a co za tym idzie ważne fragmenty są bardzo „rozrzucone” w sygnale.



Rys. 2.8. (a) Czas przebiegu względem rozmiaru sygnału przy stałym (50) współczynniku rozrzucenia – dla porcji danych o rozmiarze do 2^{26} wydajność sFFT jest lepsza niż algorytmu liniowego; (b) Czas przebiegu względem współczynnika rozrzucenia – wykres obrazuje, jak szeroki jest zakres dla którego sFFT jest bardziej efektywny niż FFT [16]

Algorytm sFFT jest doskonałym przykładem na to, że rozwój (ewolucja) standardu LTE może odbywać się nie tylko na polu ulepszania specyfikacji, ale również przez nieustającą optymalizację tak, wydawałoby się, podstawowych i zbadanych zagadnień jak wyznaczanie transformaty Fouriera sygnału.

2.5.3. Podsumowanie OFDM

Multipleksacja OFDM wydaje się być odpowiedzią na potrzeby współczesnej transmisji, jednak jak wszystko, ma ona swoje wady i stawia inżynierom pewne wyzwania. Największym z nich wydaje się być kwestia transmisji wielodrogowej, występującej przede wszystkim w gęsto zaludnionych miastach (istotnych dla operatorów ze względu na możliwe przychody), oraz efekt Doppler'a, który utrudnia wspieranie transmisji dla szybko poruszających się użytkowników. Obydwa te zjawiska mają wpływ na zwiększanie niepożądanych ICI i ISI. Istnieją jednak metody przeciwdziałania im, o czym pisano wcześniej.

2.6. EESM - EFFECTIVE EXPONENTIAL SINR METRIC

2.6.1. Wprowadzenie

Wspólną cechą wszystkich systemów radiowych jest występowanie w kanale radiowym selektywnych zaników oraz zmienności warunków w czasie, które powodują znaczące różnicowanie poziomu SNR (stosunku sygnału do szumu), od którego zależy dostępna przepływność. Dlatego, aby móc w pełni korzystać z dostępnych zasobów stworzono technologię adaptacyjnego modulowania i kodowania (ang. Adaptive Modulation and Coding, AMC), której podstawowym celem jest takie dostosowywanie parametrów kodowania i modulacji do aktualnych warunków w kanale tak, aby uzyskać jak najwyższą przepływność w systemie, gdy sytuacja na to pozwala oraz niezawodność, gdy warunki są gorsze. W LTE w sposób szczególny wydajność zależy od właściwego doboru parametrów transmisji dla każdej z podnośnych.

W systemach LTE w łączu w dół, jedyną informacją od stacji użytkownika (UE – user equipment) jest CQI (Channel Quality Indicator – wskaźnik jakości kanału), przesyłany w formie indeksu MCS (Modulation Coding Scheme – schemat modulowania i kodowania) i opisujący pojedynczy blok zasobów (PRB). Indeks ten odpowiada progom SNR po stronie użytkownika. Na tej podstawie stacja bazowa (lub Relay) dobiera odpowiednie wartości kodu i modulacji. Istotny jest przy tym fakt, że standard LTE wymaga, aby wszystkie bloki dla użytkownika transmitowane były zgodnie z tym samym schematem. Kluczowe jest zatem właściwe podjęcie decyzji o doborze MCS dla każdego z użytkowników.

Należy zauważyć, że średnia wartość SNR dla danego bloku nie jest dostateczną informacją pozwalającą przewidzieć ilość błędów jaka wystąpi podczas jego transmisji (mowa o parametrze BLER – Block Error Rate). Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie techniki efektywnego mapowania SNR - ESM (Effective SNR Mapping), w której wartości SNR dla poszczególnych symboli w bloku mapowane są do jednej,

efektywnej wartości SNR. Najczęściej stosowanymi metodami są EESM (Exponential ESM) [17] oraz MIESM (Mutual Information ESM) [18]. W dalszej części rozdziału szczegółowo zostanie opisany EESM, jako wybrany w pracy sposób szacowania SNR.

2.6.2. Podstawy matematyczne

Do wyliczenia wartości efektywnego SNR dla wektora podkanałów o długości N i zaszumieniu w kanale równym SNR_i stosuje się wzór 2.2.

$$SNR_{eff} = -\beta * \ln \left[\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \exp \left(\frac{SNR_i}{\beta} \right) \right]$$

Wzór 2.2. Wartość efektywnego SNR

Został on wyprowadzony na podstawie nierówności Chernoff'a [19] dla stopy błędów niekodowanego sygnału BPSK (Binary Phase Shift Keying – binarnego z kluczeniem fazy). Matematyczne wykazanie poprawności wzoru 1. można odnaleźć w [20].

Modulacja	Kodowanie	Współczynnik β
QPSK	1/3	1.49
QPSK	1/2	1.57
QPSK	2/3	1.69
QPSK	3/4	1.69
QPSK	4/5	1.65
16QAM	1/3	3.36
16QAM	1/2	4.56
16QAM	2/3	6.42
16QAM	3/4	7.33
16QAM	4/5	7.68
64QAM	1/3	9.21
64QAM	1/2	13.76
64QAM	2/3	20.57
64QAM	3/4	25.16
64QAM	4/5	28.38

Tabela 2.1. Wartość współczynnika β zależnie od schematu modulacji i kodowania

Badania wykazały, że EESM może być stosowany dla wyższych modulacji i różnych kodowań przez uwzględnienie współczynnika β . Jest on kalibrowany przez zestawienie blokowej stopy błędów dla konkretnego systemu z referencyjną stopą błędów w kanale z tzw. białym addytywnym szumem gaussowskim AWGN (Additive White Gaussian Noise). Dobór współczynnika β znajduje się poza zakresem tej pracy inżynierskiej, dlatego wartości użyte

w niej pochodzą z [21]. Decyzja o takim uproszczeniu zapadła po przeanalizowaniu literatury tematu, w której proponowane wartości β nie odbiegają od siebie zbyt, a model z [21] jest proponowany jako uniwersalny dla LTE. Tabela 2.1. pokazuje zestawienie schematów MCS ze współczynnikiem β .

2.6.3. Idea działania

Działanie EESM polega na pobraniu wartości SNR poszczególnych podnośnych i wykorzystaniu funkcji wykładniczej do wyliczenia efektywnego SNR. Wartość tę zestawia się z krzywą wydajności bitowej dla szumu AWGN, gdyż udowodniono [3], że dobrze odwzorowuje ona łącze w systemach opierających się o OFDM.

Wyliczenie efektywnego SNR przebiega w następujących krokach: na początku wybieramy pewną wartość SNR, będącą pierwszym przybliżeniem zaszumienia w kanale. Korzystając z tabeli 2.2. wyznaczamy wartość MCS dla przyjętego SNR, a następnie pobieramy odpowiedni współczynnik beta z tabeli 2.1 na podstawie indeksu kodowania i modulacji.

SNR (dB)		Modulacja i kodowanie (MCS)
	SNR \leq 1,5	1/3 QPSK
1,5	< SNR \leq 3,8	1/2 QPSK
3,8	< SNR \leq 5,2	2/3 QPSK
5,2	< SNR \leq 5,9	3/4 QPSK
5,9	< SNR \leq 7,0	4/5 QPSK
7,0	< SNR \leq 10,0	1/2 16 QAM
10,0	< SNR \leq 11,4	2/3 16 QAM
11,4	< SNR \leq 12,3	3/4 16 QAM
12,3	< SNR \leq 15,6	4/5 16 QAM
15,6	< SNR \leq 17,0	2/3 64QAM
17,0	< SNR \leq 18,0	3/4 64QAM
18,0	< SNR	4/5 64QAM

Tabela 2.2. Mapowanie wartości SNR na schemat modulacji i kodowania Idea działania

W stworzonym programie jako wyjściową wartość SNR przyjmuje się 9dB, jako pozycję ze środka listy dla zoptymalizowania przeszukiwań dla jak największej liczby przypadków. Odpowiedni schemat modulacji w tym przypadku to 16QAM z kodowaniem 1/2. Po sprawdzeniu w tabeli 1 okazuje się, że szukaną wartością beta jest 4.56.

Wyznaczony współczynnik beta wykorzystujemy w obliczeniach zgodnych ze wzorem 1.

W ten sposób otrzymujemy SNR – kandydata. Sprawdzamy w tabeli 2 w którym zakresie mieści się wyliczona wartość i czy odpowiadające jej modulacja i kodowanie są takimi samymi jak te, na podstawie których wybierano współczynnik beta dla obliczeń (w przypadku gdy jest to pierwszy przebieg pętli wartością wzorcową jest 16QAM z kodowaniem 1/2). Algorytm kończy w tym miejscu działanie, jeżeli wartości te się zgodziły. W przeciwnej sytuacji powtarza się wyliczenie SNR efektywnego zgodnie ze wzorem 1. Wartość beta w takim przypadku wyznacza się na podstawie tabel 1 i 2 (jak w początkowym kroku algorytmu) przy czym za wartość wyjściowego SNR uznaje się tę wyznaczoną w poprzednim przebiegu pętli.

