



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ФАКУЛТЕТ ПО ТЕЛЕКОМУНИКАЦИИ
КАТЕДРА „КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ“

маг. инж. Николай Георгиев Данданов

**МЕТОДИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ПРОПУСКАТЕЛНАТА
СПОСОБНОСТ И КАЧЕСТВОТО НА ПРЕДАВАНЕ В ОБЛАЧНИ
МРЕЖИ ЗА РАДИО ДОСТЪП**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за присъждане на образователна и научна степен
„ДОКТОР“**

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3. Комуникационна и компютърна техника

Научна специалност: Комуникационни мрежи и системи

Научни ръководители: проф. д-тн инж. Владимир Костадинов Пулков,
доц. д-р инж. Павлина Христова Колева

София, 2020

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Комуникационни Мрежи“ към Факултет по Телекомуникации при Технически Университет – София на редовно заседание, проведено на 01.06.2020 г. (протокол № 7).

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 05.10.2020 г. (понеделник) от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед №ОЖ-5.3-14/17.06.2020 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р инж. Георги Илиев — председател
2. Проф. д-р инж. Владимир Пулков — научен секретар
3. Проф. д-р инж. Розалина Димова
4. Доц. д-р инж. Валентина Маркова
5. Доц. д-р инж. Габриела Атанасова

Рецензенти:

1. Проф. д-р инж. Георги Илиев
2. Проф. д-р инж. Розалина Димова

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се във Факултет по Телекомуникации, блок 1, стая 1254, и на Интернет страницата на Технически Университет – София.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Комуникационни Мрежи“ на Факултет по Телекомуникации. Изследванията по дисертационния труд са направени от автора, като резултатите от тях са публикувани. Част от изследванията са вследствие на работата по научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Николай Георгиев Данданов

Заглавие: Методи за повишаване на пропускателната способност и качеството на предаване в облачни мрежи за радио достъп

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Непрекъснатото развитие на телекомуникационните мрежи е свързано с постоянно увеличаване на пропускателната способност [1]. Внедряването на безжични комуникации за предаване на гласови съобщения и данни нараства експоненциално, а нуждите от по-високи скорости на безжичен Интернет и броят на потребителските терминали (User Equipment, UEs) ще продължават да се увеличават в бъдеще, което се дължи главно на видео предаването на живо и концепциите за Интернет на нещата (Internet of Things, IoT) и Интернет на всичко (Internet of Everything, IoE), свързващи милиони хора и милиарди машини [1].

Мрежата за радио достъп (Radio Access Network, RAN) е тази част от мобилната мрежа, която еволюира най-интензивно, за да задоволи нарастващите изисквания. Пред RAN стоят редица предизвикателства, като предоставяне на все по-голяма гъвкавост и взаимна съвместимост [7], необходимостта да бъде софтуерно-дефинирана и виртуализирана [8] с все по-висока енергийна ефективност, допринасяйки за развитието на т.нар. „зелени“ комуникации [9, 10]. Поради тези съображения, аспектите на подобряването както на пропускателната способност, така и на качеството на предаване, са от ключово значение за това мрежите от следващите поколения да отговарят адекватно на изискванията на потребителите и да бъдат актуални.

Изхождайки от това, акцентите на дисертационния труд са насочени върху разработването, анализа и изследването на нови методи, базирани на технологии и подходи за електрическо управление на наклона на антените, формиране на лъча и предаване и приемане с масивни антенни структури (massive Multiple Input Multiple Output, massive MIMO), чиято цел е да се повишат пропускателната способност и качеството на предаване в мрежи за радио достъп с традиционна, облачна и мъглова архитектура.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е *да се разработят нови методи*, базирани на технологии за електрическо управление на наклона на антените, формиране на лъча и massive MIMO, *за повишаване на пропускателната способност и качеството на предаване в мрежи за радио достъп с традиционна, облачна и мъглова архитектура*.

Въз основа на направения в първа глава литературен обзор и на проведения анализ, за успешното постигане на целта на дисертацията следва да бъдат решени следните задачи:

1. Да се предложи, разработи и изследва метод за самооптимизация на капацитета и покритието на мобилна мрежа чрез управление на наклона на антените на базовите станции (Base Stations, BSs) по електрически път (Remote Electrical Tilt, RET), който да е адаптивен спрямо разпределението на потребителите.
2. Да се предложат методи за повишаване на пропускателната способност на RAN, отчитайки характеристиките на потребителите и прилагайки ефективни решения за йерархично формиране на лъча в мъгловата мрежа за радио достъп F-RAN (Fog computing-based RAN).
3. Да се предложат и разработят методи и алгоритми за ефективна оценка на каналите в massive MIMO системи с разделяне на посоките на предаване по честота (Frequency-Division Duplexing, FDD) с ниска изчислителна сложност.

Методологията на изследванията в дисертацията включва използване на аналитичен, теоретичен и симулационен подходи. Аналитичният подход е приложен при дефиниране на основни параметри и извеждане на функционални зависимости, свързани с пропускателната способност и качеството на предаване, а чрез теоретичния подход се разработват подходи и алгоритми за тяхното повишаване. Посредством симулационния подход се верифицират направените теоретични допускания и ефективността на предложените решения, реализирани в изчислителните среди Jupyter Notebook с програмния език Python и MATLAB.

Научна новост

В дисертационния труд са изследвани подходи и са предложени нови методи и алгоритми за подобряване на спектралната и енергийната ефективност на RAN, което би довело до повишаване както на пропускателната способност, така и качеството на предаване. Разработени са методи за самооптимизация на капацитета и покритието на мобилна мрежа, и подход с изграждане на потребителски топлинни карти и проактивно управление на наклона на антената в плътни и динамични хетерогенни RAN, базирано на невронни мрежи. Предложен е подход за намаляване на ресурсите за нулиране на смущенията чрез вдвояване на смущаваните потребителски терминали и прилагане на ефективно йерархично формиране на лъча. Съпоставени са характеристиките на реално измерени и теоретично моделирани massive MIMO безжични канали, и е проведен сравнителен анализ на точността на алгоритми за оценка на канала в massive MIMO системи, работещи с FDD. Използвани са актуални аналитични методи за математическа оптимизация, машинно обучение и статистика.

Практическа приложимост

Всички нови подходи, методи и алгоритми, разработени в дисертационния труд, са валидирани чрез симулационни експерименти и прилагане на реалистични параметри и модели на мрежата, потребителите и околната среда. Посредством това е възможно те да бъдат внедрени в практически мобилни мрежи, като за някои от предложените методи е приложена примерна икономическа оценка на очакваните подобрения в пропускателната способност. Някои от изследваните подходи вече са част от първите практически 5G мрежи и са залегнали в основата на мрежите от следващите поколения. В дисертацията е направен сравнителен анализ на разработените методи с други, в чиято основа са заложили подобни цели и функционалности.

Публикуване на резултатите от дисертационното изследване

Направените анализи, предложените подходи и получените резултати са представени в общо **6** авторски публикации, **5** от които на престижни *международни конференции*, а **1** е в престижно *международно научно списание с Impact Factor*. Една от публикациите е самостоятелна, а останалите **5** са в съавторство. Налични са **25** цитирания на една от публикациите, **14** от които са в индексирани издания в Scopus и/или Web of Science.

Международните конференции са *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, *Fourth International Conference on Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures (FABULOUS 2019)*, *2018 Global Wireless Summit (GWS)*, *2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)* и *XI Национална студентска научно-техническа конференция (HCHTK)*. Международното научно списание е *Wireless Personal Communications* на издателство Springer.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **160** страници формат A4, като включва увод, четири глави за решаване на формулираните основни задачи, заключение със списък на основните приноси, списък на фигурите, списък на таблиците, списък на алгоритмите, списък на използваните съкращения, списък на авторските публикации по дисертацията и списък на използваната литература. Изложението на дисертационния труд е направено в **4** глави и съдържа **59** фигури, **9** таблици, **82** математически израза и **3** алгоритъма. Използвани са **216** литературни източника, от които **200** са на латиница, **4** са на кирилица и **12** са Интернет адреси. Номерата на фигурите и математическите изрази в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

В първа глава е направен литературен обзор и са разгледани подробно три актуални ключови подхода за намаляване негативните ефекти от явленията при разпространението на електромагнитните вълни в мобилните комуникации. Насочването на антените в BSs подлежи на оптимизиране, в зависимост от характеристиките на средата, мрежата и потребителите. Архитектурата на облачната мрежа за радио достъп (Cloud computing-based RAN, C-RAN) и C-RAN с добавени „мъглови изчисления“ (F-RAN) е подходяща за прилагане на ефективно формиране на лъча. Ефективността на тези два подхода може да бъде значително повишена, ако мрежата разполага с конкретни данни за потребителите под формата на тяхното местоположение, активност, изисквания към услугата и динамика. В системите с FDD massive MIMO като ключови предизвикателства са идентифицирани точното теоретично моделиране на канала и ефективната оценка на канала с ниски загуби и грешки, чието разрешаване би позволило по-достъпното и широко практическо внедряване на тези системи. Проучените подходи могат да подобрят спектралната и енергийната ефективност на мрежата, което би довело до повишаване както на нейната пропускателна способност, така и на качество на предаване.

Във втора глава е предложен, разработен и изследван метод за самооптимизация на капацитета и покритието на RAN с използване на REIN. Разработен е алгоритъм, базиран на машинно обучение с утвърждение (Reinforcement Learning, RL) за разпределено изпълнение в BSs с ниска изчислителна сложност и подходящ за работа в реално време. Изследвана е ефективността на метода с прилагане на различни модели на безжичния канал и е приложена примерна икономическа оценка на очакваните подобрения в пропускателната способност.

В трета глава е доказано, че с прилагане на допълнителна информация относно разпределението на потребителите и тяхната активност, може да се повиши съществено пропускателната способност в плътни и динамични хетерогенни RAN. Предложеният подход с изграждане на потребителски топлинни карти внася проактивност и бързодействие в работата на мрежата, което е полезно при динамични условия, характеризирани с чести промени в потребителските активност, мобилност и изисквания към обслужването. Въведена е също така и концепцията за вдвояване на смущаващите потребителски терминали в F-RAN, с което се подобрява пропускателната способност на йерархичното формиране на лъча. В резултат се доближава глобалният максимум за скоростта на предаване, което прави тази концепция особено привлекателна за бъдещите мобилни мрежи, базирани на F-RAN.

В четвърта глава са изследвани методите и алгоритмите, с които може да се повиши ефективността на оценката на канала в massive MIMO системи с FDD. В тези системи моделите на канала и подходите за ефективната му оценка имат съществено влияние за повишаването на пропускателната способност и качеството на предаване в RAN. Разгледани са подходи и алгоритми, които правят допускания за нисък ранг и скрита разредена структура в импулсната характеристика на канала, така че да сведат до минимум броя на необходимите пилотни сигнали. Изследвани са някои от моделите за теоретично описание на каналите и те са съпоставени с характеристиките на реално измерени massive MIMO канали, като се доказва, че практическите

канали не притежават явна неравномерна разреденост, каквато е заложена в и характерна за повечето теоретични модели. Проведени са сравнителни експериментални изследвания на съвременни алгоритми за оценка на канала и са анализирани резултатите за практически канали и теоретичен модел. Оценени са също влиянието на матрицата с пилотни сигнали (пилотна матрица, ПМ), представянето на характеристиката на канала в ъглова област и бързодействието на алгоритмите.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Повишаване на пропускателната способност и качеството на предаване в съвременни мрежи за радио достъп

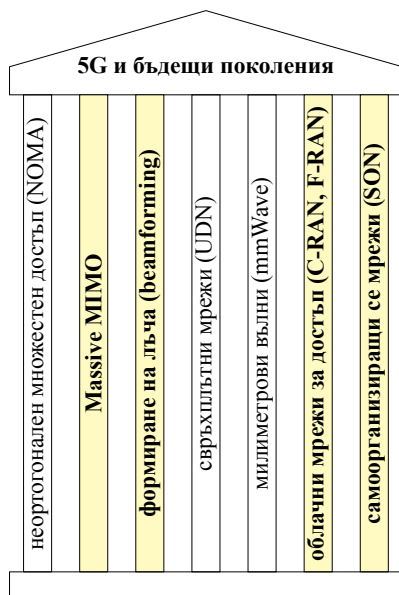
1.1. Съвременни мрежи за радио достъп

Основната задача на RAN в една съвременна мобилна мрежа е, посредством радио връзка, да предостави и управлява достъпа на мобилните потребители до опорната мрежа [10, 11]. Именно безжичният канал е „тясното място“, тъй като радиоресурсите са силно ограничени и скъпи, а чрез него се подsigурява предаването на все по-голям обем информация до постоянно нарастващия брой мобилни потребители [10, 12]. RAN изпълнява функции, свързани с радиоресурсите [10, 11], а мобилността на потребителите води до редица явления и ограничения при предаването на информация, и поставя множество предизвикателства пред проектирането на ефективна RAN. Те налагат разработването и внедряването на функционалности, свързани с необходимостта от периодична оценка и следене на състоянието на канала, с хендоувър, с интензивната сигнализация и други [11, 13, 15, 16, 14].

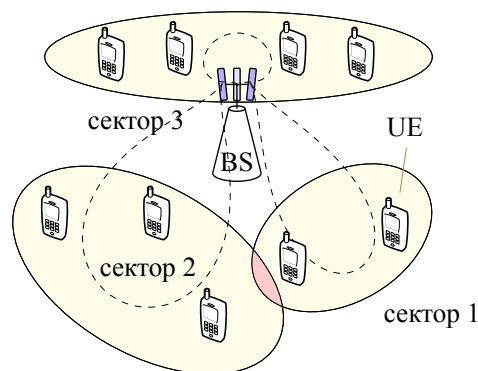
1.2. Пропускателна способност и качество на предаване

Пропускателната способност (капацитет) е максималното количество информация, което може да се предаде в мрежата за единица време и в единица честотен ресурс [17, 18], и се описва с формулата на Шанън [18]. Качеството на предаване е свързано с редица параметри, освен с капацитета на мрежата – отношението сигнал-шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR), скоростта на предаване, покритието, ефективността на оценката на канала. Други определящи параметри са вероятност за и коефициент на грешка при предаване (битова, символна, блокова), закъснения, джитер и други [17], но те не попадат във фокуса на дисертацията.

За реализацията на мобилни мрежи от петото и следващите поколения са предложени в литературата множество актуални похвати за повишаване на пропускателната способност и качеството на предаване в RAN. Фигура 1.1 илюстрира някои от технологичните стълбове, които изграждат основата на безжичните мрежи от следващо поколение. Подобряването на капацитета на безжичните системи може да се отдаде на три основни фактора — (а) увеличаване на броя на възлите за безжичен достъп, (б) използване на допълнителен радиочестотен спектър и (в) подобряване на спектралната ефективност на системата [10]. Маркираните на фигура 1.1 подходи се разглеждат и изследват в дълбочина в дисертацията — (а) оптимизиране насочването на антените на BSs, в зависимост от местоположенията на потребителите в мрежата, (б) формиране на лъча и (в) разнесено предаване и приемане чрез използване на голям брой антени. И трите подхода целят да концентрират енергията на излъчените радиовълни към обслужваните UEs в мрежата и във възможно най-голяма степен да потиснат смущенията към останалите UEs. С това се цели повишаване на отношението сигнал към смущения и шум (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR), което от своя страна води до повишаване на общата пропускателна способност на мрежата и качеството на предаване.