3. Stacje Relay

3.1. Wprowadzenie

Plany rozwoju standardu LTE zakładają stopniowe podnoszenie częstotliwości na jakiej ma odbywać się transmisja. Stawia to wiele wyzwań technicznych, chociażby ze względu na fakt, iż przesyłanie sygnałów na wyższych częstotliwościach wiąże się z większą ich podatnością na zakłócenia związane z brakiem bezpośredniej widoczności między anteną nadawczą i odbiorczą, co jest częstym zjawiskiem na terenach miejskich. Próba poradzenia sobie z taką sytuacją może być postulatem umieszczenia w sieci większej ilości stacji bazowych. Jednak, ze względu na ich wysoki koszt ustawienia, warto rozważyć bardziej innowacyjne rozwiązania.

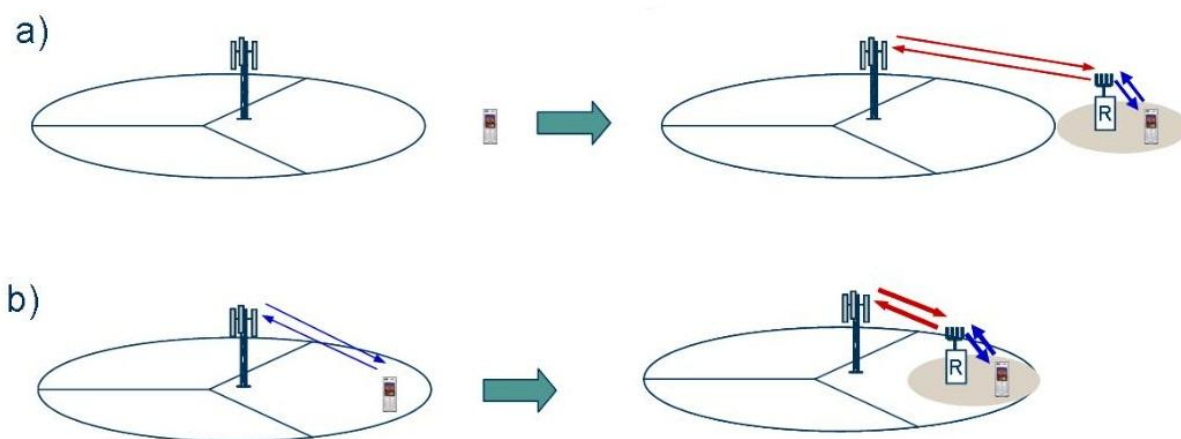
Użycie stacji relay zostało zaproponowane jako sposób osiągnięcia tych samych efektów co przy dodaniu dodatkowych stacji bazowych, jednak bez ponoszenia aż tak wysokich kosztów. Stacją relay (RS – Relay Station) nazywamy urządzenie przekąźnikowe o budowie podobnej do stacji bazowej, jednak nie posiadającej stałego podłączenia do sieci stałej (Core). RS odbiera dane od stacji bazowej, wzmacnia je, poprawia synchronizację i przesyła je dalej do użytkowników w swoim sąsiedztwie. Oznacza to, że stacja relay może być pod pewnymi względami traktowana jako kolejny, obok użytkowników końcowych, klient stacji bazowej [22].

Odpowiednie rozmieszczenie RS w komórce może znacząco poprawić jej wydajność zarówno w kontekście przepustowości jak i pokrycia. Ponieważ szacuje się, że nakłady jakie trzeba ponieść takiej stacji w sieci będą relatywnie niskie, należy traktować zagadnienie relay'ów jako potencjalny przedmiot komercjalizacji.

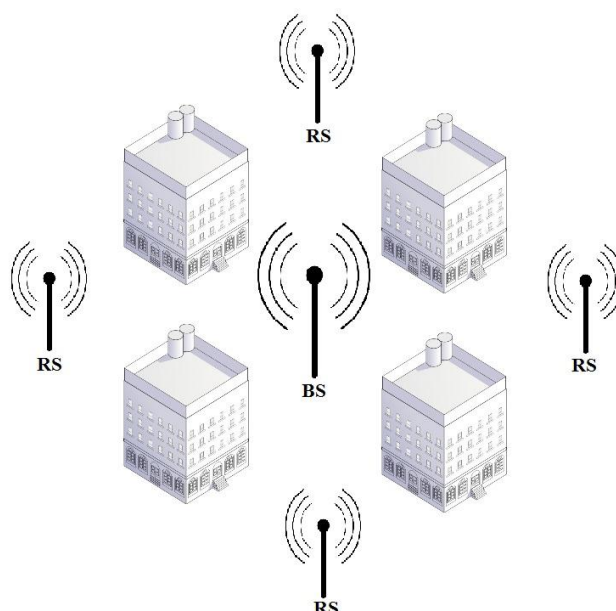
3.2. Zalety stacji relay

Korzyści jakie można osiągnąć z umieszczania stacji relay w sieciach można sprowadzić do następujących zagadnień:

- powiększenie obszaru pokrycia jednej komórki (rys 3.1a)
- zwiększenie pojemności komórki (rys 3.1b)
- pokrycie obszarów w inny sposób niedostępnych (rys 3.2).



Rys 3.1. Korzyści z umieszczania stacji relay w komórce a) powiększenie pokrycia, b) poprawa przepustowości [3]



Rys. 3.2. Pokrycie zasięgiem obszarów przesłanianych przez budynki

Powyższe przykłady odnoszą się do stacji stałych stacji relay, których miejsce postawienia jest dokładnie przeanalizowane na etapie projektowania sieci. Istnieją jednak również mobilne stacje relay, które wykorzystuje się raczej w sytuacjach nagłych lub mających charakter okresowy. Można za ich pomocą szybko odbudować łączność zerwaną np. w wyniku katastrofy, obsłużyć duże wydarzenie lub zapewnić wysoką jakość transmisji w środkach komunikacji publicznej.

Zadaniem stacji relay jest przekazywanie transmisji od stacji bazowej do użytkownika, w sytuacji, kiedy nie jest ona w stanie zapewnić wystarczająco dobrej jakości sygnału. Stałe położenie RS zapewnia, że komunikacja ze stacją bazową będzie odbywała się z wysoką przepływnością sygnału, co jest zaletą tego rozwiązania. Jednocześnie brak konieczności budowania przewodowych połączeń między dwoma stacjami ułatwia proces wznoszenia dodatkowych stacji, chociaż jednocześnie stanowi pewne wyzwanie optymalizacyjne. Skoro

łączność między RS a BS ma być zapewniana tym samym kanałem co transmisja użytkowników, to należy wyważyć ilość zasobów przeznaczanych dla obydwu typów przesyłu.

Istotnym zagadnieniem jest również podejmowanie decyzji, która ze stacji ma obsługiwać danego użytkownika. W zaproponowanym w niniejszej pracy modelu uwzględniono propozycję przedstawioną w [24], aby wyboru tego dokonywać na podstawie parametru stratności łącza między stacjami. Dla danego użytkownika wyznacza się dwie najbliższe geometrycznie stacje relay, wyznacza atenuację i porównuje się ją ze stratnością łącza między BS a użytkownikiem. Ostatecznie wybierana jest stacja, dla której jakość łącza jest najwyższa.

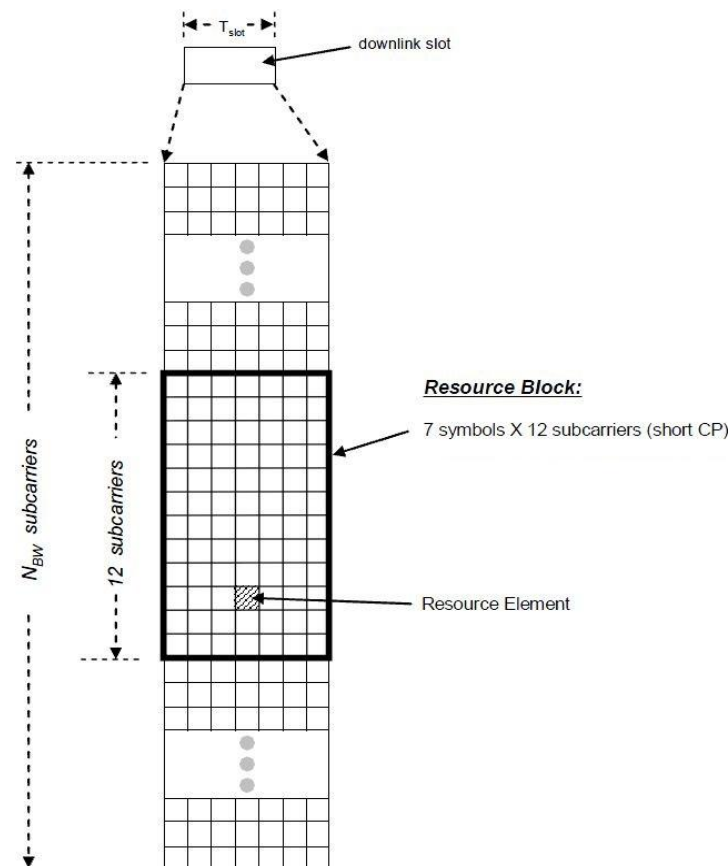
Ponieważ ciągle nie powstało komercyjne wdrożenie komórki LTE ze wspierającymi stacjami relay wnioski odnośnie ich efektywności i użyteczności można wysnuwać jedynie na podstawie badań teoretycznych i tworzonych w akademickich ośrodkach symulatorów. Aplikacja napisana w ramach tej pracy wpisuje się w tą dyskusję dając możliwość analizowania korzyści i ograniczeń wynikających ze stosowania tej technologii.

4. ZASOBY W LTE

Celem stosowania multipleksacji OFDM w łączu w dół w systemach LTE jest możliwość elastycznego przydzielania użytkownikom zasobów, tak, aby jak największej grupie z nich zapewnić wysoką przepływność i niskie opóźnienia. Pomimo iż same zasoby są dobrze zdefiniowane to zagadnienie optymalnego ich przydziału użytkownikom jest skomplikowanym zadaniem z wieloma zmiennymi.

4.1. ZDEFINIOWANIE ZASOBÓW W LTE

Jak to przedstawiono we wcześniejszym rozdziale, w dziedzinie czasu sygnał w LTE dzielony jest na ramki, sub-ramki i sloty czasowe. W dziedzinie częstotliwości mamy natomiast do czynienia z podnośnymi o szerokości 15 kHz. Zasób w LTE nazywany jest PRB (ang. Physical Resource Block) – Fizyczny Blok Zasobów i definiuje się go jako 12 podnośnych przydzielonych na czas 1 ms, czyli sub-ramki. Ponieważ jeden slot czasowy pozwala na przesłanie 7 symboli OFDM na jednej podnośnej, to jeden blok PRB daje możliwość transmisji $7 \times 2 \times 12 = 168$ symboli OFDM. Sumaryczna ilość bloków zasobów zależy od szerokości pasma systemu (tabela 6.2.).



Rys. 4.1. Zasoby w LTE

Bloki PRB mogą składać się z podnośnych sąsiadujących ze sobą, bądź rozmieszczonych losowo w paśmie. Pierwszy przypadek jest korzystniejszy gdy położenie użytkowników w komórce jest stałe bądź wolnozmiennie, druga sytuacja jest korzystniejsza gdy komórka obsługuje użytkowników poruszających się z dużą prędkością.

4.2. PRZYDZIAŁ PODNOŚNYCH UŻYTKOWNIKOM

Optymalny przydział zasobów użytkownikom jest kluczową kwestią dla efektywnego wykorzystania możliwości warstwy fizycznej systemu LTE. W tym temacie istotne są trzy kwestie – poziom zaszumienia konkretnych podnośnych oraz interferencje wynikające z wielokrotnego przydzielenia podnośnych różnym użytkownikom oraz współdzielenie zasobów.

Wąskopasmowe sygnały zakłócające podpasma pracy systemu to zjawisko wpływające na jakość transmisji we wszystkich sieciach bezprzewodowych. Całkowite ich wyeliminowanie w rzeczywistych systemach nie jest możliwe. Dlatego też w standardzie LTE przyjęto inną strategię – zamiast walczyć z nieuniknionym stacje bazowe starają się raczej dostosowywać do zastanej sytuacji. Gdy stacja odbiorcza użytkownika zaczyna doświadczać obniżenia jakości sygnału informuje o tym obsługującą ją stację bazową lub relay przesyłając odpowiedni współczynnik CQI. Na tej podstawie stacja dobiera niższą wartość kodowania i modulacji aby nawet w trudnych warunkach zapewnić łączność.

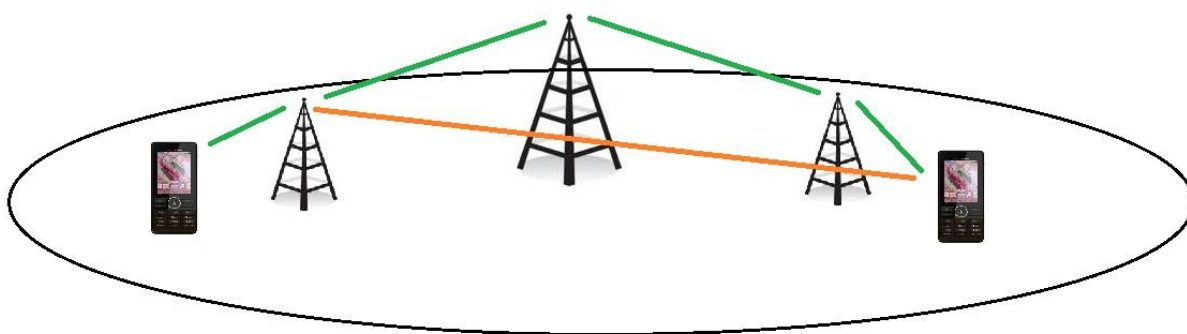
W każdej z komórek o dostęp do zasobów rywalizuje wielu użytkowników. W sytuacji gdy sieć jest przeciążona (suma zapotrzebowań przekracza dostępną przepływność) należy dokonać pewnych wyborów odnośnie tego kto będzie mógł dokonać transmisji. Często stosowaną w tym przypadku metodą jest rozpoczęcie przydzielania zasobów od użytkowników, których parametry kanału są najlepsze. Jest to forma obrony przed sytuacją, w której użytkownik o bardzo słabych parametrach łączy radiowego wykorzysta tak dużo zasobów z puli, że nikt poza nim nie będzie mógł dokonać transmisji. Efektywność takiego podejścia została zweryfikowana w rozdziale 7.2.

4.3. FREQUENCY REUSE

Przedstawiony w tym rozdziale opis koncentruje się na przedstawieniu zagadnienia Frequency Reuse dla pojedynczej komórki sieci LTE ze stacjami relay. Zagadnienie to w szerszej perspektywie opisane zostało np. w [25,26].

Ponieważ pasmo radiowe jest dobrem ograniczonym i kosztownym, sieci komórkowe implementują metody FR –(an. Frequency Reuse) czyli ponownego używania częstotliwości. Technika ta zostanie opisana na przykładzie komórki, której schemat przedstawiono na rys

4.2. Składa się ona ze stacji bazowej oraz dwóch stacji relay. Zdefiniujmy dla każdej ze stacji zbiór bloków PRB, którym dysponuje, tzn. może przydzielać je swoim klientom. W sytuacji, gdy metoda FR nie jest zaimplementowana dla każdej ze stacji zbiór bloków będzie zawierał wszystkie dostępne PRB. Oznacza to, że pojedynczy blok może być przydzielony do transmisji do wielu użytkowników w jednej sub-ramce. Taka sytuacja wiąże się z powstawaniem interferencji w systemie (rys. 4.2). Jest to zjawisko niepożądane, chociaż jednocześnie jeżeli interferujące ze sobą stacje znajdują się w dużej odległości od siebie, to taki schemat współdzielenia bloków zasobów jest bardzo wydajny pasmowo.



Rys. 4.2. Interferencje w komórce wielokrotnie wykorzystującej zasoby radiowe

Przykładem zaimplementowanej techniki FR jest sytuacja, w której dostępne pasmo dzielone jest na równe części (w omawianym przypadku na 3), a każda z nich jest przydzielana do dyspozycji jednej ze stacji. Umożliwia to uniknięcie interferencji wewnątrz komórki. Z drugiej jednak strony rozdzielanie bloków do dyspozycji stacji w sposób nieproporcjonalny do zapotrzebowań użytkowników przez nich obsługiwanych może doprowadzić do niekorzystnego układu, w którym komórka posiada wolne zasoby, a jednocześnie nie wszyscy użytkownicy są obsługiwani.

Zagadnienia związane z ponownym wykorzystywaniem częstotliwości powinny być analizowane łącznie z tematem sterowania mocą nadawania na podnośnych. To jednak wykracza poza zakres tej pracy. Dlatego w zrealizowanym programie zaimplementowano jedynie dwa opisane powyżej schematy współdzielenia częstotliwości.

5. OPTYMALNY PRZYDZIAŁ ZASOBÓW

Efektywne zarządzanie zasobami radiowymi może wymagać zastosowania różnych wyrafinowanych technik. Celem każdej z nich jest taki przydział bloków PRB użytkownikom, aby zmaksymalizować pewną funkcję celu. Najlepszą metodą znajdowania rezultatów optymalnych globalnie jest sformułowanie zadania optymalizacyjnego, które następnie może być rozwiązane za pomocą znanych metod. Należą do nich programowanie liniowe i całkowitoliczbowe oraz algorytmy heurystyczne. W niniejszej pracy zastosowano to ostatnie podejście. Związane jest to z faktem, że znalezienie funkcji opisującej, w sposób analityczny, zadanie przydziału zasobów w sieci komórkowej jest bardzo trudne, jeżeli nie niemożliwe. Przy próbie ujęcia tego zagadnienia opisem matematycznym napotyka się na zagadnienie nieliniowości w postaci funkcji logarytm (przy stosowaniu algorytmu EESM lub jakiegokolwiek innego służącego do wyznaczania przepływności na podstawie wartości SNR). Powoduje to, że problem nie jest rozwiązywalny za pomocą programowania liniowego ani całkowitoliczbowego i najlepszym podejściem stają się metody przybliżone.

Heurystyki są projektowane do znajdowania rozwiązań zadania optymalizacyjnego, bez konieczności, że znalezione rozwiązanie jest optymalne (lub nawet poprawne), ale dla większości przypadków dają one wyniki wystarczająco dobre. Decyzją projektową było zastosowanie w stworzonej aplikacji algorytmu symulowanego wyżarzania.