Фигура 1.1: Основополагащи технологии за 5G и бъдещите поколения мобилни мрежи.



Фигура 1.2: Прилагане на ССО с управление на наклона на антените.

1.3. Самооптимизиране на насочването на антените

Възможностите на самоорганизиращите се мрежи (Self-Organizing Networks, SON) са ключов компонент на 5G [34], който подпомага намаляването на оперативните разходи и квалифицирания инженерен труд за поддържането на мрежата, като същевременно подобрява нейната пропускателна способност [35]. Един пример за приложение на SON е динамичната и адаптивна самооптимизация на наклона на антената в традиционните BSs, наречена оптимизиране на покритието и капацитета (Coverage and Capacity Optimization, CCO), чрез която се подобрява SINR и се увеличава капацитетът на мрежата [A1]. На фигура 1.2 е илюстриран пример за прилагането на CCO с управление на наклона на антените.

1.4. C-RAN и F-RAN

За ефективна обработка на сигналите (ОС) в основна честотна лента (ОЧЛ) в съвременните RAN е необходимо да се координират голям брой BSs в рамките на ограниченото време на кохерентност на канала, в което той е приблизително непроменен, което е значително предизвикателство [14, 29]. Благодарение на технологичния напредък в облачните изчисления, е възможно гъвкаво да се виртуализират функциите за ОС в ОЧЛ и те да се делегират на облака за централизирани изчисления [10, 29—31]. Тази нова архитектура на мобилна мрежа е известна като C-RAN и основната ѝ идея е да се обединят единиците, които обработват сигналите в ОЧЛ (Baseband processing Units, BBU) от множество BSs, в централизиран запас (BBU Pool) за статистическо мултиплексване [10, 31, 32]. За да се улеснят мениджмънтът на мобилността, намаляването на смущенията и оптимизирането на ресурсите, е предложена архитектурата на F-RAN, която надгражда C-RAN с добавяне на разпределени изчисления и съхраняване на информация между облака и периферните устройства, наречени „мъглови изчисления“ [31, 33].

1.5. Формиране на лъча

В съвременните клетъчни мрежи, формирането на лъча (Beamforming, BF) е често използвана стратегия за увеличаване на мощността на приетия от обслужвания UE полезен сигнал и за намаляване на смущенията към други UEs [27, 14], съответно така се повишава SINR в приемника и по този начин се подобрява сумарната скорост на предаване в системата. Предполага се,

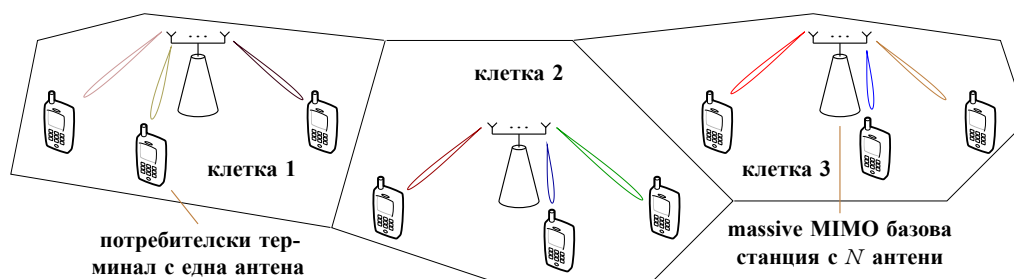
че формирането на лъча и MIMO ще заемат централна роля в мобилните системи от петото и бъдещите поколения [28].

1.6. Адаптивност по отношение на потребителите

Ефективността на подходите за управление на RET и за BF може да бъде повишена, ако мрежата разполага с определена информация за потребителите, като местоположение, активност, изисквания към услугата, динамика [20, 75].

1.7. Използване на масивни антенни структури

MIMO е комуникационна система, с която е възможно да се постигне линейно увеличаване на пропускателната способност на мрежата, а експоненциалният растеж на трафика може да бъде посрещнат с технологията на предаване и приемане с масивни антенни структури (massive MIMO) [19]. Фигура 1.3 илюстрира примерна клетъчна мрежа с масивни антенни структури, където всяка BS е оборудвана с голям брой антени N и обслужва клетка с голям брой UEs K , които обикновено имат по една антена.



Фигура 1.3: Примерна клетъчна мрежа с масивни антенни структури.

1.8. Обобщение на първа глава

В първа глава е направен подробен литературен обзор на няколко актуални ключови подхода за намаляване негативните ефекти от явленията при разпространението на електромагнитните вълни в мобилните комуникации. Насочването на антените в BSs подлежи на оптимизиране, в зависимост от характеристиките на средата, мрежата и потребителите. Архитектурата на C-RAN и F-RAN може да бъде използвана за ефективно формиране на лъча. Ефективността на тези два подхода може да бъде значително повишена, ако мрежата разполага с конкретни данни за потребителите под формата на тяхното местоположение, активност, изисквания към услугата и динамика. В системите с FDD massive MIMO като ключови предизвикателства са идентифицирани точното теоретично моделиране на канала и ефективната оценка на канала с ниски загуби и грешки, чието разрешаване би позволило практическо внедряване на тези системи. Проучените похвати могат да подобрят спектралната и енергийната ефективност на мрежата, което би довело до повишаване както на нейната пропускателна способност, така и на качество на предаване.

1.9. Мотивация, цел и задачи на дисертационния труд

Вследствие на направения литературен обзор е формирана целта на дисертационния труд, която е *да се разработят нови методи, базирани на технологии за електрическо управление на наклона на антените, формиране на лъча и massive MIMO, за повишаване на пропускателната способност и качеството на предаване в мрежи за радио достъп с традиционна, облачна и мъглова архитектура.*

Въз основа на направения литературен обзор и проведения анализ, за успешното постигане на целта на дисертацията следва да бъдат решени следните задачи:

1. Да се предложи, разработи и изследва метод за самооптимизация на капацитета и покритието на мобилна мрежа чрез управление на наклона на антените на BSs по електрически път (RET), който да е адаптивен спрямо разпределението на потребителите.
2. Да се предложат методи за повишаване на пропускателната способност на RAN, отчитайки характеристиките на потребителите и прилагайки ефективни решения за йерархично формиране на лъча в мъгловата мрежа за радио достъп (F-RAN).
3. Да се предложат и разработят методи и алгоритми за ефективна оценка на каналите в massive MIMO системи с разделяне на посоките на предаване по честота (FDD) с ниска изчислителна сложност.

ГЛАВА 2. Оптимизиране на насочването на антените съобразно местоположенията на потребителите

Оптимизацията на мрежовата пропускателна способност от квалифициран персонал е набор от сложни, скъпоструващи и отнемачи време операции [35, A2]. В следствие на направения в първа глава обзор става ясно, че внедряването на SON с CCO е един от подходите, които могат да се приложат за ефективно повишаване на пропускателната способност и качеството на предаване в съвременни RAN.

2.1. Формулиране на проблема

Модел на системата и на мобилния радио канал

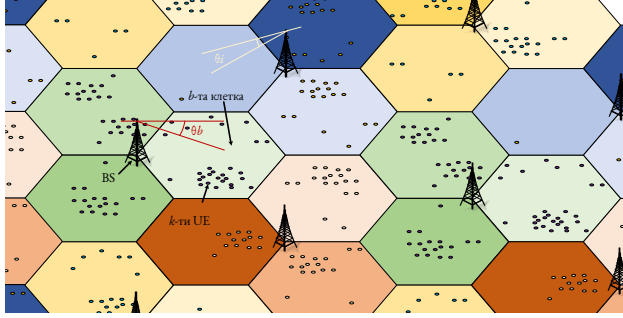
Разглежда се мобилна мрежа в градска среда, както е показано на фигура 2.1. Приема се, че всяка BS е оборудвана с по три антени, всяка покриваща един сектор, следователно мрежата е многоклетъчна и секторна [A2, A3]. От практическа гледна точка това предположение съответства на типичните реализации на мобилни мрежи, тъй като всяка BS обслужва потребителите в своя сектор. Освен това се приема, че терминът клетка се използва със същото значение като сектор. На практика поради непостоянните характеристики на радиоразпространението и неравномерното състояние на околната среда, формата на клетката не е идеален шестоъгълник, но за целите на илюстрацията се допуска, че всяка клетка може да бъде геометрично приближена до шестоъгълник. UEs са разпределени на случаен принцип в клетките, но е възможно някои UEs да не са в покритието на нито една клетка и съответно те да не могат да бъдат обслужени [A2].

Приема се, че мощността на приемо-предавателя за всяка BS антена е постоянна и е еднаква за всички BSs в мрежата. Нека B е броят на клетките, K да обозначава броя на UEs в мрежата, а b -тата антена на BS, $b = \{1, \dots, B\}$, предава сигнал $s(t)$ с мощност P_T , както е показано на фигура 2.3, илюстрираща модела на мобилния радио канал [A2]. Сигналят се усилва с коефициента на усилване на BS антената, обозначен с $G_{T(k,b)}(\theta_b)$, и се разпространява по безжичния канал между b -тата антена и k -тия UE, $k = \{1, \dots, K\}$. В модела се вземат предвид само затихването по пътя на разпространение на сигнала и случайните изменения поради влиянието на обекти по пътя на разпространение, водещи до фединг от засенчване [A2]. Те се изразяват с усилването на канала между UE и BS антената $|h_{k,b}|^2$. Шумът $n(t)$ и смущенията $i(t)$ се приемат за адитивни, като шумът в канала и вътрешният за UE шум се апроксимират като адитивен бял Гаусов шум (Additive white Gaussian noise, AWGN). Периодът на оптимизиране на RET на антените е от порядъка на часове, следователно в аналитичния модел се пропускат краткосрочните вариации на канала, като например бързия фединг [A2].

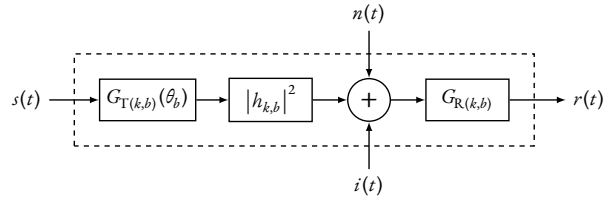
Зависимостта за скоростта на предаване на потребител k е следната [A2]:

$$R_k = \sum_{n=1}^{N_{sc(k)}} \frac{\Delta f}{N_{sc}} \log_2 \left(1 + \frac{P_T G_{T(k,b)} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 \left[\frac{d_0}{d_{k,b}} \right]^\alpha \psi_{k,b}}{P_N + \sum_{l=1, l \neq b}^B P_T G_{T(k,l)} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 \left[\frac{d_0}{d_{l,b}} \right]^\alpha \psi_{l,b}} \right), \left[\frac{\text{bit}}{\text{s}} \right], \quad (2.13)$$

в която $d_{k,b}$ и $d_{l,b}$ изразяват разстоянията на предаване между UE и съответните BS антени, $N_{sc(k)}$ е броят на подносещите честоти, P_N е мощността на шума, d_0 е референтно разстояние за далечната зона на антената, α е коефициент на затихването, λ е дължината на вълната, $\psi_{k,b}$ и $\psi_{l,b}$ са логаритмично-нормално разпределени случайни величини за моделиране на фединга от засенчване [A2].



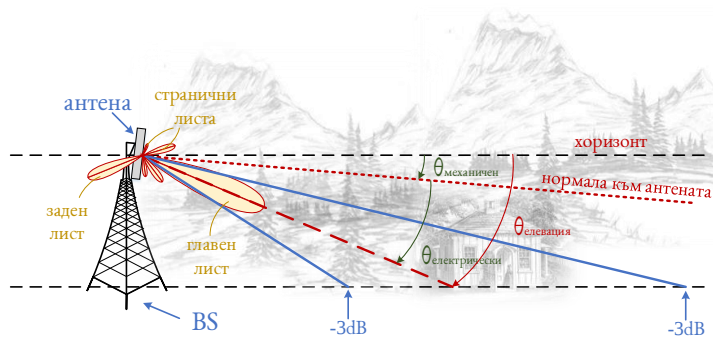
Фигура 2.1: Модел на мобилната мрежа [A2].



Фигура 2.3: Модел на мобилния радио канал [A2].

Модел на диаграмата на насочено действие (ДНД) на антената в BS

Точното моделиране на ДНД на антената в BS е важно за ССО, тъй като предлаганото решение коригира RET на антената, за да оптимизира капацитета и покритието. Следователно точността на модела е от съществено значение за постигнатите от алгоритъма резултати [A2]. На фигура 2.5 е изобразена една BS с нейната антена отстрани (напречно сечение с вертикалната равнина), като са изобразени главният, страничните и задният листове на ДНД на антената, както и параметрите вертикална широчина на листа и ъгъл на наклона. Общият ъгъл на наклона се състои от два ъгъла — зададен по механичен път ($\theta_{\text{механичен}}$) и по електрически път чрез RET ($\theta_{\text{електрически}}$).



Фигура 2.5: BS и ДНД на една от нейните антени [A2].

Формулиране на задачата

За да се увеличат максимално пропускателната способност и качеството на предаване чрез регулиране на RET на антените на BSs в RAN се допуска, че потребителят k изисква определена скорост на предаване на данни $\tilde{R}_k$. Гарантирайки, че пропускателната способност за всяко UE достига или надминава съответната изисквана от него скорост $\tilde{R}_k$, $\forall k$, се повишава удовлетвореността на потребителите. Тъй като RET може да се използва за оптимизиране на работата на

мрежата чрез предсказване, оптимизационната задача има за цел да сведе до минимум целевата функция чрез регулиране на RET и може да бъде формулирана като [A2]:

$$\underset{\Theta}{\operatorname{argmin}} \quad \sum_{k=1}^K w_k (\tilde{R}_k - R_k(\Theta)) \quad (2.20)$$

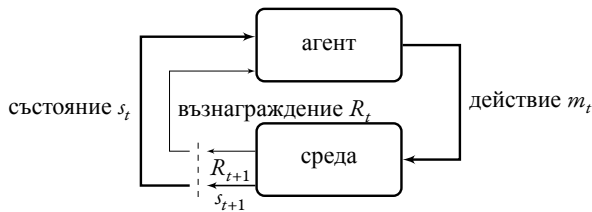
$$\text{subject to} \quad \theta_{b,\min} \leq \theta_b \leq \theta_{b,\max}, \quad (2.20a)$$

където $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_b, \dots, \theta_B)$ е вектор, съдържащ ъгъла на наклона на всяка BS в мрежата, а w_k е тегловен коефициент.