5.1. SYMULOWANE WYŻARZANIE

Algorytm symulowanego wyżarzania (ang. simulated annealing – SA) bazuje na obserwacjach poczynionych w metalurgii, gdzie kontrolowane schładzanie materiału wymusza stopniowe porządkowanie się wiązań i ogranicza końcową liczbę defektów. Początkowe podgrzanie stopu powoduje uwolnienie atomów z ich początkowych ustawień (lokalnych minimów) i umożliwia im swobodne wchodzenie na wyższe stany energetyczne. Proces powolnego wyżarzania zwiększa szanse znalezienia konfiguracji o energii większej niż początkowa.

Przez związek z fizycznym procesem algorytm symulowanego wyżarzania w każdym kroku stara się przeszukiwać konfiguracje bliskie aktualnej, w celu odnalezienia optymalnego stanu. Opis tego algorytmu przez analogię do metalurgii jest najbardziej intuicyjny i dlatego zostanie tu zastosowany.

Początkowy stan algorytmu wyznaczany jest w sposób losowy. Za stan w przypadku przydziału zasobów uważa się przyporządkowanie użytkownikom bloków PRB zgodnie z ich wymaganiami. Jeżeli w badanej komórce sieci LTE znajdują się stacje relay, to stan obejmuje również przydzielenie zasobów potrzebnych do transmisji danych między stacjami BA a RS. Generacja początkowego rozwiązania oznacza przydzielenie kolejnym użytkownikom z listy

dowolnie wybranych bloków PRB przy zachowaniu następujących ograniczeń: przydzielone zasoby powinny umożliwiać transmisję o przepływności równej co najmniej zapotrzebowaniu; jeżeli zapotrzebowanie jest spełnione to nie przydziela się dodatkowych zasobów; oraz jeżeli użytkownik jest obsługiwany jest przez stację relay, to należy przydzielić zasoby umożliwiające przesył danych między BS a RS. Początkowa temperatura układu jest wczytywana jako parametr algorytmu, a początkowa energia ma wartość równą wartości funkcji celu wyliczonej na danym rozwiązaniu.

Następne kroki wykonywane są w pętli, aż do osiągnięcia warunku stopu, którym może być osiągnięcie temperatury 0 (odpowiadającej zeru absolutnemu, dla którego ustaje ruch cząstek), bądź przekroczenie limitu kroków, które nie przyniosły znaczącej zmiany wartości funkcji celu. Najpierw w sposób losowy zmieniane jest rozwiązanie z przestrzeni rozwiązań. Jako przestrzeń tą określa się zbiór wszystkich możliwych przyporządkowań zasobów do użytkowników i stacji relay. Zmiana rozwiązania odbywa się przez zwolnienie jednego bloku PRB przyznanego do transmisji danych do użytkownika bądź do stacji relay. Następnie dokonywane jest sprawdzenie, czy którykolwiek klient komórki nie ma zrealizowanych swoich zapotrzebowań. Jeśli tak jest, to w miarę możliwości przyznawane mu są zasoby i jest to robione z zachowaniem ograniczeń określonych dla tworzenia rozwiązania, co ma zapewniać jego poprawność. Po raz kolejny wyliczana jest wartość funkcji celu, która jest przyjmowana za docelową z pewnym prawdopodobieństwem zależnym od aktualnej temperatury. Im jest ona niższa tym mniejsze szanse na przyjęcie gorszej wartości, ale gdy temperatura jest wysoka możliwe jest odejście od zasady monotoniczności (jak to pokazano na rys 5.1). Zwiększany jest licznik kroków wykonanych bez zmiany temperatury, a jeżeli dla danego kroku różnica między poprzednią a aktualną wartością energii jest mniejsza niż parametr określający zmianę jako nieznaczącą, to podnosi się również wartość licznika kroków bez znaczącej poprawy funkcji celu.



Rys. 5.1. Schemat symulowanego wyżarzania [27]

W momencie osiągnięcia maksymalnej dozwolonej liczby kroków bez zmiany temperatury, to jest ona obniżana. W zaimplementowanym rozwiązaniu schemat schładzania jest schematem Cauchy'ego, co oznacza, że zmiana temperatury jest proporcjonalna do $1/k$, gdzie k jest parametrem algorytmu.

Za ostateczne rozwiązanie przyjmuje się to, odpowiadające wartości energii w momencie osiągnięcia przez algorytm warunku stopu.

5.2 Określenie problemu optymalizacyjnego

Optymalnemu przydziałowi zasobów w LTE można nadać różne funkcje celu. Do najczęściej formułowanych należą:

- minimalizacja sumarycznej mocy emitowanej przez komórkę – niemożliwa do zrealizowania w stworzonym programie, ze względu na brak sterowania mocą
- maksymalizacja sprawiedliwego rozdziału zasobów – zwykle odbywa się to kosztem sumarycznej przepływności; kwestia tego jak definiować sprawiedliwość jest arbitralna
- minimalizacja prawdopodobieństwa blokady – dążenie do osiągnięcia sytuacji, w której jak najmniejsza liczba użytkowników będzie miała niespełnione swoje wymagania na przepustowość
- maksymalizacja sumarycznej przepływności w sieci – oferuje konkluzywne wyniki, umożliwiające dobrą analizę właściwości komórki, może jednak nie być najlepszym rozwiązaniem w rzeczywistych sieciach, ze względu na brak dążenia do spełniania wymogów „na styk”, co może w pewnych sytuacjach powodować, że użytkownik, który mógłby spełnić swoje wymagania dzięki blokowi PRB o niższej jakości,

rezerwuje zasób, który mógłby okazać się istotny np. dla kogoś o gorszych parametrach łączy.

Pomimo opisanych niedoskonałości, w opisanym programie zdecydowano się na poszukiwanie rozwiązania o czwartej z wymienionych właściwości. Jednocześnie jednak w aplikacji umieszczono wiele funkcji umożliwiających zbieranie statystyk odnośnie osiąganych rozwiązań, co umożliwia dobrą analizę stworzonego modelu.

6. Opis stworzonego systemu

Komplementarną częścią pracy jest program stworzony do rozwiązywania problemu optymalnego przydziału zasobów w LTE. Został on napisany w języku C#, w środowisku Visual Studio 2010 firmy Microsoft. Model stworzony na potrzeby tego programu uwzględnia zjawiska zachodzące w kanale radiowym i specyfikę sieci LTE. Trzeba jednak wziąć pod uwagę, że jak każdy model jest on pewnym uproszczeniem. W kolejnych podrozdziałach zostaną opisane decyzje projektowe podjęte podczas tworzenia programu.

6.1. MODEL KOMÓRKI SIECI

Stworzony model obejmuje jedną komórkę sieci LTE. Jej właściwości są zgodne ze standardem [28]. Tabela 6.1 zawiera zestawienie jej parametrów, które zostaną opisane w dalszej części podrozdziału.

Parametr		Założenie / wartość
Kształt komórki		Koło o zmiennym promieniu ze stacją bazową w geometrycznym środku
Rozmieszczenie Relay		Od 0 do 10 stacji rozmieszczonych promieniście w równej odległości od środka
Rozmieszczenie UE		Równomierne w całej komórce
Liczba UE		Od 1 do 200
Typ terenu		Podmiejski / wiejski
Atenuacja zależna od odległości		Najnowszy model z TS 36.942 v. 10.2.0 $L = 95.5 + 34.1 \cdot \log(R)$, gdzie R – odległość w km
Standardowe odchylenie szumu AWGN	BS do RS	6 dB
	RS do UE	10 dB
	BS do UE	8 dB
Pasma systemu		Zmienne, od 1.4 MHz do 20 MHz
Odstęp między podnośnymi		15 kHz
Rozmiar bloku zasobów		180 kHz (12 podnośnych)
Czas trwania sub-ramki		1.0 ms
Liczba symboli OFDM na jedną sub-ramkę		14
Minimalna odległość między użytkownikiem a BS		35 m

Parametr	Założenie / wartość
Minimalna odległość między RS a BS	70 m
Frequency reuse factor	1 lub równy liczbie sektorów
Wysokość anteny	45 m
Zysk anteny stacji (włączając stratę fidera)	15 dBi
Szum referencyjny	-64 dB
Maksymalna moc nadawania stacji	43 dBm lub 46 dBm, zależnie od szerokości pasma
Moc nadawania na pojedynczej podnośnej	Proporcjonalna do mocy stacji i szerokości pasma
Zysk anteny użytkownika	0 dBi
Typ ruchu	“Full buffer” do mierzenia przepustowości
Mapowanie SNR	Effective Exponential SNR Mapping
Modulacja	QPSK, QAM16, QAM64
Kodowanie	1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 4/5

Tabela 6.1. Zestawienie parametrów modelu komórki

Komórka ma kształt koła o zmiennym promieniu, ze stacją bazową w środku. Jest to pewne uproszczenie względem rzeczywistych komórek, których granice wyznacza zasięg sygnału. Dla postawionego w pracy zadania zbadanie wpływu stacji Relay na właściwości pojedynczej komórki nie wpływa to jednak znacząco na wnioski jakie można wysnuć z badań przeprowadzonych dzięki programowi. Byłoby to rzeczywiście istotne gdyby analizowano sieć składającą się z wielu komórek.

Pasmo [MHz]	PRB	Moc anteny po uwzględnieniu zysku [dBm]	Moc na podnośnej [dBm]
1,4	6	58	39,42
3	15	58	35,44
5	25	61	36,23
10	50	61	33,21
15	75	61	31,46
20	100	61	30,21

Tabela 6.2. Możliwe ustawienia szerokości pasma systemu

Celem pracy nie było badanie wpływu efektu przesłaniania na działanie LTE, więc decyzją projektową było przyjęcie modelu kanału radiowego dla terenu podmiejskiego

ze standardu [28]. Definiuje on wzór na atenuację zależną od odległości dla anteny o konkretnych parametrach, które uwzględniono w programie.