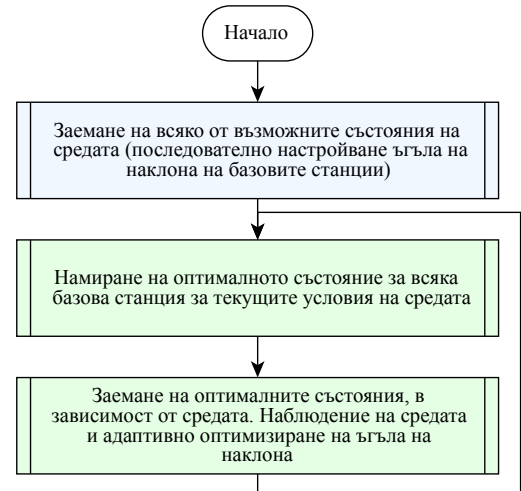
2.2. Решение с RL

Оптимизационната задача (2.20) не е изпъкнала и следователно е трудно да бъде решена със стандартни оптимизационни методи в реално време. Въпреки това може да се приложи RL подход за автономна оптимизация на RET на BS антените. В RL, фазите на обучение и тестване се смесват [178]. За да събира информация, обучаващият се агент активно взаимодейства с околната среда, а в някои случаи влияе върху нея и получава незабавно „възнаграждение“ за всяко действие (фигура 2.7). Целта на агента е да увеличи максимално своето възнаграждение за набор от действия и повторения с околната среда. Въз основа на възнагражденията за всяко действие, се изгражда матрица на възнаграждението (Reward Matrix, RM), която описва съответствието между възнаграждението R_t , получена за състояние s_t , и предприето действие m_t .

Основната идея и принципи на разработения метод за CCO, използващ RET на антените на BSs [A2], са илюстрирани с блок-схемата на алгоритъма [A2] и опростения ѝ вариант (фигура 2.9). В началната фаза, наречена фаза на изследване и оцветена в синьо на фигурата, се изследват всички възможни ъгли на наклона s_t от пространството на състоянието $\mathcal{S}$. Следва фазата на експлоатация, оцветена в зелено, в която оптималният ъгъл на наклона се задава до следващата итерация на алгоритъма, а междувременно се събират статистически данни и периодически се актуализира матрицата на възнаграждението.



Фигура 2.7: Рамка на обучението с утвърждение: взаимодействие агент-среда [A2, 179].

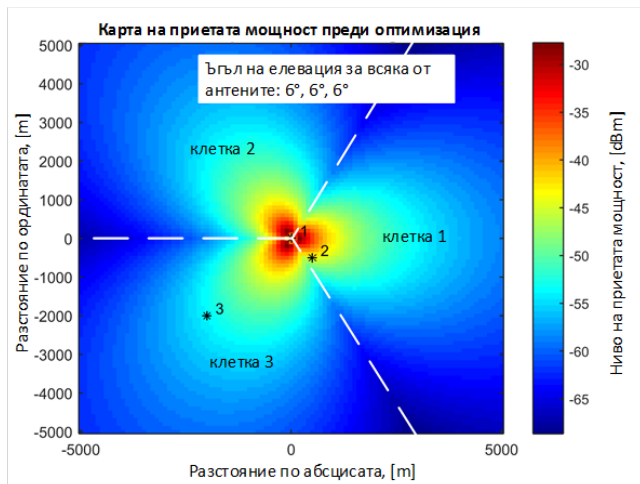


Фигура 2.9: Опростена блок-схема на алгоритъма за CCO с RET на антените на BSs [A2].

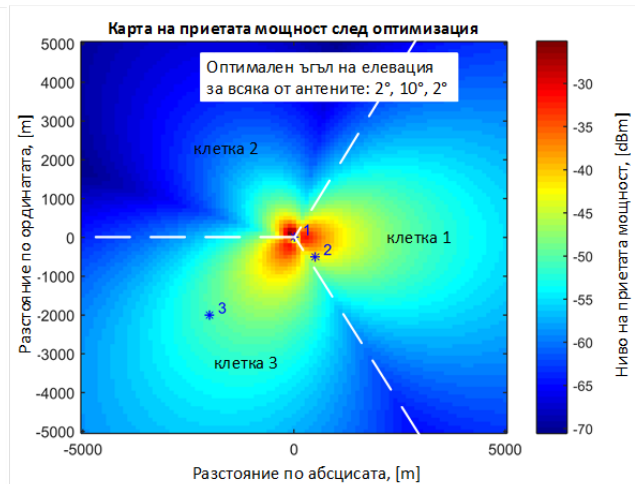
Разработване на симулационен модел

Мощността на приетия сигнал от даден UE е нанесена на карта, която преди инициализиране на алгоритъма за оптимизация е показана на фигура 2.13. Местоположенията на потребителите са представени със звезда (*) и са номерирани. Клетките са означени с техните индекси и

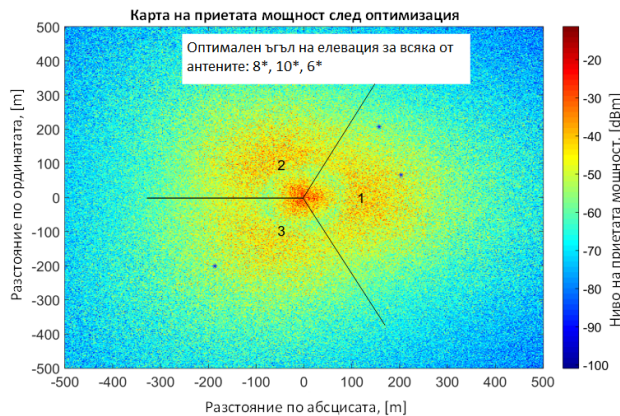
приблизителните им граници, илюстрирани с бели пунктирани линии [A2]. Получените резултати за картата на приетата мощност след завършване на фазата на изследване на алгоритъма са представени на фигура 2.14. От тези резултати може да се заключи, че RET за клетки 1 и 3 е намален (антените са насочени по посока на хоризонта). След внедряване на фединг от засенчване, параметри на радиоразпространението за градската среда и отчитане на влиянието на междуклетъчните смущения в модела [A2], резултатите от симулацията са показани на фигура 2.16. Скоростта на предаване на данни за всеки от тримата потребители преди и след оптимизацията, както и общата скорост в мрежата, са показани на фигура 2.17 от която е ясно, че сумарната скорост на предаване в мрежата е с около 32, 2% по-висока в резултат на предложеното ССО [A2].



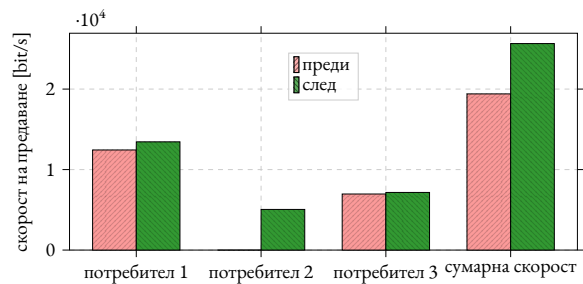
Фигура 2.13: Проста постановка на мрежата: карта на приетата мощност преди инициализиране на алгоритъма за оптимизация [A2].



Фигура 2.14: Проста постановка на мрежата: карта на приетата мощност след изпълнение на алгоритъма за оптимизация [A2].



Фигура 2.16: Карта на приетата мощност след оптимизация на 3 клетки и 3-ма произволно разпределени потребители [A2].

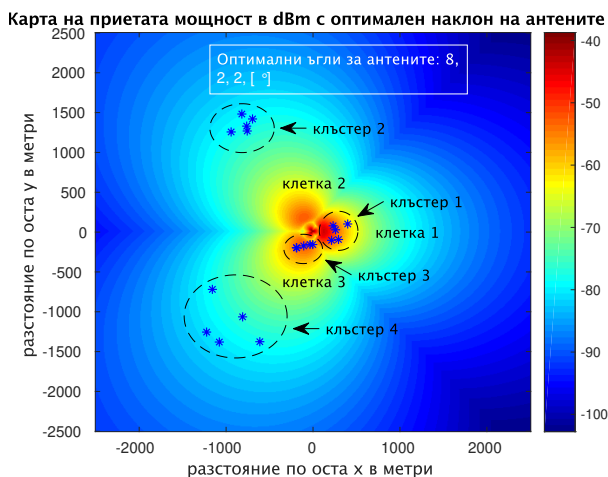


Фигура 2.17: Скорост на предаване преди и след ССО.

2.3. Влияние на модела на канала

Освен опростения модел на канала, ефективността на решението е верифицирана и с модел с два коефициента на затихването, модел на Окумура-Хата и модел COST231 за четири честоти на носещия сигнал: $f = \{1; 1, 5; 1, 75; 1, 9\}$ GHz [A3]. В мрежата има 20 потребители, разпределени на случаен принцип в областта на нейното покритие, така че да образуват четири клъстера (фигура 2.20). Фигура 2.21 илюстрира SINR на приетия сигнал за всеки UE на мрежата като

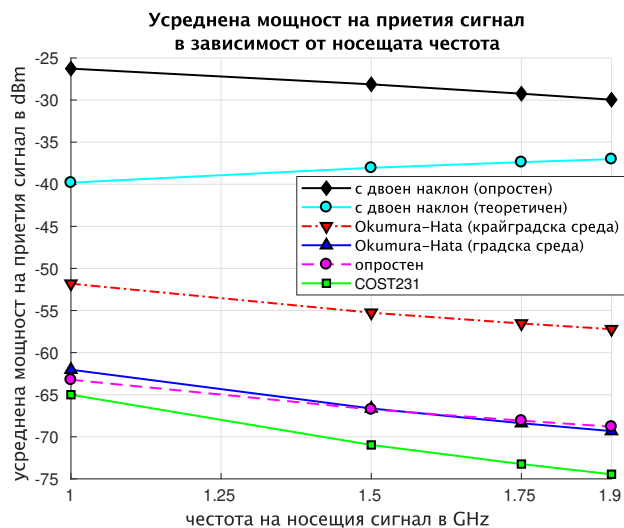
функция на разстоянието от антената на обслужващата BS. Средната приета мощност в dBm за всички клъстери в зависимост от модела на канала и като функция на носещата честота е илюстрирана на фигура 2.23, като моделът с двоен наклон на затихването осигурява най-голяма мощност. Фигура 2.24 показва приетото SINR в децибели, усреднено спрямо всички клъстери, като функция на носещата честота с каналния модел като параметър. Теоретичният модел с двоен наклон от [182] и опростената му версия постигат едно и също SINR, което е и най-голямо от всички модели. Най-малко средно SINR се получава с моделите COST231 и опростения модели, но нормализираните разлики между крайностите са от порядъка на 10^{-5} или $2 \cdot 10^{-3}$ dB, което е пренебрежимо малко в практически условия [A3].



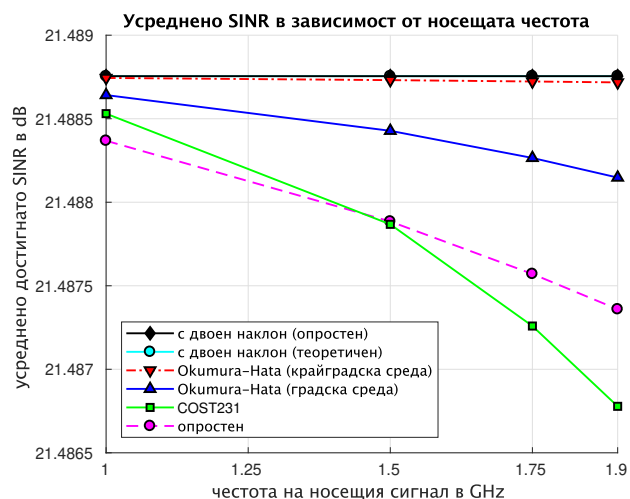
Фигура 2.20: Симулирана мрежа — карта на приетата мощност в dBm с оптимален наклон на антените за честота на носещия сигнал $f = 1,5$ GHz и Okumura-Hata модел на канала за градска среда [A3].



Фигура 2.21: Достигнато SINR за всеки потребител от мрежата като функция на разстоянието от обслужващата BS при модел на канала Okumura-Hata за градска среда и честота на носещия сигнал $f = 1$ GHz [A3].



Фигура 2.23: Усреднена мощност на приетия сигнал за всички клъстери от UEs в зависимост от модела на канала като функция на носещата честота [A3].



Фигура 2.24: Усреднено прието SINR в децибели за всички клъстери от UEs в зависимост от модела на канала като функция на носещата честота [A3].

2.4. Обобщение на втора глава

Във втора глава е предложен, разработен и изследван метод за самооптимизация на капацитета и покритието на мобилна мрежа, като изложеното е оповестено в авторските публикации [A2,

A3]. За предложения нов подход за самооптимизация в мобилни мрежи, използващ наклона на антената на BS, е разработен алгоритъм, базиран на RL. Неговото приложение в градска среда е оценено чрез симулационни експерименти и резултатите показват около 30% подобрене на пропускателната способност на мрежата след прилагане на оптимизацията на ъгъла на наклона на антената. Предложеният алгоритъм за машинно обучение е независим от модела и може да се прилага към настоящите и следващите поколения мобилни мрежи, допринасяйки към функциите за самоорганизиране на мрежата, към икономията на енергия, координацията на междуклетъчните смущения, балансирането на натоварването и други. Постигането на синергичен ефект за експлоатацията, администрирането и поддръжката на мрежата, и за подобряване на нейната пропускателна способност, като същевременно се намаляват оперативните разходи, потреблението на енергия и необходимите ресурси, са очакваните резултати от прилагането на алгоритъма.

Въз основа на фигура 2.24, може да се направи заключението, че за параметрите на проведените изследвания, моделът на канала не изменя съществено приетото SINR. Следователно, дори опростеният модел на канала с подходящо избран коефициент на затихването за градска среда е удачен за симулационно моделиране на мрежи от следващо поколение, поради което изчислителната сложност може да бъде сведена до минимум. Въпреки това, заради все по-голямата гъстота на BSs в мрежата, внимателният избор на модел на канала и свързаните с него параметри ще бъде от все по-съществено значение за ефективността както на прилаганите алгоритми за регулиране на RET, така и на мрежата като цяло.

2.5. Приноси към втора глава

Вследствие на проведените изследвания във втора глава са формулирани следните приноси:

1. Предлага се метод с RL за CCO на RAN чрез динамично управление на RET на антените на BSs, който е адаптивен спрямо разпределението и изискванията на потребителите. Методът се основава на формулираната оптимизационна задача и значително повишава качеството на предаване в RAN, не зависи от конкретен модел на мрежата и е подходящ за разпределени изчисления.
2. На базата на предложения метод е разработен RL алгоритъм за разпределено изпълнение в BSs с ниска изчислителна сложност и намаляващ необходимата сигнализация, подходящ за работа в реално време и с различни модели на канала.

ГЛАВА 3. Повишаване качеството на предаване в мрежата чрез използване на информация за разпределението на потребителите

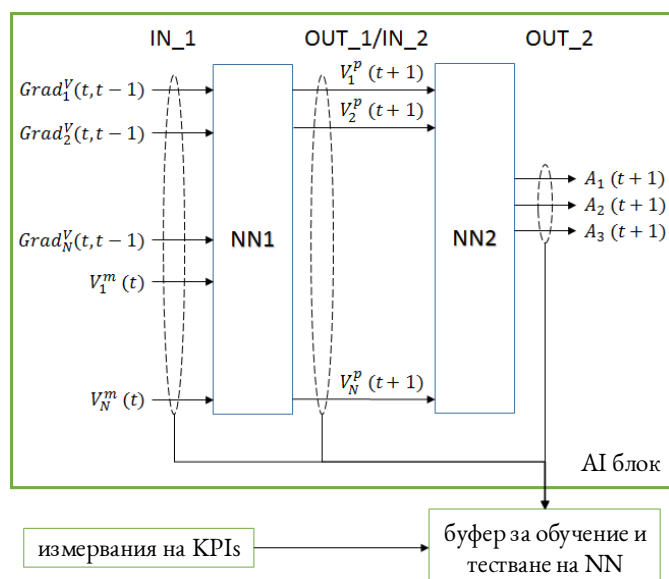
3.1. Оптимизиране чрез потребителски топлинни карти

Разработването на технологии за динамично създаване и поддръжка на модели за разпределение на потребителите и техните активности може да се комбинира с добавяне на метаданни в трафичните модели, генерирани от потребителите. Чрез наблюдение на разпределението, мобилността, активностите, необходимите услуги на UEs и съставяне на така наречените „потребителски топлинни карти“ (User Heat Maps, UHM), е възможно да бъдат получени значими данни, чрез анализ на които могат да бъдат извлечени знания и да бъдат прогнозирани събития **[A4]**. В трета глава се демонстрира, че подобни модели могат да бъдат използвани за динамична и проактивна оптимизация на пропускателната способност в плътни и динамични хетерогенни RAN чрез

изграждане на UHMs и предсказване на състоянието им в бъдещите времеинтервали чрез невронна мрежа (Neural Network, NN). Разполагайки с моделите на UHM, RET на антените на BSs може да бъде регулиран предварително, така че мрежата да има проактивен отговор на околната среда и промените в разпределението на потребителите. В [A4] е въведен подход за динамично и проактивно използване на ресурсите, базиран на NN архитектура и използващ данни от UHMs, изградени въз основа на активността и мобилността на потребителите. Основното предимство на подхода е неговата ниска изчислителна сложност, осигуряваща работа в реално време.

Модел за оптимизиране на пропускателната способност и описание на алгоритъма

Моделът за оптимизиране на пропускателната способност се основава на изграждане на UHM в няколко последователни времеинтервала и прогнозиране на модели на поведение на потребителите, свързани с изискванията за мобилност и обслужване. Моделът е реализиран на два етапа: изграждане на UHM и обучение на архитектура на невронна мрежа (NN1 на фигура 3.1), и обучение на NN2 с предсказаните стойности, на изхода на която се генерират стойности за оптималната конфигурация на BS за следващия времеинтервал. Това действие удовлетворява предварително определен набор от ключови показатели за ефективност (Key Performance Indicators, KPIs) на BS [A4].

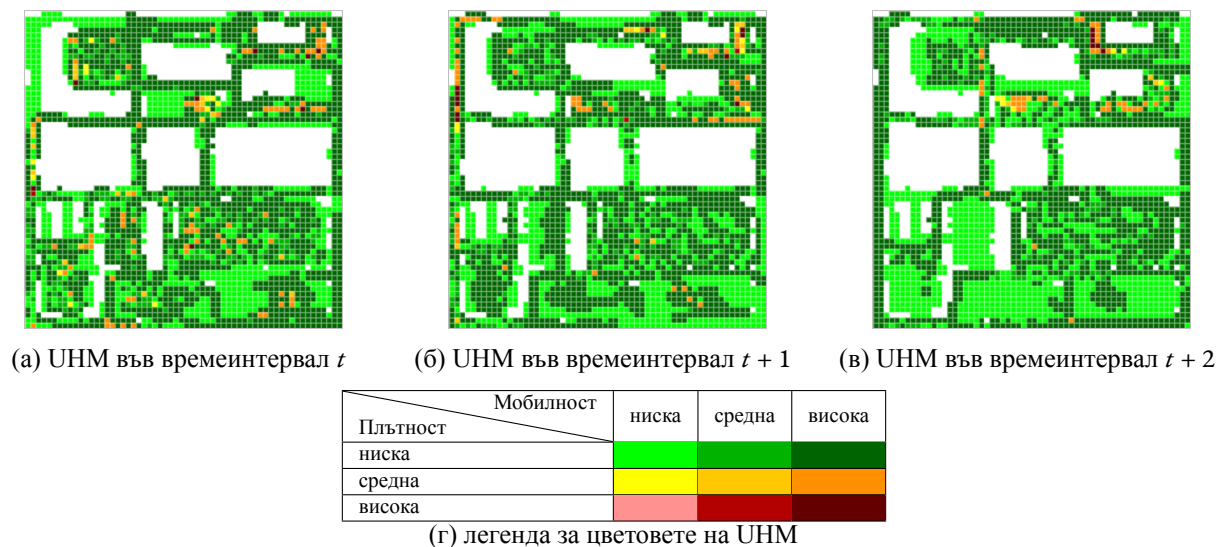


Фигура 3.1: Архитектура на невронните мрежи [A4].

Оценка на ефективността на предложения подход за оптимизиране чрез UHMs

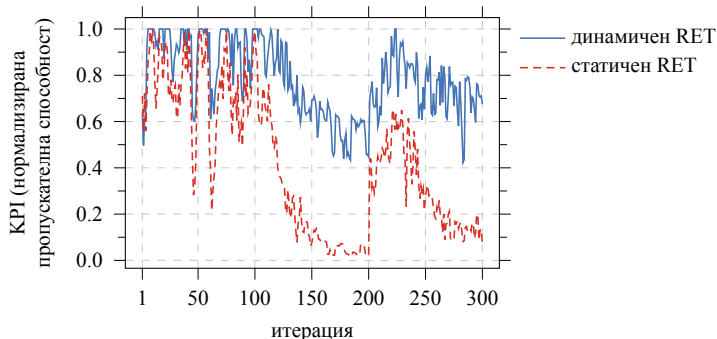
За верифициране на предложения подход се допуска сценарий съгласно препоръките на 3GPP за симулации на мрежи [175] и се използва подходът, описан във втора глава във връзка с моделирането на ДНД и определяне на целевата функция за регулиране на RET. RET на антената се използва за оптимизиране на пропускателната способност чрез предсказване въз основа на решаване на оптимизационната задача (2.20) [A4]. Симулираната мрежа имитира градска среда с 19 макро BSs с по 3 макро клетки на BS. Антените на BSs са разположени на 30 m височина и първоначалният ъгъл на наклона на антените на BSs чрез RET е 15° . Мобилността на потребителите е от пешеходен тип (скорост 5 km/h). Разгледана е примерна площ на симулираната градска среда с размери 360×360 m и с динамични изменения на плътността и мобилността на потребителите. На фигура 3.2 а), б) и в) са илюстрирани промените на UHM в три последователни времеинтервала, нормализирани до мобилността на пешеходците. Легендата за UHM е

показана на фигура 3.2 г) и цветът на всеки елемент от UHM зависи от активната плътност на потребителите и тяхната мобилност.

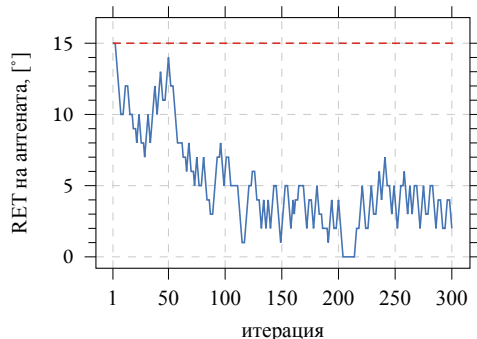


Фигура 3.2: Промени в UHM в три последователни времеинтервала (а-в) и легенда (г) [A4].

На фигура 3.5, стойностите на нормализираната обща пропускателна способност, използвана като KPI, са показани в 300 последователни времеинтервали за два сценария. Първият сценарий е със статичен RET, зададен на стойност от 15° . Вторият сценарий е с динамичен RET при прилагане на предложения алгоритъм с обучена NN. На фигура 3.6 е показана промяната на стойностите в изхода на NN2 за всеки интервал, които контролират RET на антената [A4].



Фигура 3.5: Сравнение на KPI за 2 сценария [A4].



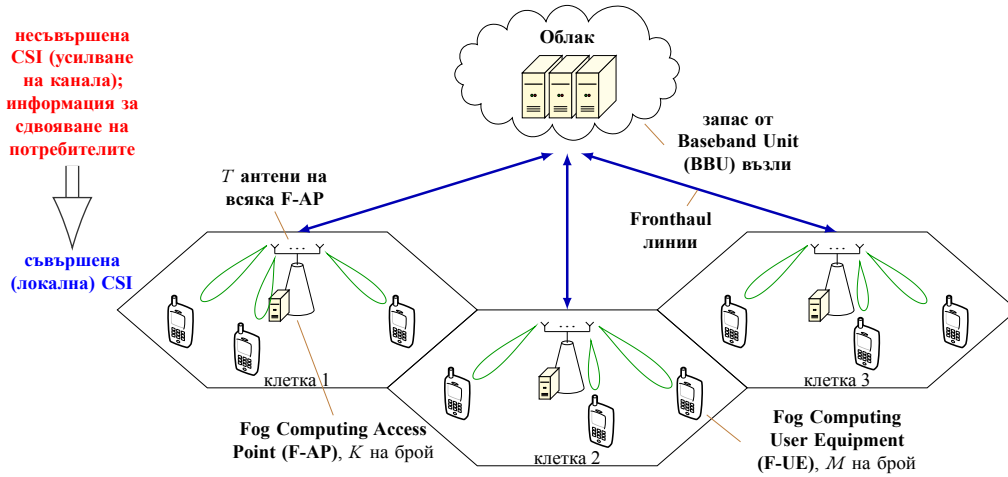
Фигура 3.6: Промени в RET на антената [A4].

3.2. Йерархично формиране на лъча в F-RAN

Архитектурата на F-RAN е подходяща за съвместна ОС в ОЧЛ по йерархичен и колаборативен начин [29] и в дисертацията такова разлагане се използва по аналогичен начин, както е предложено в [29]. Използвайки F-RAN и формирането на лъча, в мобилната мрежа могат да бъдат постигнати значителни подобрения на пропускателната способност. Предлага се подобряване на съществуващото решение за йерархично формиране на лъча (Hierarchical Beamforming, HBF) в F-RAN [29], което се допълва с групиране на смуцаваните потребителски терминали в F-RAN (F-UEs) по двойки. Това е наречено *сдвояване на смуцаваните F-UEs*, а подходът е назван *HBFP (HBF with Pairing of interfered F-UEs)*. В това подобрение, всяка F-AP изпраща до облака на F-RAN два вида информация, свързана с каналите: (а) усилването на каналите до обслужваните от нея F-UEs и до силно смуцаваните F-UEs и (б) допълнителна информация за сдвояване на смуцаваните F-UEs.

Модел на системата

Изследванията се фокусират върху правата посока (downlink, DL) на F-RAN, както е илюстрирано на фигура 3.7. Мрежата се състои от един набор от BBU единици в облака, K F-APs, всяка от които покрива една клетка, оборудвана е с T антени и обслужва M мобилни F-UEs с по една антена. F-UE m в клетката k се обозначава с наредената двойка (k, m) . Множеството от всички F-UEs в системата е обозначено с Υ , докато $\mathcal{M}_k$ представлява наборът от всички F-UEs в k -тата клетка, които се обслужват само от k -тата F-AP, както е посочено в [186]. Наборът от всички F-UEs, които не са в клетка k , но имат доминиращи връзки на междуклетъчните смущения (Inter-Cell Interference, ICI) към k -тата F-AP, е означен с $\mathcal{J}_k$. Всички F-APs имат достъп до набора от BBU в облака с ограничени по капацитет fronthaul линии (FHs). Допуска се, че след определена сигнализационна процедура за трениране на канала, всяка F-AP k знае (а) моментната локална информация за състоянието на канала (Channel State Information, CSI) перфектно, т.е. $\mathbf{h}_{(k,m);k} \in \mathcal{M}_k$, и (б) моментната CSI на доминиращите ICI връзки към F-UE в други клетки, т.е. $\mathbf{h}_{(l,n);k} \in \mathcal{J}_k$. Поради естеството на F-RAN, FHs имат ограничен капацитет [32, 33]. Следователно, за да се увеличи пропускателната способност на системата, трябва да се намери правилният компромис между предаването на полезна информация и количеството CSI, предавано от всяка F-AP към набора от BBU в облака. Един от начините да се избегне изпращането на пълната моментна CSI е да се препраща към облака само частична информация за канала, като в дисертацията като такава се считат както индикаторът за качеството на връзката, така и информацията за удвояване на потребителите.



Фигура 3.7: Системен модел при формиране на лъча в DL на F-RAN.

Формулиране на задачата за HBF

Следвайки изложеното в [29], целта на оптимизационната задача за проектиране на векторите за BF за всички F-APs в системата е максимално да се увеличи пропускателната способност при ограничена мощност на предаване P за всяка F-AP. Използвайки теоремата на Шанън-Хартли, тази оптимизационна задача може да бъде математически формулирана, както следва:

$$\left(\mathbf{v}_{(k,m)}^{\text{ub}} \right)_{(k,m) \in \Upsilon} = \underset{\{\mathbf{v}_{(k,m)}\}_{(k,m) \in \Upsilon}}{\text{argmax}} \quad \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \log_2 (1 + \gamma_{(k,m)}) \right\} \quad (3.6)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{m=1}^M \|\mathbf{v}_{(k,m)}\|^2 \leq P, \quad \forall k, \quad (3.6a)$$

където $\gamma_{(k,m)}$ е SINR при F-UE (k, m) и векторът за формиране на лъча, съответстващ на m -тия информационен символ в k -тата F-AP, предназначен за F-UE (k, m) , е $\mathbf{v}_{(k,m)} \in \mathbb{C}^{T \times 1}$. Оптимизационната задача (3.6) не е изпъкнала, но в литературата са предложени алгоритми за намиране на неоптимални, но близки до оптимума решения [29].

В [29] се допуска, че всяка F-AP k разделя своето T -мерно сигнално пространство (СП) на две подпространства: (а) t_k -мерно **подпространство за предаване (ПП)**, и (б) $(T - t_k)$ -мерно **незаето подпространство (НП)** за намаляване на ICI към съседните клетки. Фигура 3.8 илюстрира концепцията, предложена в [29] за проектиране на векторите за формиране на лъчите. В трета глава се предлага подобряване на първата процедура на подхода HBF, а именно в намирането на размерите на ПП чрез изпълнение на допълнителна процедура от всяка F-AP, докато останалите две процедури от [29] остават непроменени.