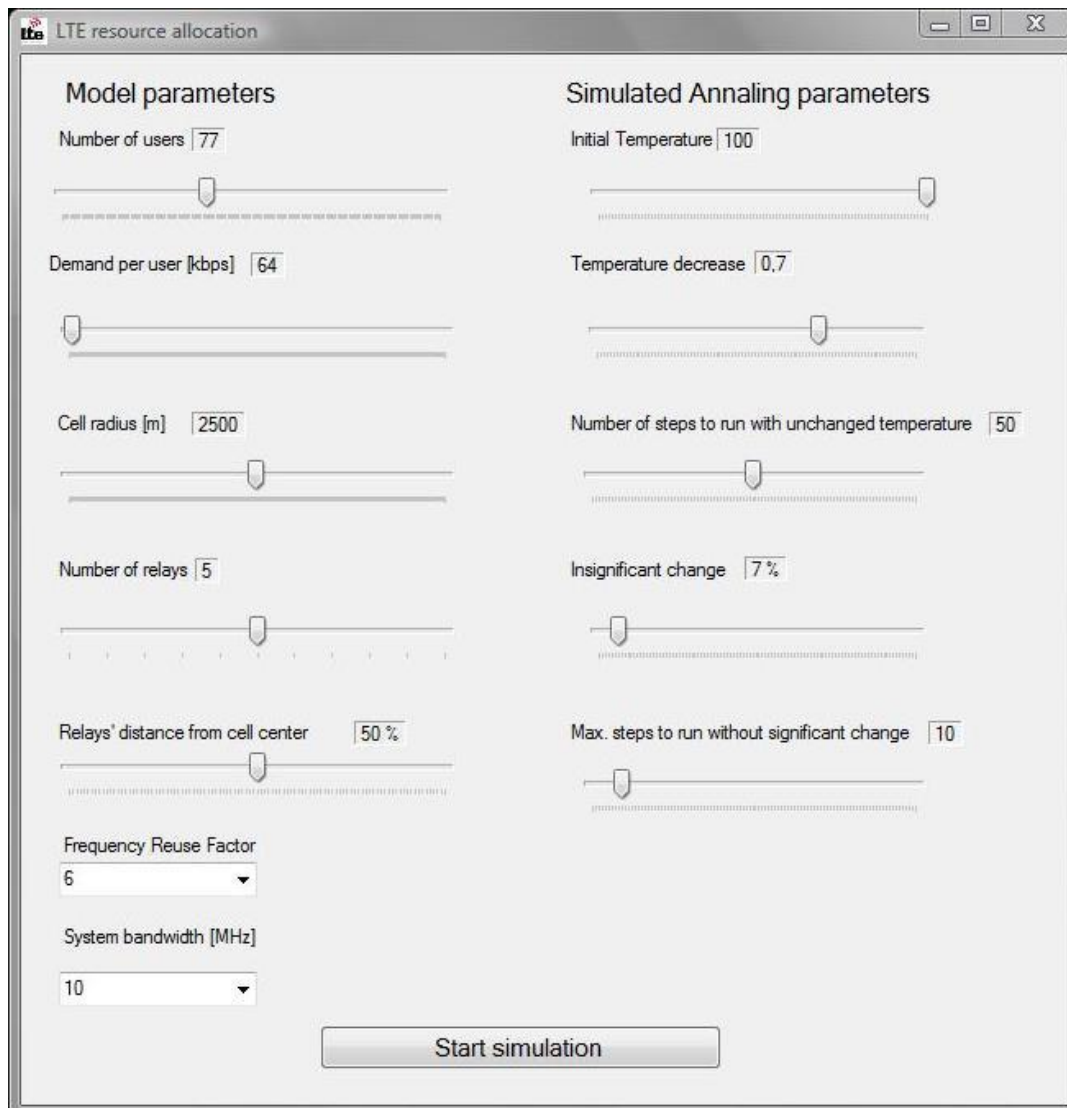
W pracy mamy do czynienia z trzema różnymi rodzajami łącz: bezpośrednie, łączy relay i wspierające. Dla każdego z nich standardowe odchylenie szumu różni się (wartości zgodne z tabelą 6.1) obrazując w ten sposób różne charaktery anten obsługujących te transmisje.

Wartą opisaną cechą systemu jest możliwość wyboru szerokości pasma. LTE udostępnia 6 możliwych schematów, których właściwości zostały zebrane w tabeli 6.2.

6.2. INTERFEJS UŻYTKOWNIKA

Język C# i środowisko Visual Studio umożliwiają wygodne tworzenie graficznego interfejsu użytkownika, co zostało wykorzystane przy tworzeniu programu. Osoba chcąc skorzystać z udostępnianych przez aplikację funkcji ma do dyspozycji zestaw kontrolki umożliwiających ustawienie wartości różnych parametrów (rys. 1). Są one podzielone na dwie kategorie: w jednej z nich znajdują się właściwości samego modelu LTE, w drugiej – dotyczące algorytmu symulowanego wyzarcia. Poszczególne parametry mają następujące znaczenie:

- Number of users – ilość użytkowników do rozmieszczenia w komórce
- Demand per user – wymagana przez użytkownika przepływność bitowa. Decyzja aby każdy z użytkowników żądał takiej samej przepływności miała zapewnić konkluzyność wyników.
- Cell radius – wyrażony w metrach promień komórki. Graniczna wartość to 5 km, co odwzorowuje sugerowany przez standard maksymalny rozmiar komórki LTE
- Number of relays – ilość stacji relay w komórce. Możliwa do ustawienia jest wartość 0
- Relays' distance from center – odległość stacji relay od środka. Wartość 100% oznacza umiejscowienie RS na granicy komórki, 50% w połowie między stacją bazową a granicą
- Frequency reuse factor – schemat ponownego użycia częstotliwości. Dostępne są dwa:
 - 1 – wszystkie stacje współdzielą dostępne zasoby
 - wartość równa ilości stacji relay + 1 – oznacza, że każda stacja może przydzielać swoim użytkownikom wszystkie zasoby z puli. Przy wyborze tego schematu uwzględniane są interferencje



Rys. 6.1. Interfejs użytkownika

- System bandwidth – szerokość pasma systemu, dostępne wartości i konsekwencje ich wyboru są zgodne z danymi z tabeli 6.2
- Initial Temperature – początkowa temperatura w symulowanym wyrażaniu
- Temperature decrease – wartość współczynnika „a” odpowiadającego za spadek temperatury w systemie
- Number of steps to run with unchanged temperature – liczba kroków do wykonania przed obniżeniem temperatury
- Insignificant change – wartość wyrażona w procentach określająca jaką zmiana uważana jest za nieznaczącą
- Max. steps to run without significant change – maksymalna ilość kroków jaką można wykonać bez znaczącej (większej niż „insignificant change”) zmiany wartości funkcji celu.

Dodatkowo użytkownik może ustawiać parametry odnoszące się do trybu zbierania wyników działania przez zmiany wartości w pliku konfiguracyjnym dołączonym do projektu. Uruchomienie obliczeń odbywa się przez naciśnięcie przycisku „Start simulation”.

Uzyskiwane wyniki zapisywane są do pliku output w formacie .xml (XML - Extensible Markup Language), który w sposób wygodny można zaimportować do arkusza kalkulacyjnego i tam przeanalizować otrzymane wartości.

7. Badania

7.1. WALIDACJA MODELU

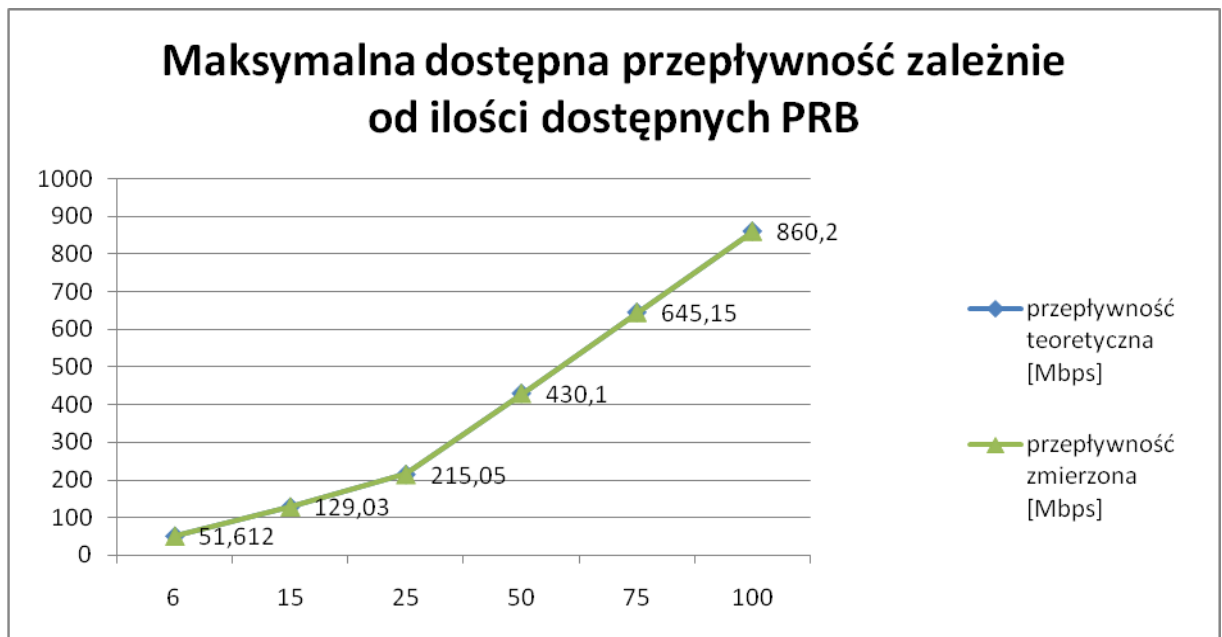
Złożoność systemu takiego jak LTE znacząco utrudnia stworzenie wiarygodnych i praktycznie użytecznych modeli analitycznych, z pomocą przychodzą zatem metody symulacyjne. Podobnie jest i w przypadku tworzonego w ramach pracy inżynierskiej programu. Ponieważ większość zjawisk zachodzących w komórce LTE ma charakter losowy, bardzo utrudnia to w pełni poprawną walidację modelu, gdyż kluczowe jego elementy, decydujące o ostatecznych wynikach, nie są opisywalne niedeterministycznym automatem skończonym.