Въз основа на анализа в [29], размерите на подпространството, запазени за всяка връзка в системата, се оптимизират, както следва:

$$\left(\alpha_{(k,m);l}^{\text{opt}} \right)_{\forall (k,m);l} = \underset{\{\alpha_{(k,m);l}\}_{\forall (k,m);l}}{\text{argmax}} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_{(k,m);k} P g_{(k,m);k}}{\sigma_{(k,m)}^2 + \sum_{l \neq k} (1 - \alpha_{(k,m);l} P g_{(k,m);l})} \right) \right\} \quad (3.11)$$

subject to

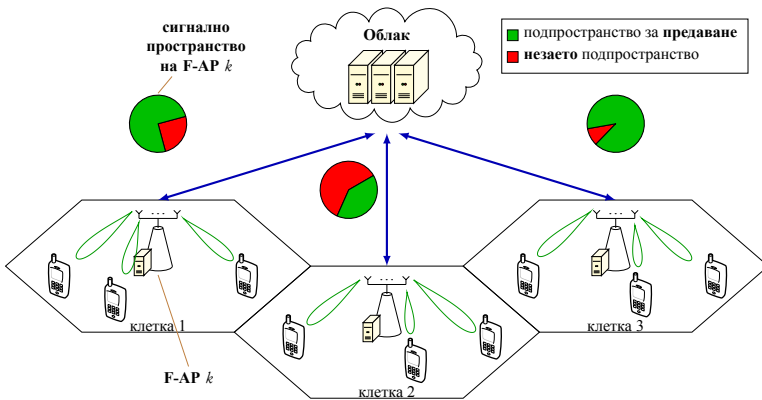
$$\sum_{(k,m) \in \Upsilon} \alpha_{(k,m);l} = T, \quad \forall l, \quad (3.11a)$$

$$\alpha_{(k,m);k} \in \{0, 1, \dots, T\}, \quad \forall k, m, \quad (3.11b)$$

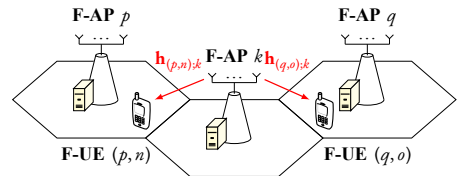
$$0 \leq \alpha_{(k,m);l} \leq 1, \quad \forall k, l, m, \quad l \neq k, \quad (3.11v)$$

където $g_{(k,m);l}$ е индикатор за качеството на връзката (средното усилване на канала от T -те антени) между всяка F-AP l и F-UE (k, m) , $\alpha_{(k,m);l}$ е размерът на СП, което е запазено за комуникационната връзка между l -тата F-AP и F-UE (k, m) , и $\sigma_{(k,m)}^2$ е дисперсията на шума (AWGN). От решението на оптимизационната задача (3.11) се изчислява оптималният размер на ПП в k -тата F-AP:

$$t_k = \sum_{m=1}^M \alpha_{(k,m);k}^{\text{opt}}. \quad (3.12)$$



Фигура 3.8: СП, ПП и НП на всяка F-AP.



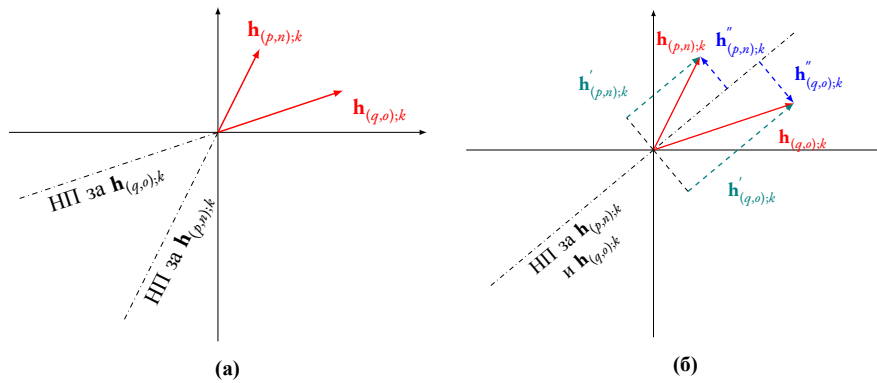
Фигура 3.9: Графично представяне на предложеното сдвояване на смущавани F-UE.

Йерархично формиране на лъча със вдвояване на смущаваните F-UEs

Идеята на предложения метод е да се изпрати до облака някаква допълнителна и обобщена информация за каналите, така че той да може да определи по-адекватно размера на незаето сигнално подпространство в зависимост от конкретните среда и смущения. Важно е да се отбележи, че целта е да не се изпраща цялостната моментна CSI до облака, а по-скоро да се извлече полза от предаването на сигнализация с намален обем през FHs. Идеята е представена графично на фигура 3.9, където k -тата F-AP смущава два F-UEs (p, n) и (q, o). Допълнителното ограничение на оптимизационната задача (3.11) има следния вид:

$$0 \leq \alpha_{(p,n);k} + \alpha_{(q,o);k} \leq 1, \quad \forall p, n, q, o, k, \quad p, q \neq k \quad (3.13)$$

за вдвояване на потребители (p, n) и (q, o), които са смущавани от F-AP k . Броят на допълнителните ограничения (3.11) е равен на броя на вдвоените канали. Фигура 3.10 илюстрира идеята за откриване на вектори на канали с подобни свойства в двумерното Евклидово пространство.



Фигура 3.10: Геометрично представяне в двумерното Евклидово пространство на два вектора $\mathbf{h}_{(p,n);k}$ и $\mathbf{h}_{(q,o);k}$ и (а) посоките на съответните НП за ZF; (б) техния „среден“ вектор и техните проекции.

За да се реши дали вдвояването на смущаваните потребители би довело до приемливи нива на приетите ICI, трябва да се определи подходяща количествена мярка. За тази цел се предлага такава мярка, наречена „коefficient за намаляване на смущения (Interference Mitigation Coefficient, IMC)“, означена с μ и изразена като съотношението на нулираните чрез Zero-Forcing (ZF) (дължините (ℓ_2 нормите) на $\mathbf{h}'_{(p,n);k}$ и $\mathbf{h}'_{(q,o);k}$) спрямо приетите ICI (дължините на $\mathbf{h}''_{(p,n);k}$ и $\mathbf{h}''_{(q,o);k}$):

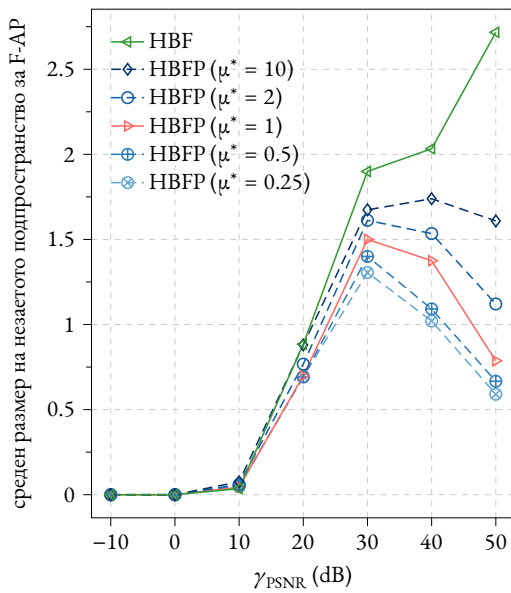
$$\mu = \frac{|\mathbf{h}'_{(p,n);k} + \mathbf{h}'_{(q,o);k}|}{|\mathbf{h}''_{(p,n);k} + \mathbf{h}''_{(q,o);k}|}. \quad (3.14)$$

Оценка на ефективността на предложения подход за HBFP

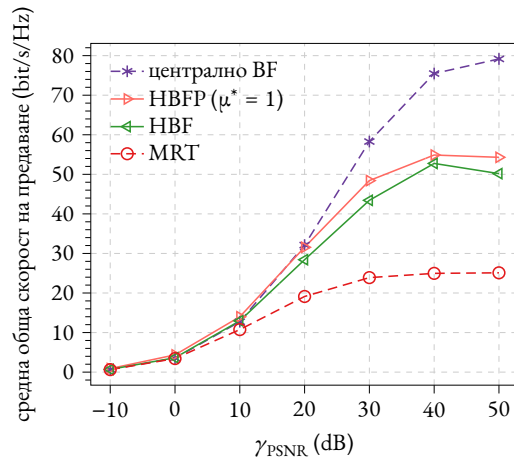
Ефективността на предложия подход за HBFP се оценява чрез провеждане на симулационни експерименти и резултатите се сравняват с тези, постигнати с HBF от [29]. Като показател за ефективността е избрана средната сумарна скорост на предаване в системата, но също така е проучен и размерът на НП. Средната стойност на сумарната скорост на предаване в системата се оценява като функция на псевдо SNR (pseudo SNR, PSNR), което се определя като съотношението на общата мощност на предаване към дисперсията на шума: $\gamma_{\text{PSNR}} = KP/\sigma^2$ при направено допускане $\sigma^2 = \sigma_{(k,m)}^2, \forall (k, m) \in \Upsilon$. Броят на клетките е $K = 4$, така че ефектите от ICI да могат да бъдат ясно наблюдавани. Всяка клетка има радиус на покритие, равен на 1000 метра, и централна F-AP с $T = 6$ антени, за да се оценят ефектите от разнесеността на предавателната антена.

Всяка F-AP обслужва $M = 4$ F-UEs, произволно разположени с равномерно разпределение в зоната на покритие на клетката. Изследвана е само връзката в DL. Затихването на канала зависи от разстоянието между F-UE и F-AP въз основа на модела с двоен наклон [29].

Фигура 3.12 илюстрира зависимостта на средния размер на НП за F-AP като функция на PSNR с прага на ИМС μ^* като параметър. Резултатите за предложението за вдвояване са означени с HBFP, докато тези за оригиналния HBF са добавени за сравнение. Фигура 3.14 сравнява пропускателната способност на предложението с оригиналния подход за HBF и с две различни референтни схеми. Първата е централната (глобална) схема за формиране на лъча, която използва пълната глобална CSI. Тя може да служи като горна граница, защото при нея пълната CSI се препраща към облака и се предполага пълно сътрудничество между F-AP, но това е непрактично. Втората е подходът за предаването с максимално съотношение (Maximum Ratio Transmission, MRT), известно и като съгласувано филтриране (matched filtering) [27], при което всяка F-AP се стреми да увеличи максимално мощността на приетия сигнал от обслужвания F-UE, без да взема предвид смущенията между потребителите.



Фигура 3.12: Зависимост на средния размер на НП за F-AP като функция на PSNR γ_{PSNR} и прага на ИМС μ^* като параметър.



Фигура 3.14: Средна обща скорост на предаване като функция на PSNR γ_{PSNR} за $K = 4$, $M = 4$, $T = 6$ и $\mu^* = 1$.

3.3. Обобщение на трета глава

В първата част на трета глава е доказано, че с прилагане на допълнителна информация, характеризираща местоположението, разпределението на потребителите и тяхната активност, може да се повишат съществено ефективността на управлението на наклона на антените и пропускателната способност, и да се добави проактивност в плътни и динамични хетерогенни RAN. Подходът с изграждане на UHMs внася проактивност и бързодействие в работата мрежата, което е от голяма полза при динамични условия, характеризирани се с чести промени в потребителската активност, мобилност и изисквания към обслужването. Подходът и резултатите от проведените изследвания са описани в статията [A4].

Концепцията на C-RAN предлага множество потенциални подобрения спрямо традиционните архитектури, но има едно съществено препятствие пред широкото ѝ разгръщане и то е ограниченият капацитет на FH линиите между BSs и облака. В мрежата могат да бъдат идентифицирани потребители, чиито канали имат сходни характеристики. Използвайки тези свойства, облачната

архитектура и концепцията за мъглови изчисления, втората част на тази глава въвежда концепцията за вдвояване на смушаваните F-UEs, с което се подобрява пропускателната способност на HBF в F-RAN. Резултатите от симулационните експерименти демонстрират, че чрез изпращане само на качествата на връзките и информацията за вдвояване в облака, може да се доближи глобалният максимум за скоростта на предаване за почти всички стойности на SNR. Това прави подхода за HBF особено привлекателен за бъдещите мобилни мрежи, базирани на F-RAN. Въпреки тези преимущества, методите за HBF притежават сравнително висока изчислителна сложност, която би могла да се преодолее чрез ускоряване на оптимизациите и евентуално чрез прилагане на евристични подходи. Освен това, предложеното подобрение води до слабо повишаване на скоростта на предаване през FHs, което може да бъде незначително, в зависимост от параметрите на мрежата.

3.4. Приноси към трета глава

В резултат на проведените изследвания в трета глава са формулирани следните приноси:

1. Предлага се метод за повишаване на пропускателната способност на RAN чрез изграждане на потребителски топлинни карти и проактивно управление на наклона на антената, базирано на невронни мрежи.
2. Предлага се подход за намаляване на ресурсите за нулиране на смушченията чрез вдвояване на смушаваните F-UEs и прилагане на ефективно йерархично формиране на лъча, който води до увеличаване на пропускателната способност на F-RAN и е верифициран, като е разработен разпределен алгоритъм за изпълнение във всяка F-AP.
3. За определяне ефективността на намаляване на ресурсите за ZF чрез вдвояване на смушаваните F-UEs се предлага нова мярка за сходство на характеристиките на каналите, наречена коефициент на намаляване на смушченията.

ГЛАВА 4. Модели и ефективна оценка на канала в системи с масивни антенни структури, работещи с FDD

Въз основа на изложените в първа глава съображения, моделите на канала в massive MIMO системи, работещи с FDD, и подходите за ефективната му оценка, имат съществено влияние върху пропускателната способност на мрежата за радио достъп. Съгласно теоретичните модели, каналът в тези системи се характеризира със скрита разреденост и е с нисък ранг. Поради стремежа да се сведе до минимум броят на пилотните сигнали и така да се намалят загубите от предаването им, системата е неопределена. Като се вземат предвид тези особености, задачата за оценка на канала може да бъде решена с добре познати алгоритми, основани на CS, и изобщо с методи за възстановяване на разредени сигнали [96, 98, 114, A5, A6].

4.1. Модел на системата

Разглежда се система с масивна антенна структура, работеща в режим FDD с плосък блоков фединг и обслужваща множество потребители. Мрежата за радио достъп е подобна на илюстрираната RAN на фигура 1.3, но се състои само от една BS с N антени, която обслужва K UEs с по една антена. BS предава последователност от M пилотни сигнала $\mathbf{x}_t^H \in \mathbb{C}^{1 \times N}$, $t = 1, \dots, M$ за оценяване на канала в DL $\bar{\mathbf{h}} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$. Потребителят k приема сигнала $\mathbf{y}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ [A5, A6]:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{X} \bar{\mathbf{h}}_k + \mathbf{n}_k, \quad (4.1)$$

където $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_M]^H \in \mathbb{C}^{M \times N}$ е ПМ, която е известна както в BS, така и в UE, $\bar{\mathbf{h}}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ е импулсната характеристика на канала в DL за потребител k и $\mathbf{n}_k \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I}) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ е AWGN с нулева средна стойност и дисперсия σ^2 [A5, A6].

Теоретични модели на канала

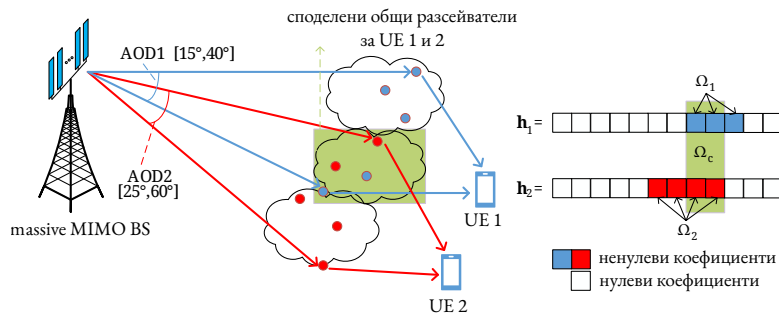
Разглежда се BS с равномерна линейна антенна решетка (Uniform Linear Array, ULA), при което каналът може да се представи във виртуална ъглова област [A5, A6]:

$$\mathbf{h}_k = \mathbf{F} \bar{\mathbf{h}}_k, \quad (4.2)$$

където $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ обозначава унитарната матрица за ъгловата трансформация в BS [96, 98, 114, A5, A6]. Допускайки такава трансформация, приетият сигнал от уравнение (4.1) може да се запише по следния начин [A5, A6]:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{X} \mathbf{F}^H \mathbf{h}_k + \mathbf{n}_k = \mathbf{A} \mathbf{h}_k + \mathbf{n}_k. \quad (4.3)$$

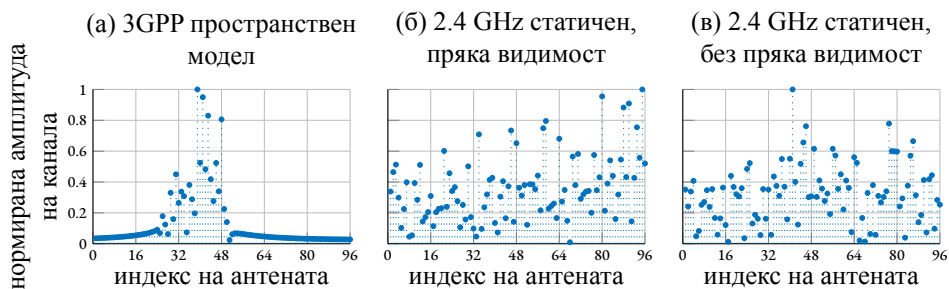
Тази разредена линейна обратна задача е известна в литературата за обработка на сигнали като компресирано отчитане (Compressive Sensing, CS) и като стандартна линейна регресия в статистическата литература [190]. За такива задачи, $M \ll N$, $\mathbf{A}$ е матрица на измерването и каналът $\mathbf{h}_k$ е разреден. За всеки разреден вектор може да се определи множеството от индекси на ненулеви елементи (МИНЕ), наречено support в литературата [98]. На фигура 4.1 е илюстрирано, че различните UEs имат споделени общи локални разсейватели около BS и поради това техните вектори на канала $\mathbf{h}_k$ може да имат частично общо МИНЕ [98].



Фигура 4.1: Илюстрация на системния и каналния модели за $K = 2$ UEs [98].

Реално измерени практически канали

Нормираната амплитуда на импулсната характеристика на канала за девет типа безжични канали е изобразена на фигура 4.5 — теоретичният пространствен модел на канала (Spatial Channel Model, SCM) на 3GPP [98, 207] и осем практически измерени канала, извлечени от набора от данни „Asilomar2016“ от massive MIMO системата ArgosV2 [100, 191]. В автореферата за краткост са показани само първите три изследвани канала.



Фигура 4.5: Сравнение на нормираната амплитуда на канала за различни канали — теоретичен (3GPP SCM) и практически измерени, за BS антена с 96 елемента [A5].

Модели на матрицата с пилотни сигнали

В изследванията на дисертацията се разглеждат два типа ПМ, които се прилагат в уравнения (4.1) и (4.3) — комплексна Гаусова матрица с независими и идентично разпределени елементи (independent and identically distributed complex Gaussian, i.i.d. CG) и матрица с частично дискретно Фурие преобразуване с произволна пермутация (partial discrete Fourier transform with random permutation, PDFT-RP) [A5, A6]. Изборът на i.i.d. CG ПМ се корени в това, че тя е широко използвана в сходни задачи [96, 98, 131] и е проста за моделиране, докато PDFT-RP ПМ е избрана поради потенциално по-малката грешка при оценка на канала спрямо i.i.d. CG [114, 124].

4.2. Алгоритми за оценка на канала в FDD massive MIMO системи, основани на LASSO

Един от ефективните алгоритми за възстановяване на разредени сигнали е LASSO, популярен в статистическата литература [121] и използван за решаването на аналогична задача в [98]. Той е стандартен L1 регуляризиран метод на най-малките квадрати и според него възстановяването на разредения вектор на канала $\mathbf{h}_k$ може да се формулира като следната оптимизационна задача:

$$\min_{\mathbf{h}_k} f(\mathbf{h}_k), \quad \text{subject to} \quad \|\mathbf{y}_k - \mathbf{A}\mathbf{h}_k\|^2 / M \leq (1 + \epsilon)\sigma^2, \quad (4.8)$$

където $f(\mathbf{h}_k)$ е изпъкнала функция и $\epsilon \in (0, 1)$ е малък праг [98].

За оценка на състоянието на съвместно-неравномерно разреден канал в massive MIMO системи с един потребител се предлага алгоритъмът на неравномерно (burst) LASSO [98], който е подобрене на стандартното LASSO, при което каналът се преобразува в такъв с блокова разреденост. В основата на алгоритъма е оптимизационната задача за LASSO от израз (4.8) и за възстановяване на неравномерно-разредения канал $\mathbf{h}_k = \mathbf{L}\mathbf{z}^*$ се решава следната оптимизационна задача:

$$\min_{\mathbf{z}} \bar{f}(\mathbf{z}), \quad \text{subject to} \quad \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{L}\mathbf{z}\|^2 / M \leq (1 + \epsilon)\sigma^2, \quad (4.19)$$

където $\bar{f}(\mathbf{z}) = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{z}_i\|$ се използва за задаване на блоково-разредено ограничение за $\mathbf{z}$.

4.3. Симулационни резултати за практически канали

Ефективността на 11 CS-базирани алгоритъма за оценка на канала се изследва и сравнява по отношение на грешката при възстановяване на CSI. В изследванията са използвани практически измерени характеристики на канала. Изследваните алгоритми са избрани въз основа на тяхната приложимост към massive MIMO системи в режим на FDD и малка грешка при оценка [A5].

Мярка за оценка на получените резултати

За сравнение на резултатите от различните алгоритми се избира нормираната средноквадратична грешка (Normalized Mean Squared Error, NMSE) на оценения канал $\hat{\mathbf{h}}_k$. Това е избраният показател за ефективност по отношение на точността на оценка на канала, тъй като обикновено тя се използва в литературата за оценка и съпоставяне ефективността на алгоритмите [96, 98, 114]. NMSE се дефинира, както следва [A5, A6]:

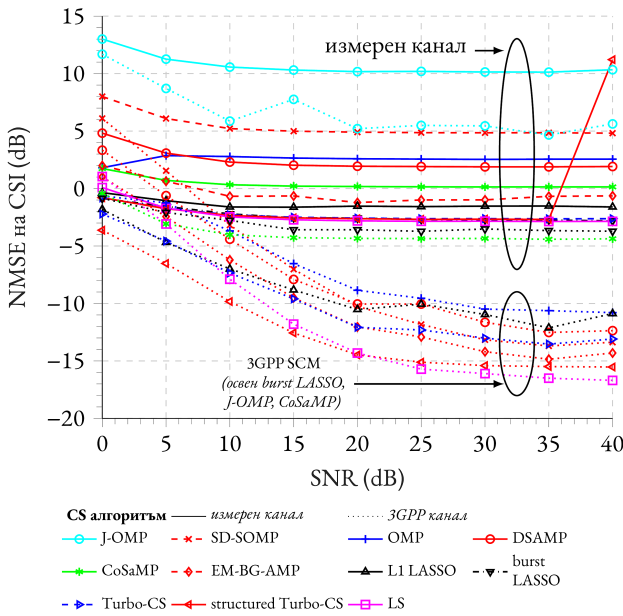
$$\text{NMSE} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\|\mathbf{h}_k - \hat{\mathbf{h}}_k\|^2}{\|\mathbf{h}_k\|^2}, \quad (4.21)$$

като за ясно представяне на резултатите NMSE е представена в dB [A5, A6].

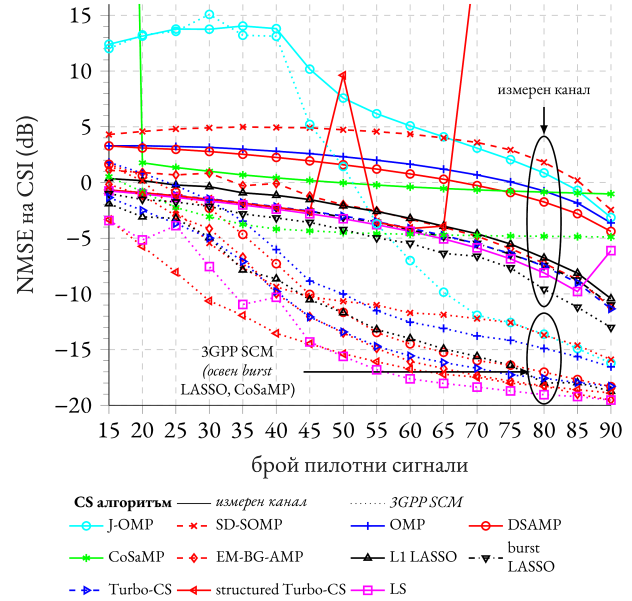
Резултати от симулационните изследвания

Фигура 4.7 сравнява NMSE на оценената CSI в децибели в зависимост от SNR на приетия сигнал y_k . Резултатите от NMSE са усреднени за всички среди, рамки, подносеци и честотни ленти.

Изключение правят алгоритмите L1 и burst LASSO, заради високата им изчислителна сложност, поради което за тези два алгоритъма са проведени симулации само за една подносеща и рамка [A5]. Фигура 4.9 показва зависимостта на ефективността на алгоритмите по отношение на NMSE на CSI в децибели от броя на пилотните сигнали M . Постигнатата NMSE при използване на 3GPP SCM [98, 207] е начертана с пунктирни линии. Съгласно резултатите, методът на най-малките квадрати постига най-малка NMSE, последван от burst LASSO и Turbo-CS (както в стандартния, така и в структурирания си вариант), а алгоритмите L1 LASSO и EM-BG-AMP също водят до добри резултати. Алгоритмите OMP, J-OMP, SD-SOMP, CoSaMP и DSAMP осигуряват практически неприложими резултати за повечето параметри на изследване [A5].



Фигура 4.7: Усреднена NMSE на CSI в зависимост от SNR за $M = 45$ пилотни сигнала [A5].



Фигура 4.9: Усреднена NMSE на CSI в зависимост от броя на пилотните сигнали M за SNR = 20 dB [A5].

4.4. Оценка на канала, базирана на AMP алгоритми и невронни мрежи

Представяне на комплексната оптимизационната задача с реални променливи

За прилагането на някои алгоритми с апроксимирано предаване на съобщенията (Approximate Message Passing, AMP), като GAMP [209], VAMP [190] и EM-VAMP [210], както и на невронни мрежи (например алгоритъмът TISTA [143]) към задача за разрежено възстановяване, е необходимо да се приложи трансформация от задача с реални величини към задача с комплексни величини. Това е необходимо, тъй като тези алгоритми са пригодени да обработват сигнали с реални стойности. Предлага се следната трансформация, като идеята е вдъхновена от [213], където подобна задача с CS е решена в областта на обработката на радарни изображения през стени, а авторите на [214] обсъждат подобни математически оператори за преходи между реални и комплексни описания на сигналите. Такива трансформации преобразуват комплексна матрица в реална матрица с двойни размери ($C^{N \times N} \mapsto \mathbb{R}^{2N \times 2N}$), докато за комплексни вектори, само дължината се удвоява ($C^{N \times 1} \mapsto \mathbb{R}^{2N \times 1}$). Това увеличаване на размерите влияе на времето за изчисляване и сходимостта на алгоритмите [A6].

Първо се разлагат членовете на (4.3) — ПМ $\mathbf{A}$, каналът $\mathbf{h}_k$, приетият сигнал $\mathbf{y}_k$ и шумът $\mathbf{n}_k$ на техните реални и имагинерни части, както следва [A6]:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{A}) & -\text{Im}(\mathbf{A}) \\ \text{Im}(\mathbf{A}) & \text{Re}(\mathbf{A}) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2N \times 2N}, \quad (4.22)$$

$$\boldsymbol{\theta}_k = \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{h}_k) \\ \text{Im}(\mathbf{h}_k) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2N \times 1}, \quad (4.23)$$

$$\boldsymbol{\gamma}_k = \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{y}_k) \\ \text{Im}(\mathbf{y}_k) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2M \times 1}, \quad (4.24)$$

$$\boldsymbol{\eta}_k = \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{n}_k) \\ \text{Im}(\mathbf{n}_k) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2M \times 1}, \quad (4.25)$$

където $\text{Re}(\cdot)$ и $\text{Im}(\cdot)$ представляват съответно реалните и имагинерни оператори. Приемайки тази трансформация, приетият сигнал съгласно уравнение (4.3) може да бъде записан като [A6]:

$$\boldsymbol{\gamma}_k = \mathbf{Z}\boldsymbol{\theta}_k + \boldsymbol{\eta}_k, \quad (4.26)$$

където $\boldsymbol{\gamma}_k$, $\boldsymbol{\theta}_k$ и $\boldsymbol{\eta}_k$ са реални вектори, а $\mathbf{Z}$ е реална матрица [A6]. Съгласно израз (4.23), преобразуваната реална стойност на оценения комплексен вектор на канала $\hat{\mathbf{h}}_k$ е $\hat{\boldsymbol{\theta}}_k$, чиито компоненти могат да бъдат свързани обратно в $\hat{\mathbf{h}}_k$ чрез сумиране на реалния и имагинерния под-вектори на $\hat{\boldsymbol{\theta}}_k$:

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \hat{\boldsymbol{\theta}}_k[1, \dots, N] + i\hat{\boldsymbol{\theta}}_k[N, \dots, 2N] \in \mathbb{C}^{N \times 1}, \quad (4.27)$$

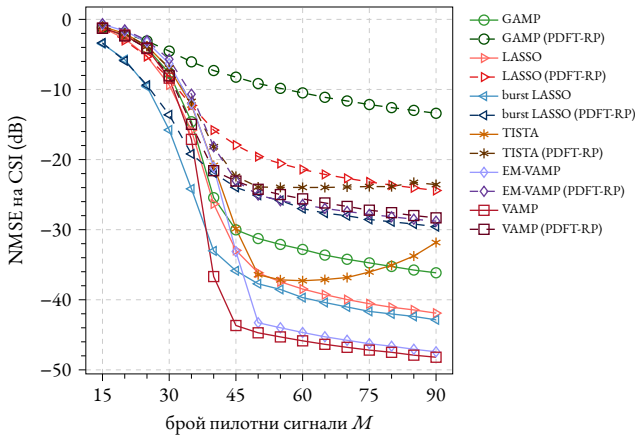
където $i \triangleq \sqrt{-1}$ е имагинерната единица [A6].

4.5. Симулационни резултати за теоретични канали

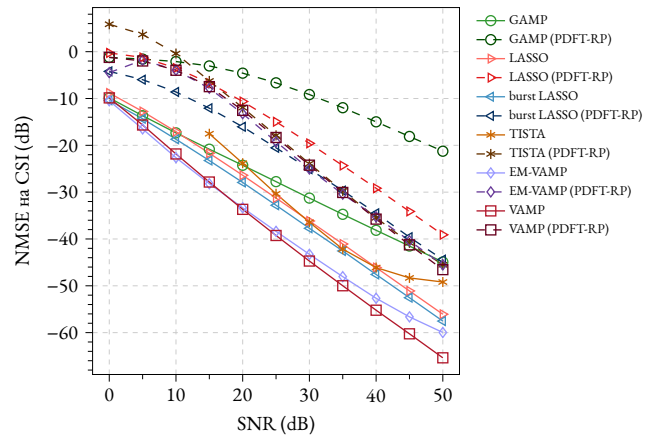
Симулационните изследвания са реализирани програмно на езика Python с помощта на библиотеки NumPy и SciPy в средата Jupyter Notebook. Данните и резултатите са обработени с библиотеки Matplotlib и h5py [206]. Алгоритмите с LASSO [98] са реализирани с пакета CVXPY [215, 216] за изпъкнало оптимизиране в Python. Използвана е реализацията на GAMP [209], VAMP [190] и EM-VAMP [210] от пакета vampyre [A6, 211]. TISTA [143] алгоритъмът е реализиран с библиотеките и инструментите за невронни мрежи PyTorch.