Próba walidacji stworzonego systemu musi zatem polegać na czasowym usunięciu czynników zmiennych i sprawdzeniu jego działania w takich warunkach. W przypadku omawianego modelu podjęto próbę wyznaczenia przepływności w przypadku gdy każdy z użytkowników ma doskonałe warunki w kanale, a co za tym idzie na każdej z przydzielonych mu podnośnych można zastosować najwyższy schemat modulacji i kodowania. Zgodnie z założeniami opisanymi w tabeli 6.1. Maksymalna dostępna przepływność na jednym PRB wynosi zgodnie ze wzorem 7.1: $100 * 7 * 2 * 12 * 64 * 4/5 = 8602$ [kbps]. Zatem dla systemu z dostępnymi 100 blokami sumaryczna przepływność to 860200 kbps czyli 860,2 Mbps.

$$S = \sum_{l.bloków\ PRB} l.podramek * l.symboli\ w\ podramce * l.slotów * l.podnośnych \\ * \log_2\ wartość\ modulacji * kodowanie$$

Wzór 7.1. Ogólny wzór na przepływność w systemie

Podczas badania systemu ustawiono czasowo wartość szumu referencyjnego na -1000 dB, co zapewniło, że wartość współczynnika SNR była dla wszystkich podnośnych bardzo wysoka (powyżej 900). Zgodnie z tym co zapisano w rozdziale 2.7. dotyczącym sposobu wyznaczania przepływności zależnie od wartości SNR powinno się dzięki temu uzyskać maksymalną dostępną przepływność. W interfejsie programu wybrano maksymalną liczbę użytkowników i maksymalne zapotrzebowania. Stacje relay nie zostały uwzględnione w tym badaniu (ich ilość ustawiono na „0”), gdyż konieczność zapewnienia łączności między nimi uniemożliwiałaby uzyskanie maksymalnej dostępnej dla użytkowników przepływności, a samo przypisywanie użytkowników do stacji relay zależy od losowego czynnika (położenia tych dwóch względem siebie). Wyniki uzyskane w sposób teoretyczny i za pomocą testów zestawiono na wykresie 7.1.



Wykres 7.1. Maksymalna przepływność zależnie od ilości dostępnych PRB

Jak można odczytać z wykresu x wartości wyliczone i wyznaczone przy pomocy aplikacji są identyczne, co potwierdza jej poprawność działania w tym zakresie.

7.2. LOSOWE PRZYDZIELANIE ZASOBÓW UŻYTKOWNIKOM

W ramach inicjalizacji systemu użytkownicy są rozmieszczani losowo w obszarze całej komórki, wyznaczana jest stratność łącza między nimi a stacją do której są podłączeni, a następnie są oni sortowani rosnąco względem wartości stratności łącza. Dzięki temu na początku listy znajdują się użytkownicy o najlepszych parametrach łącza, co przekłada się na fakt, że do zrealizowania swoich zapotrzebowań potrzebują oni mniej zasobów. Jeżeli przydział dostępnych zasobów zaczniemy właśnie od nich, to zmniejszamy prawdopodobieństwo blokady (sytuacji, w której nie może mieć zrealizowanych swoich zapotrzebowań), albowiem wykluczamy sytuację, w której pierwszy obsługiwany użytkownik ma tak niską jakość łącza, że żeby zrealizować jego wymagania musimy przydzielić mu wszystkie dostępne zasoby.

Dla wartości komórki jak w tabeli x, przeprowadzono po 10 przydziałów zasobów, w dwóch wariantach – gdy sortowanie podczas inicjalizacji było włączone i wyłączone.

Ilość użytkowników	zapotrzebowanie [kbps]	promień komórki [m]	pasmo systemu [MHz]	ilość relay	schemat FR
100	1000	2000	20	0	1

Tabela 7.2. parametry badanej komórki

Wyniki tych badań przedstawia tabela 7.2. Jak można z niej odczytać, dla użytkowników posortowanych średnia sumaryczna przepływność jest o prawie 12 Mbps wyższa, co potwierdza przypuszczenia na ten temat. Niska wartość standardowego odchylenia dla przypadku, w którym użytkownicy nie byli uporządkowani przed rozpoczęciem przydzielania wynika z faktu, iż często pojawiała się tu wartość przepływności równa 22,4 Mbps. Jest to minimalna przepływność dla systemu o paśmie 20 MHz (najniższy schemat modulacji i kodowania to QPSK 1/3).

	użytkownicy posortowani	użytkownicy nieposortowani
średnia	38,202	24,661
odchylenie standardowe	9,054	4,265

Tabela 7.2. Przepływność mierzona w Mbps dla losowego przydziału zasobów użytkownikom gdy są oni posortowani względem atenuacji i w przypadku przeciwnym
 Uzyskane wyniki pokazują, iż wstępne sortowanie jest dobrym sposobem poprawiania jakości początkowego rozwiązywania dla algorytmu symulowanego wyżarzania.

7.3. BADANIE WPŁYWU ILOŚCI KROKÓW ALGORYTMU SYMULOWANEGO WYŻARZANIA NA OSIĄGANE WYNIKI

Działanie algorytmu symulowanego wyżarzania polega na systematycznej poprawie osiągniętych rezultatów. Stopień tej poprawy w dużej mierze powinien zależeć od ilości kroków jakie mógł on wykonać. Parametry komórki dla której wykonano te pomiary znajdują się w tabeli 7.2

Ilość użytkowników	zapotrzebowanie [kbps]	promień komórki [m]	pasmo systemu [MHz]	ilość relay	schemat FR
100	1000	3000	20	0	1

Tabela 7.2. parametry badanej komórki



Wykres 7.2. Zależność sumarycznej przepływności systemu od ilości wykonanych kroków algorytmu symulowanego wyżarzania

Istnieje pozytywna korelacja pomiędzy ilością wykonanych przez algorytm symulowanego wyżarzania kroków a poprawą otrzymywanego rozwiązania, co świadczy dobrze o zaimplementowanym modelu.

7.4 BADANIE WPŁYWU PARAMETRU „INSIGNIFICANT CHANGE”

Parametr „insignificant change” określa warunek stopu dla algorytmu symulowanego wyżarzania. Jego znaczenie polega na tym, że porównuje się z nim różnicę procentową między rozwiązaniem poprzednim a aktualnym. Jeżeli różnica ta jest mniejsza niż wartość parametru, to zwiększany jest licznik odpowiadający za maksymalną liczbę kroków do wykonania bez znaczącej zmiany. Przekroczenie granicznej wartości tego licznika skutkuje zakończeniem działania algorytmu.

Dzięki takiemu sformułowaniu warunku stopu gwarantuje się, że algorytm heurystyczny nie będzie dążył do czasochłonnego poprawiania wyniku o nieznaczącą wartość.

Badanie zostało wykonane dla komórki o parametrach podanych w tabeli 7.3

Ilość użytkowników	zapotrzebowanie [kbps]	promień komórki [m]	pasmo systemu [MHz]	ilość relay	schemat FR
100	750	3000	20	4	1

Tabela 7.3. parametry badanej komórki

Wykres 7.3 obrazuje otrzymane wyniki. Można z niego odczytać, że dla wartości parametru powyżej 3% osiągnięta sumaryczna przepływność zaczyna maleć i dla wartości 100% jest porównywalna z przepływnościami osiąganymi dla czysto losowego przydziału zasobów.



Wykres 7.3 Wpływ parametru „insignificant change” na przepływność

Z wyników tych można wnioskować, że większość zmian wartości funkcji celu nie przekracza jej 3-5% wartości. Dobrze odwzorowuje to model, w którym różnica między dwoma sąsiednimi stanami algorytmu zależy od zwolnienia tylko jednego bloku PRB.