Изследва се massive MIMO система, състояща се от една BS с ULA с $N = 100$ елемента и $K = 10$ обслужвани потребителя. Така отношението между броя на антените на BS N и на потребителите K е $N/K = 10 \geq 4$, което изпълнява допусканията за massive MIMO мобилна мрежа от 5G и следващите поколения с ефективно пространствено мултиплексиране на информационните потоци. Моделът на канала е неравномерно-разреден [98]. Ненулевите елементи на канала в ъглова област $\mathbf{h}_k$ са i.i.d. CG разпределени, а векторът на канала на всеки потребител притежава индивидуално ниво на разреденост, но всички споделят общо МИНЕ с големина $S_c = 10$ [A6].

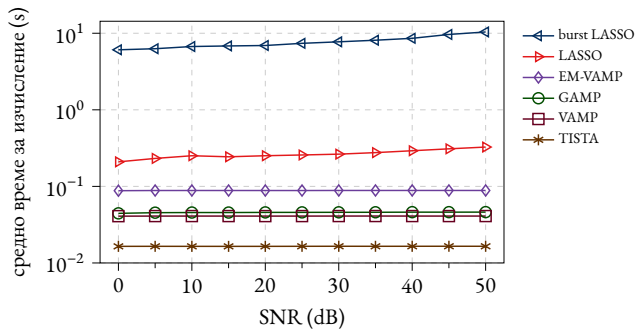
Фигура 4.12 представя работата на алгоритмите при постоянно SNR = 30 dB и промяна на броя пилотни сигнали M . В по-светли цветове са дадени резултатите за работата на алгоритмите с i.i.d. CG матрица, докато тези за PDFT-RP матрици са в по-тъмно. Фигура 4.13 показва зависимостта на NMSE от SNR при зададено $M = 50$. С алгоритмите с i.i.d. CG матрици се постигат добри резултати като най-голяма NMSE има с GAMP, следван от TISTA, LASSO, burst LASSO. Най-добри резултати постигат VAMP и EM-VAMP, като при малко SNR EM-VAMP дава малко по-малка NMSE, докато при SNR > 20 dB, VAMP се представя най-задоволително. TISTA не функционира нормално за SNR < 15 dB и резултатът е необусловен, а при SNR > 15 dB единствено превъзхожда GAMP. Фигури 4.14 и 4.15 представят зависимостта на времето за изчисление от SNR и броя на пилотните сигнали, като може да се допусне, че изчислителната сложност е пропорционална на него. Фигури 4.16 и 4.17 илюстрират времето за обучение на TISTA от същите два параметъра.



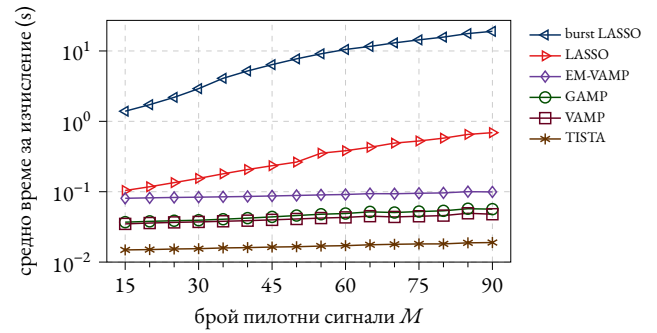
Фигура 4.12: Усреднена NMSE на CSI в зависимост от броя на пилотните сигнали M при SNR = 30 dB.



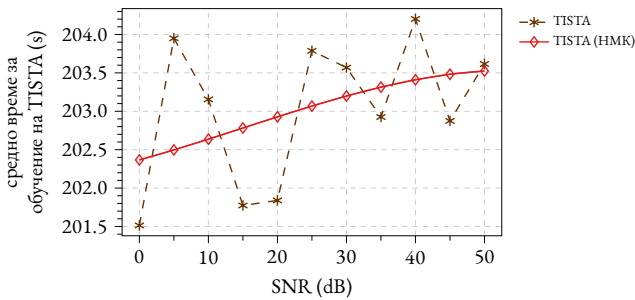
Фигура 4.13: Усреднена NMSE на CSI в децибели, в зависимост от SNR за анализирания алгоритми при $M = 50$ пилотни сигнала.



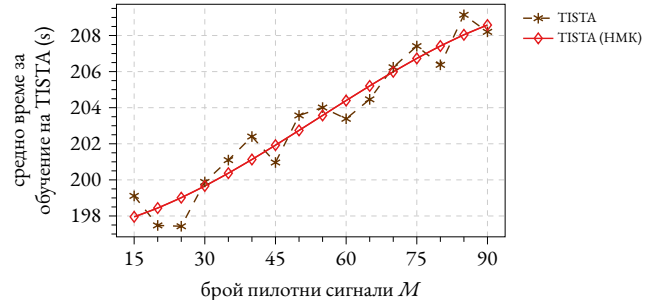
Фигура 4.14: Усреднено време за изчисление (логаритмичен мащаб) в зависимост от SNR за анализирания алгоритми при $M = 50$ пилотни сигнала.



Фигура 4.15: Усреднено време за изчисление (логаритмичен мащаб), в зависимост от броя на пилотните сигнали M за анализирания алгоритми при SNR = 30 dB.



Фигура 4.16: Усреднено време за обучение на TISTA, в зависимост от SNR при $M = 50$ пилотни сигнала.



Фигура 4.17: Усреднено време за обучение на TISTA, в зависимост от броя на пилотните сигнали M при SNR = 30 dB.

4.6. Обобщение на четвърта глава

Сред всички проучени подходи, внедряването на системи с massive MIMO, работещи с FDD, би могло да повиши пропускателната способност, качеството на предаване и спектралната ефективност на мрежата с няколко порядъка. При тези системи един ключов проблем обаче представлява ефективната оценка на канала, понеже с нарастването на броя антени, тя отнема повече време спрямо времето на кохерентност на канала и това прави системата практически неприложима. Четвърта глава е посветена на методите и алгоритмите, с които може да се повиши ефективността на оценката на канала, и разглежда моделите за описание на каналите. Разгледани са

подходи и алгоритми, които правят допускания за нисък ранг и скрита разрежена структура в импулсната характеристика на канала, така че да сведат до минимум броя на необходимите пилотни сигнали.

Накратко са описани оповестените в литературата практически постановки на системи с масивни антенни структури и са съпоставени характеристиките на реално измерени и теоретично моделирани massive MIMO канали, като се доказва, че практическите канали не притежават явна неравномерна разреженост, каквато е заложена в и характерна за повечето теоретични модели.

Изложени и анализирани са резултатите от сравнителни експериментални изследвания на 11 съвременни алгоритъма за оценка на практически канали. Като показател за ефективността по отношение на точността на оценка на канала е избрана NMSE на оценената CSI и е проучена нейната зависимост от SNR и броя на пилотните сигнали. За симулационните експерименти са избрани измервания на канали за носеща честота в диапазоните 2,4 GHz и 5 GHz за три среди с две нива на мобилност от публично достъпния набор от измервания, записан от системата ArgosV2. Ефективността с теоретичния 3GPP SCM модел е използвана като репер и с него ясно личи намаляване на грешката в оценката поради неравномерно-разредената структурата на канала. Въпреки че избраната ПМ е PDFT-RP, количествено е оценена работата и на i.i.d. Гаусова матрица. Представянето на характеристиката на канала в ъглова област също е изследвано и резултатите доказват, че използването на такава трансформация води до сравнително малки разлики в ефективността. Резултатите от тази част на главата са публикувани в статията [A5].

Върху теоретични модели на канала са проведени изследвания с ефективни алгоритми от семейството на AMP и с TISTA, който е основан на дълбоко обучение с невронни мрежи. Най-малка NMSE е достигната с VAMP и EM-VAMP, следвани от burst LASSO, LASSO и TISTA, а резултатите с GAMP са най-слаби. Въпреки сравнително посредствените резултати, TISTA се изчислява с един порядък по-бързо от останалите алгоритми, следван от VAMP, GAMP и EM-VAMP, а за изчислението на LASSO и burst LASSO се изисква значително повече време. Това бързодействие загатва за перспективите пред приложението на невронни мрежи и дълбоко обучение в бъдещите мрежи, които ще изискват все по-малко време за изчисление. Вземайки съвкупно времето за изчисление и NMSE, най-добри резултати са постигнати с VAMP и EM-VAMP. Наблюдавана е интересната зависимост, че прилагането на i.i.d. CG матрица с пилотни сигнали за конкретния модел на канала води до по-малка грешка спрямо PDFT-RP матрицата, което се различава от изследванията с практически канали и от някои трудове в литературата. Резултатите са обобщени и част от тях са публикувани в [A6].

4.7. Приноси към четвърта глава

В резултат на проведените изследвания в четвърта глава са формулирани следните приноси:

1. Чрез съпоставяне на характеристиките на реално измерени и теоретично моделирани massive MIMO канали се доказва, че практическите канали не притежават явна неравномерна разреженост, каквато е заложена в и характерна за повечето теоретични модели.
2. Проведен е сравнителен анализ на точността на алгоритми за оценка на канала в massive MIMO системи с FDD, използвайки практически и теоретични канали. Определени са условията за компромис между SNR и броя на пилотните сигнали, при които се постига предварително зададена точност. Оценява се бързодействието на всеки алгоритъм, от което става ясно, че част от ефективните алгоритми за оценка на канала са с малко бързодействие и е необходимо да бъдат допълнително оптимизирани.

3. Оценява се влиянието на моделирането на ПМ и на представянето на характеристиката на канала във виртуална ъглова област върху грешката при оценка на канала, като се показва, че чрез подходящото им моделиране, грешката се намалява.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНИ ПРИНОСИ

Дисертационният труд разглежда няколко от възможните подходи за повишаване както на пропускателната способност, така и на качеството на предаване в съвременни мрежи за радио достъп с традиционна, облачна и мъглова архитектура. Въз основа на анализа в първа глава се стига до извода, че промяната на спектралната ефективност на системата може да доведе до желаните подобрения. Разгледани са три ключови метода за нейното увеличаване: ССО чрез интелигентно управление на RET на антените в BSs, BF и повишаването на ефективността на оценката на канала в massive MIMO системи, работещи в FDD режим. Особен акцент е поставен върху използването на данни, свързани с потребителите и техните местоположение, характеристика на канала, активност, изисквания към услугата и динамика.

Обобщавайки изложеното в дисертационния труд, може да се счита, че поставената цел е реализирана чрез изпълнение на поставените задачи, вследствие на което са постигнати следните съществени резултати с научно-приложен характер:

1. Предлага се метод с RL за ССО на RAN чрез динамично управление на RET на антените на BSs, който е адаптивен спрямо разпределението и изискванията на потребителите. Методът се основава на формулираната оптимизационна задача и значително повишава качеството на предаване в RAN, не зависи от конкретен модел на мрежата и е подходящ за разпределени изчисления.
2. На базата на предложения метод е разработен RL алгоритъм за разпределено изпълнение в BSs с ниска изчислителна сложност и намаляващ необходимата сигнализация, подходящ за работа в реално време и с различни модели на канала.
3. Предлага се метод за повишаване на пропускателната способност на RAN чрез изграждане на потребителски топлинни карти и проактивно управление на наклона на антената, базирано на невронни мрежи.
4. Предлага се подход за намаляване на ресурсите за нулиране на смущенията чрез вдвояване на смущаваните F-UEs и прилагане на ефективно йерархично формиране на лъча, който води до увеличаване на пропускателната способност на F-RAN и е верифициран, като е разработен разпределен алгоритъм за изпълнение във всяка F-AP.
5. За определяне ефективността на намаляване на ресурсите за ZF чрез вдвояване на смущаваните F-UEs се предлага нова мярка за сходство на характеристиките на каналите, наречена коефициент на намаляване на смущенията.
6. Чрез съпоставяне на характеристиките на реално измерени и теоретично моделирани massive MIMO канали се доказва, че практическите канали не притежават явна неравномерна разреденост, каквато е заложена в и характерна за повечето теоретични модели.
7. Проведен е сравнителен анализ на точността на алгоритми за оценка на канала в massive MIMO системи с FDD, използвайки практически и теоретични канали. Определени са условията за компромис между SNR и броя на пилотните сигнали, при които се постига

предварително зададена точност. Оценява се бързодействието на всеки алгоритъм, от което става ясно, че част от ефективните алгоритми за оценка на канала са с малко бързодействие и е необходимо да бъдат допълнително оптимизирани.

8. Оценява се влиянието на моделирането на ПМ и на представянето на характеристиката на канала във виртуална ъглова област върху грешката при оценка на канала, като се показва, че чрез подходящото им моделиране, грешката се намалява.

IV. ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ

Съкращение	Значение	Съкращение	Значение
ДНД	диаграма на насочено действие на антена	i.i.d.	independent and identically distributed
МИНЕ	множеството от индекси на ненулевите елементи	ICI	Inter-Cell Interference
НП	незаето подпространство	IMC	Interference Mitigation Coefficient
ОС	обработка на сигналите	IoE	Internet of Everything
ОЧЛ	основна честотна лента	IoT	Internet of Things
ПМ	пилотна матрица	KPIs	Key Performance Indicators
ПП	подпространство за предаване	MIMO	Multiple Input Multiple Output
СП	сигналното пространство	MRT	Maximum Ratio Transmission
AMP	Approximate Message Passing	NMSE	normalized mean squared error
BF	beamforming	NN	Neural Network
BS	Base Station	PDFT-RP	partial DFT with random permutation
C-RAN	Cloud computing-based RAN	RAN	Radio Access Network
CCO	Coverage and Capacity Optimization	RET	Remote Electrical Tilt
CG i.i.d.	complex Gaussian i.i.d.	RL	Reinforcement Learning
CS	Compressive Sensing	RM	Reward Matrix
CSI	Channel State Information	SCM	spatial channel model
DFT	discrete Fourier transform	SINR	signal-to-interference-plus-noise ratio
DL	downlink	SNR	Signal-to-Noise Ratio
EM-VAMP	Expectation-Maximization VAMP	SON	Self-Organizing Networks
F-RAN	Fog computing-based RAN	TISTA	Trainable Iterative Soft Thresholding Algorithm
FDD	Frequency-Division Duplexing	UE	User Equipment
FH	fronthaul	UHM	User Heat Maps
GAMP	Generalized AMP	ULA	Uniform Linear Array
HBF	Hierarchical Beamforming	VAMP	Vector AMP
HBFp	HBF with Pairing of interfered F-Ues	ZF	Zero-Forcing

V. СПИСЪК С ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

- [A1] Н. Данданов, „Самооптимизация на капацитета и покритието в мобилна мрежа с помощта на машинно обучение“, в *Сборник с доклади на XI Национална студентска научно-техническа конференция*, Созопол: Технически Университет - София, 22 септ. 2015, стр. 572—579, ISBN: 1314-0442.
- [A2] N. Dandanov, H. Al-Shatri, A. Klein, and V. Poulkov, “Dynamic Self-Optimization of the Antenna Tilt for Best Trade-off Between Coverage and Capacity in Mobile Networks”, *Wireless Personal Communications*, vol. 92, no. 1, pp. 251–278, Jan. 2017, ISSN: 0929-6212, 1572-834X. DOI: [10.1007/s11277-016-3849-9](https://doi.org/10.1007/s11277-016-3849-9).
- [A3] N. Dandanov, S. R. Samal, S. Bandyopadhyaya, V. Poulkov, K. Tonchev, and P. Koleva, “Comparison of Wireless Channels for Antenna Tilt Based Coverage and Capacity Optimization”, in *2018 Global Wireless Summit (GWS)*, Nov. 2018, pp. 119–123. DOI: [10.1109/gws.2018.8686597](https://doi.org/10.1109/gws.2018.8686597).