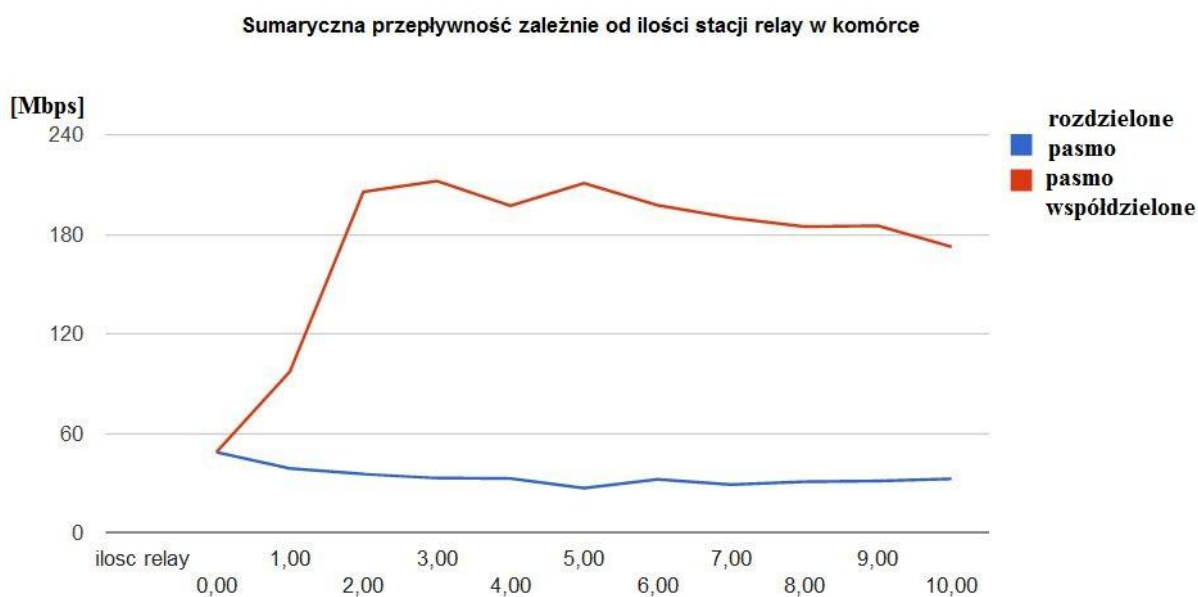
Jeżeli zatem parametr odpowiadający za określenie nieznaczącej zmiany ma wartość porównywalną do zmian zachodzących w systemie, to poprawia on działanie algorytmu. Jeśli jednak parametr ten jest zbyt duży, to nawet istotne dla modelu odchylenia nie są traktowane jako znacząco podnoszące jakość rozwiązania, co prowadzi do przedwczesnego zakończenia działania algorytmu.

7.5. BADANIE WPLYWU LICZBY STACJI RELAY NA SUMARYCZNĄ PRZEPŁYWNOŚĆ

Jedną z najistotniejszych kwestii przy umieszczaniu w komórce stacji typu relay jest analiza, mająca odpowiedzieć na pytanie jakie będą skutki takiej decyzji. Korzystając ze stworzonego programu zbadano wpływ ilości stacji relay w komórce na jej sumaryczną przepływność. Co więcej, zestawiono ze sobą również dwa schematy FR (Frequency Reuse). Dla uproszczenia określono je mianem pasma rozdzielonego, gdy każda ze stacji otrzymuje równą część zasobów, które może rozdzielać między użytkowników, oraz pasma współdzielonego, gdy każda ze stacji mogła dysponować całym pasmem systemu, jednak każdy zasób był narażony na interferencje ze strony innych stacji. Parametry badanej komórki umieszczono w tabeli 7.3.

ilość użytkowników	zapotrzebowanie [kbps]	promień komórki [m]	pasmo systemu [MHz]	ilość relay	schemat FR
150	300	4000	20	zmienna	zmienny

Tabela 7.4. parametry badanej komórki



Wykres 7.4. Sumaryczna przepływność w zależności od ilości stacji relay w komórce

Jak można odczytać z wykresu 7.3. sumaryczna przepływność dla komórki ze stacjami relay posiadającymi rozdzielone zasoby nieznacznie się degraduje wraz ze wzrostem liczby RS. Wynika to z faktu, że ilość dostępnych w takiej komórce zasobów nie zmienia się, rośnie natomiast liczba klientów do obsłużenia – każda transmisja między RS a BS wymaga dostarczenia pewnej przepływności. Jednocześnie jednak dla wielu klientów podłączonych do stacji relay poprawia się jakość łącza dostępowego, dzięki czemu dla zrealizowania tej samej ilości zapotrzebowań potrzebują oni mniej zasobów.

Czerwonym kolorem na wykresie 7.3. oznaczono wartości sumarycznej przepływności dla komórki ze stacjami relay współdzielącymi pasmo. Zauważyć można, że umieszczenie w sieci do dwóch stacji relay znacząco poprawia wydajność komórki. Oznacza to, że algorytm symulowanego wyżarzania był w stanie tak przydzielić zasoby, żeby interferencje nie zaszkodziły transmisji. Dodanie więcej niż dwóch stacji relay powoduje efekt podobny jak w poprzednim przypadku – korzyści związane ze stawianiem stacji relay równoważą się ze skutkami negatywnymi.

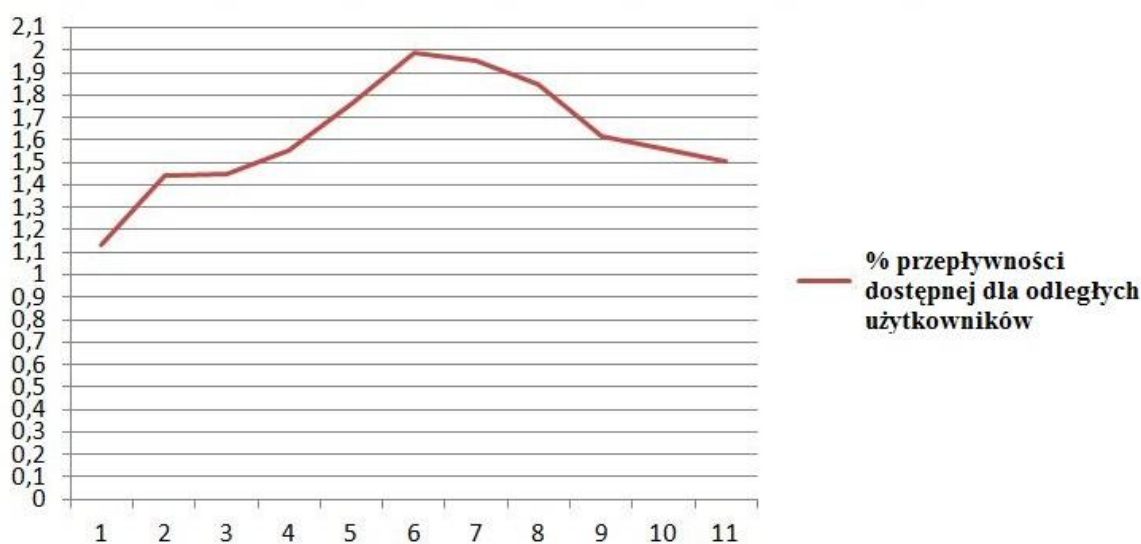
Wnioskiem, jaki należy wyciągnąć z tych wyników, jest to, że umieszczanie dodatkowych stacji relay w komórce wiąże się z pewnymi obciążeniami dla sieci, więc należy zbadać czy w przypadku konkretnej instalacji koszty te nie zrównoważą się z zyskami jakie planowano osiągnąć.

7.6. BADANIE PRZEPLYWNOŚCI DLA UŻYTKOWNIKÓW ZNAJDUJĄCYCH SIĘ DALEKO OD ŚRODKA KOMÓRKI

Stworzony program udostępnia funkcję wyliczania sumarycznej przepływności jaką mają przydzieleni użytkownicy znajdujący się najdalej od środka komórki. Obliczenia wykonano dla 10% użytkowników znajdujących się przy brzegu komórki, której parametry znajdują się w tabeli 7.4. Warto dodać, że dla każdego z przeprowadzonych obliczeń stacje relay znajdowały się w odległości 1,25 km od środka.

ilość użytkowników	zapotrzebowanie [kbps]	promień komórki [m]	pasma systemu [MHz]	ilość relay	schemat FR
200	200	2500	15	zmienna	rozdzielone

Tabela 7.5. parametry badanej komórki



Wykres 7.5. Procent przepustowości dostępnej dla najdalszych użytkowników w zależności od ilości stacji relay w komórce

Wartości przedstawione na wykresie 7.4. mają wymiar punktów procentowych, wyrażających ilość dostępnej przepływności dla najodleglejszych użytkowników. Jak można zauważyć różnica między komórką obsługiwaną jedynie przez BS, a komórką w której znajduje się 6 stacji relay jest prawie dwukrotna. W liczbach bezwzględnych użytkownicy tak odlegli otrzymują niewiele zasobów, tym bardziej więc istotny jest ten znaczny wzrost dostępnej przepustowości.

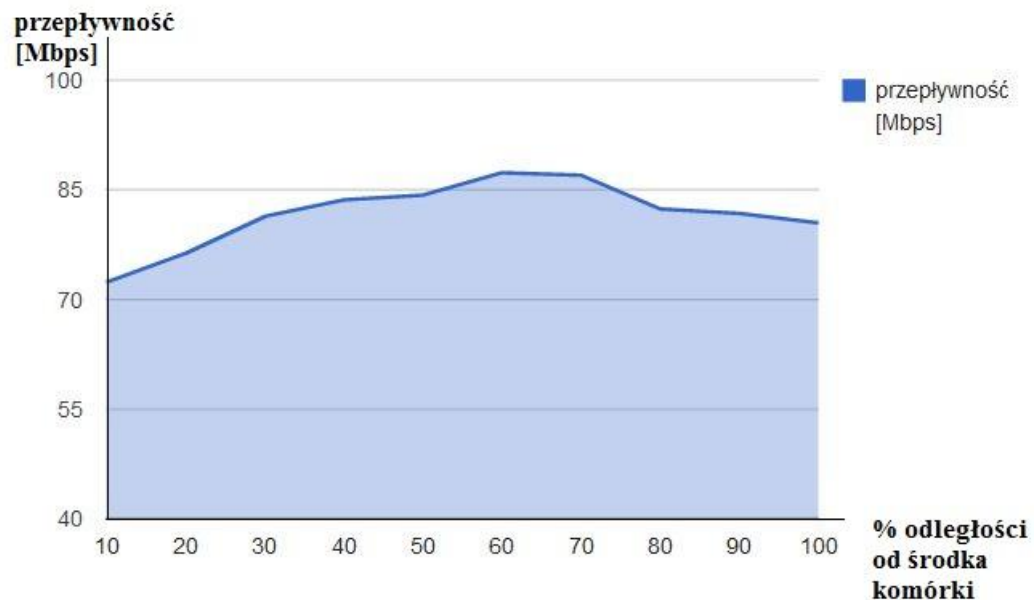
Dla komórek w których umieszczono więcej niż 7 RS wyznaczany współczynnik wyraźnie się pogarsza, co należy tłumaczyć ogólnym przeciążeniem sieci wywołanym dostawieniem tak dużej ilości klientów. Jednak nawet w najbardziej niekorzystnym przypadku stacje relay podnoszą pokrycie komórki.

7.7 WPLYW ODLEGŁOŚCI STACJI RELAY OD ŚRODKA KOMÓRKI NA SUMARYCZNĄ PRZEPIYWNÓŚĆ

Bardzo ważną kwestią przy projektowaniu komórki sieci wspomaganej stacjami relay jest podjęcie decyzji odnośnie miejsca położenia dodatkowych stacji RS. Za pomocą stworzonego programu zbadano to zagadnienie. Właściwości komórki znajdują się w tabeli 7.6

ilość użytkowników	zapotrzebowanie [kbps]	promień komórki [m]	pasmo systemu [MHz]	ilość relay	schemat FR
200	200	3000	10	4	współdzielone

Tabela 7.6 Parametry badanej komórki



Wykres 7.6 wpływ odległości stacji relay od środka komórki na sumaryczną przepływność

Jak można odczytać z wykresu 7.6, w którym zebrano uzyskane wyniki, optymalna odległość stacji relay od środka komórki wynosi między 60 a 70 % jej promienia. Można to wiązać z faktem, że stacje położone zbyt blisko centrum nie wspierają wystarczająco dobrze użytkowników znajdujących się na brzegach komórki, natomiast umiejscowienie relay'a zbyt daleko obniża jakość jego łącza ze stacją bazową, przez co potrzeba zarezerwować dużo zasobów na transmisję między tymi punktami, co kłóci się z założeniami.

8. PODSUMOWANIE

W pracy opisano standard LTE, jego techniczne podstawy, ze szczególnym uwzględnieniem techniki multipleksacji OFDM, a także nakreślono zagadnienia związane z umieszczaniem w sieci LTE stacji relay. Przedstawiono założenia odnośnie przydziału zasobów użytkownikom sieci oraz zaprezentowano wyniki rozwiązywania zadania optymalnego przydziału tych zasobów uzyskane za pomocą stworzonego programu.

W teoretycznych rozważaniach pokazano zalety sieci LTE jako odpowiedzi na wymagania współczesnej komunikacji mobilnej. Natomiast przeprowadzone badania pokazują, że umieszczanie stacji relay w komórce jest faktycznie dobrą metodą podnoszenia jej przepustowości i pokrycia.

Najistotniejszym z wniosków, jakie można wyciągnąć na podstawie otrzymanych wyników, jest stwierdzenie, że schemat współdzielenia częstotliwości (Frequency Reuse) użyty w komórce wspieranej relay'ami w sposób jednoznaczny determinuje jaką wartość dodać wnosząc stacje RS.

Zastrzec w tym miejscu należy, że w pracy tej, tak jak przy tworzeniu każdego modelu, dokonano pewnych uproszczeń, które sprawiają, że otrzymane wyniki liczbowe należy traktować raczej jako trendy niż dokładne punkty odniesienia. Jednocześnie warto podkreślić, że stworzony program, choć aktualnie oferuje ograniczoną liczbę funkcji, jest dobrym narzędziem do badania zagadnień przydziału zasobów i stacji relay w LTE. Praca ta stanowi dobry punkt wyjścia do dalszych badań, chociażby w ramach pracy magisterskiej.

Istnieje wiele aspektów rozmieszczania stacji relay, które zostały tu jedynie wspomniane, zasługują jednak na pogłębioną analizę. Perspektywy rozwoju niniejszej pracy obejmują między innymi zagadnienia kolejowania (ang. scheduling), uszczegółowienie modelu kanału radiowego, bądź zbudowanie na podstawie istniejącego programu symulatora pakietowego dla LTE.

9. BIBLIOGRAFIA

1. 3rd Generation Partnership Project „Technical Specification Group Radio Access Network Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 8)”
2. “Relays, Base Stations, and Meshes: Enhancing Mobile Networks with Infrastructure” N. Banerjee, M. D. Corner, D. Towsley, B. N. Levine; Department of Computer Science, University of Massachusetts
3. “Optimal Power Masking in Soft Frequency Reuse based OFDMA Networks” M. Bohge, J. Gross, A. Wolisz; In. Proc of the European Wireless Conference 2009,
4. “Radio Resource Allocation for Cellular Networks Based on OFDMA with QoS Guarantees” S. Pietrzyk, G.J.M. Janssen; IEEE Communications Society, Globecom 2004
5. http://www.ericsson.com/news/110922_danish_tv2_lte_live_coverage_244188809_c
6. „LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice” S. Sesia, I. Toufik, M. Baker; Wiley, 2009
7. <http://lteworld.org/report/lte-network-commitments-132-operators-56-countries-are-now-investing-lte>
8. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25321.htm>
9. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25306.htm>
10. „LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access” H. Holma, A. Toskala, ISBN-13: 978-0470994016
11. „Cofdm: An Overview”, Z. William, Y. Yiyang Wu, IEEE Transactions On Broadcasting, Vol. 41, No. 1, marzec 1995
12. “The AN/GSC-10 (KATHRYN) variable rate data modem for HF radio” M. Zimmerman, A. Kirsch; IEEE Trans. Comm. vol. COM-15, pp. 197-205, kwiecień 1967
13. „Cyclic Prefixed OQAM-OFDM and its Application to Single-Carrier FDMA” X. Gao, W. Wang, X. Xia, E. K. S. Au, X. You, IEEE VOL. 59, NO. 5, Maj 2011
14. <http://zone.ni.com/cms/images/devzone/tut/a/bdc8dcae1317.gif>
15. <http://zone.ni.com/cms/images/devzone/tut/a/bdc8dcae1318.gif>
16. „Simple and Practical Algorithm for Sparse Fourier Transform” H. Hassanieh, P. Indyk, D. Katabi, E. Price, MIT, styczeń 2012, <http://groups.csail.mit.edu/netmit/sFFT/paper.pdf>
17. „EESM Based Link Error Prediction for Adaptive MIMO-OFDM System” H. Liu, L. Y Cai, H. W. Yang, IEEE 65th Vehicular Technology Conference, 22-25 kwietnia 2007
18. “PRACH simulation assumptions,” 3GPP TSG-RAN WG4 Meeting #46bis, Shenzhen, Chiny, 31.03-4.04 2008

19. „More Chernoff Bounds, Sampling, and the Chernoff + Union Bound method” kurs „Probability and Computing”, Uniwersytet Princeton, New Jersey USA, jesień 2009
20. „System-level evaluation of OFDM – further considerations”, Ericsson, 2GPP TSG-RAN WG-1 #35, R1031303, 2003
21. „Research on the Modulation and Coding Scheme in LTE TDD Wireless Network” Ch. Yu, W. Xiangming, L. Xinqi, Z. Wei, International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, 2009
22. „Relaying concepts and supporting actions in the context of Concept Groups” D. Schultz, L. Coletti, K. Navaie, M. Wodczak, P. Rost, IST-4-027756 WINNER II
23. „Frame Allocation and Scheduling for Relay Networks in LTE Advanced Standard” S. Roth, LiTH-ISY-EX—10/4327—SE
24. „Relay implementation in WiMAX system level Simulator” S. Mumtaz, R. Lee, Tham Tu Sadeghi, A. Gameiro, 978-1-4244-4615-5
25. „LTE: the evolution of mobile broadband” D. Astely, E. Dahlman, A. Furuskar, Y. Jading, M. Lindstrom, S. Parkvall; ISSN: 0163-6804
26. „Optimal Fractional Frequency Reuse (FFR) in Multicellular OFDMA System” M. Assaad, ISBN: 978-1-4244-1721-6
27. <http://ashakhov.files.wordpress.com/2011/01/6725437-0-large.jpg>
28. 3GPP TS 36.942 v. 10.2.0