- [A4] P. Semov, P. Koleva, N. Dandanov, V. Poulkov, and O. Asenov, “Performance Optimization in Heterogeneous Wireless Access Networks Based on User Heat Maps”, in *2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Jul. 2018, pp. 1–5. DOI: [10.1109/TSP.2018.8441319](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.8441319).
- [A5] N. Dandanov, K. Tonchev, V. Poulkov, and P. Koleva, “Evaluation of Channel Estimation Algorithms Using Practically Measured Channels in FDD Massive MIMO”, in *Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures*, Springer, Cham, Mar. 28, 2019, pp. 228–242. DOI: [10.1007/978-3-030-23976-3_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23976-3_21).
- [A6] N. Dandanov, K. Tonchev, V. Poulkov, and P. Koleva, “Approximate Message Passing for Downlink Sparse Channel Estimation in FDD Massive MIMO”, in *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Jul. 2019, pp. 487–491. DOI: [10.1109/tsp.2019.8768850](https://doi.org/10.1109/tsp.2019.8768850).

VI. ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, “A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems”, *IEEE Network*, pp. 1–9, 2019, ISSN: 1558-156X. DOI: [10.1109/mnet.001.1900287](https://doi.org/10.1109/mnet.001.1900287).
- [7] P. Marsch, I. Da Silva, O. Bulakci, M. Tesanovic, S. E. El Ayoubi, T. Rosowski, A. Kaloxylou, and M. Boldi, “5G Radio Access Network Architecture: Design Guidelines and Key Considerations”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 11, pp. 24–32, Nov. 2016, ISSN: 1558-1896. DOI: [10.1109/mcom.2016.1600147cm](https://doi.org/10.1109/mcom.2016.1600147cm).
- [8] X. Costa-Perez, J. Swetina, T. Guo, R. Mahindra, and S. Rangarajan, “Radio access network virtualization for future mobile carrier networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 7, pp. 27–35, Jul. 2013, ISSN: 1558-1896. DOI: [10.1109/mcom.2013.6553675](https://doi.org/10.1109/mcom.2013.6553675).
- [9] L. M. Correia, D. Zeller, O. Blume, D. Ferling, Y. Jading, I. Gódor, G. Auer, and L. V. Der Perre, “Challenges and enabling technologies for energy aware mobile radio networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 11, pp. 66–72, Nov. 2010, ISSN: 1558-1896. DOI: [10.1109/mcom.2010.5621969](https://doi.org/10.1109/mcom.2010.5621969).
- [10] M. Vaezi and Y. Zhang, *Cloud Mobile Networks: From RAN to EPC*, ser. Wireless Networks. Springer International Publishing, 2017, ISBN: 978-3-319-54495-3. DOI: [10.1007/978-3-319-54496-0](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54496-0).
- [11] Е. Пенчева и И. Атанасов, *Мобилни мрежи*, 2-о изд., 2 т. София: МП Издателство на Технически университет - София, ноем. 2007, т. 1, 153 стр., ISBN: 978-954-438-649-8.
- [12] Б. Цанков, *Телекомуникации - фиксирани, мобилни и IP*, 1-о изд. София: Нови знания, 2006, 310 стр., ISBN: 978-954-9315-58-5.
- [13] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005, ISBN: 978-0-521-83716-3.
- [15] T. Q. Duong, X. Chu, and H. A. Suraweera, Eds., *Ultra-Dense Networks for 5G and Beyond: Modelling, Analysis, and Applications*, 1 edition, Hoboken, NJ: Wiley, Apr. 15, 2019, 312 pp., ISBN: 978-1-119-47369-5.
- [16] И. Илиев, „Мобилни Комуникации“, Лекции и записки по (Технически Университет — София), 2019.
- [17] В. Пулков и П. Колева, *Основи на предаване на информацията*. София: Нови знания, 2009, 308 стр., ISBN: 978-954-9315-97-4.
- [18] C. E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication”, *Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379–423, 1948, ISSN: 1538-7305. DOI: [10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x).
- [19] T. L. Marzetta, *Fundamentals of Massive MIMO*. Cambridge, United Kingdom ; New York: Cambridge University Press, 2016, 225 pp., ISBN: 978-1-107-17557-0.
- [20] Y. Xu, G. Yue, and S. Mao, “User Grouping for Massive MIMO in FDD Systems: New Design Methods and Analysis”, *IEEE Access*, vol. 2, pp. 947–959, 2014, ISSN: 2169-3536. DOI: [10.1109/access.2014.2353297](https://doi.org/10.1109/access.2014.2353297).
- [27] E. Björnson, M. Bengtsson, and B. Ottersten, “Optimal Multiuser Transmit Beamforming: A Difficult Problem with a Simple Solution Structure [Lecture Notes]”, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 4, pp. 142–148, Jul. 2014, ISSN: 1053-5888. DOI: [10.1109/msp.2014.2312183](https://doi.org/10.1109/msp.2014.2312183).
- [14] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, May 26, 2005, 600 pp., ISBN: 978-1-139-44466-8. DOI: [10.1017/CB09780511807213](https://doi.org/10.1017/CB09780511807213). Google Books: [GdsLAQAAQBAJ](https://books.google.com/books?id=LAQAAQBAJ).
- [28] F. W. Vook, A. Ghosh, and T. A. Thomas, “MIMO and beamforming solutions for 5G technology”, in *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, Jun. 2014, pp. 1–4. DOI: [10.1109/MWSYM.2014.6848613](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2014.6848613).
- [29] H. Al-Shatri and A. Klein, “Hierarchical beamforming for downlink fog RAN”, in *2017 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Aug. 2017, pp. 199–204. DOI: [10.1109/ISWCS.2017.8108110](https://doi.org/10.1109/ISWCS.2017.8108110).
- [30] Y. Shi, J. Zhang, K. B. Letaief, B. Bai, and W. Chen, “Large-scale convex optimization for ultra-dense cloud-RAN”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 3, pp. 84–91, Jun. 2015, ISSN: 1558-0687. DOI: [10.1109/mwc.2015.7143330](https://doi.org/10.1109/mwc.2015.7143330).
- [31] T. Q. S. Quek, M. Peng, O. Simeone, and W. Yu, *Cloud Radio Access Networks: Principles, Technologies, and Applications*. Cambridge University Press, Feb. 2, 2017, 499 pp., ISBN: 978-1-107-14266-4. Google Books: [If_bjwEACAAJ](https://books.google.com/books?id=bjwEACAAJ).
- [32] A. Checko, H. L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. S. Berger, and L. Dittmann, “Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, 2015, ISSN: 1553-877X. DOI: [10.1109/COMST.2014.2355255](https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2355255).

- [33] H. Zhang, Y. Qiu, X. Chu, K. Long, and V. C. M. Leung, “Fog Radio Access Networks: Mobility Management, Interference Mitigation, and Resource Optimization”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 6, pp. 120–127, Dec. 2017, ISSN: 1536-1284. DOI: [10.1109/mwc.2017.1700007](#).
- [34] J. Rodriguez, *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. John Wiley & Sons, Jun. 22, 2015, 333 pp., ISBN: 978-1-118-86752-5. Google Books: [xIxxBgAAQBAJ](#).
- [35] S. Hämäläinen, H. Sanneck, and C. Sartori, *LTE Self-Organising Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency*. John Wiley & Sons, Jan. 30, 2012, 428 pp., ISBN: 978-1-119-97067-5. Google Books: [qgLS2D5Hx8AC](#).
- [75] F. Ni, Y. Zang, and Z. Feng, “A study on cellular wireless traffic modeling and prediction using Elman Neural Networks”, in *2015 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, vol. 01, Dec. 2015, pp. 490–494. DOI: [10.1109/iccsnt.2015.7490796](#).
- [96] X. Rao and V. K. N. Lau, “Distributed Compressive CSIT Estimation and Feedback for FDD Multi-user Massive MIMO Systems”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 12, pp. 3261–3271, Jun. 2014, ISSN: 1053-587X, 1941-0476. DOI: [10.1109/TSP.2014.2324991](#). arXiv: [1405.2786](#).
- [98] A. Liu, V. Lau, and W. Dai, “Joint burst LASSO for sparse channel estimation in multi-user massive MIMO”, in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2016, pp. 1–6. DOI: [10.1109/ICC.2016.7511075](#).
- [100] C. Shepard, H. Yu, N. Anand, E. Li, T. Marzetta, R. Yang, and L. Zhong, “Argos: Practical many-antenna base stations”, ACM Press, 2012, p. 53, ISBN: 978-1-4503-1159-5. DOI: [10.1145/2348543.2348553](#).
- [114] L. Chen, A. Liu, and X. Yuan, “Structured Turbo Compressed Sensing for Massive MIMO Channel Estimation Using a Markov Prior”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 5, pp. 4635–4639, May 2018, ISSN: 0018-9545, 1939-9359. DOI: [10.1109/TVT.2017.2787708](#).
- [121] E. J. Candes and M. B. Wakin, “An Introduction To Compressive Sampling”, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 21–30, Mar. 2008, ISSN: 1053-5888. DOI: [10.1109/MSP.2007.914731](#).
- [124] J. Ma, X. Yuan, and L. Ping, “Turbo Compressed Sensing with Partial DFT Sensing Matrix”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 2, pp. 158–161, Feb. 2015, ISSN: 1070-9908. DOI: [10.1109/LSP.2014.2351822](#).
- [131] J. Dai, A. Liu, and H. C. So, “Non-Uniform Burst-Sparsity Learning for Massive MIMO Channel Estimation”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 67, no. 4, pp. 1075–1087, Feb. 2019, ISSN: 1053-587X. DOI: [10.1109/TSP.2018.2889952](#).
- [143] D. Ito, S. Takabe, and T. Wadayama, “Trainable ISTA for Sparse Signal Recovery”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 67, no. 12, pp. 3113–3125, Jun. 2019, ISSN: 1053-587X. DOI: [10.1109/tsp.2019.2912879](#).
- [175] 3GPP. (Mar. 25, 2017). “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects”, [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2493> (visited on 10/08/2019).
- [178] M. Mohri, A. Rostamizadeh, and A. Talwalkar, *Foundations of Machine Learning*, second edition edition. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, Dec. 25, 2018, 504 pp., ISBN: 978-0-262-03940-6.
- [179] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*, second edition edition. Cambridge, Massachusetts: A Bradford Book, Nov. 13, 2018, 552 pp., ISBN: 978-0-262-03924-6.
- [182] M. J. Feuerstein, K. L. Blackard, T. S. Rappaport, S. Y. Seidel, and H. H. Xia, “Path loss, delay spread, and outage models as functions of antenna height for microcellular system design”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, no. 3, pp. 487–498, Aug. 1994, ISSN: 0018-9545. DOI: [10.1109/25.312809](#).
- [186] M. Peng, S. Yan, K. Zhang, and C. Wang, “Fog-computing-based radio access networks: Issues and challenges”, *IEEE Network*, vol. 30, no. 4, pp. 46–53, Jul. 2016, ISSN: 1558-156X. DOI: [10.1109/mnet.2016.7513863](#).
- [190] S. Rangan, P. Schniter, and A. K. Fletcher, “Vector approximate message passing”, in *2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Jun. 2017, pp. 1588–1592. DOI: [10.1109/isit.2017.8006797](#).
- [191] C. Shepard, H. Yu, and L. Zhong, “ArgosV2: A flexible many-antenna research platform”, ACM Press, 2013, p. 163, ISBN: 978-1-4503-1999-7. DOI: [10.1145/2500423.2505302](#).
- [206] A. Collette. (). “HDF5 for Python”, [Online]. Available: <https://www.h5py.org/> (visited on 10/30/2018).
- [207] J. Salo, G. Del Galdo, J. Salmi, P. Kyösti, M. Milojevic, D. Laselva, and C. Schneider, “MATLAB implementation of the 3GPP Spatial Channel Model (3GPP TR 25.996)”, Jan. 2005.
- [209] S. Rangan, “Generalized approximate message passing for estimation with random linear mixing”, in *2011 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, Jul. 2011, pp. 2168–2172. DOI: [10.1109/isit.2011.6033942](#).
- [210] A. K. Fletcher and P. Schniter, “Learning and free energies for vector approximate message passing”, in *2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Mar. 2017, pp. 4247–4251. DOI: [10.1109/icassp.2017.7952957](#).
- [211] *Approximate Message Passing in Python*, in collab. with E. Tramel, M. Borgerding, and S. Rangan, GAMPTeam, Feb. 11, 2019.
- [213] F. H. C. Tivive and A. Bouzerdoum, “A compressed sensing method for complex-valued signals with application to through-the-wall radar imaging”, in *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, May 2013, pp. 2144–2148. DOI: [10.1109/icassp.2013.6638033](#).
- [214] J. C. Gilbert and C. Jozs. (Mar. 28, 2017). “Plea for a semidefinite optimization solver in complex numbers”, [Online]. Available: <https://hal.inria.fr/hal-01422932/document> (visited on 03/12/2019).
- [215] A. Agrawal, R. Verschuere, S. Diamond, and S. Boyd, “A rewriting system for convex optimization problems”, *Journal of Control and Decision*, vol. 5, no. 1, pp. 42–60, 2018. DOI: [10.1080/23307706.2017.1397554](#).
- [216] S. Diamond and S. Boyd, “CVXPY: A Python-Embedded modeling language for convex optimization”, *Journal of Machine Learning Research*, vol. 17, no. 83, pp. 1–5, 2016.



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA
FACULTY OF TELECOMMUNICATIONS
DEPARTMENT “COMMUNICATION NETWORKS”

Nikolay Georgiev Dandanov, M.Sc.

**METHODS FOR INCREASING THE THROUGHPUT AND QUALITY OF
TRANSMISSION IN CLOUD RADIO ACCESS NETWORKS**

ABSTRACT of Ph.D. THESIS

The topic of the dissertation relates to the development of novel methods and algorithms for increasing the throughput and quality of transmission in traditional, cloud and fog radio access networks (RANs) for application in 5G and beyond. This work proposes and analyzes several approaches for increasing the spectral and energy efficiency of RANs which leads to improvements of the system capacity.

The goal of the Ph.D. research is *to develop new methods* based on remote electrical tilt (RET), beamforming and massive MIMO, *for increasing the throughput and quality of transmission in RANs*. Data related to the specifics of user location, distribution, channels, activity, mobility and service requirements is also utilized.

A major factor influencing the coverage and capacity optimization (CCO) in RANs is related to the configuration of the base station (BS) antennas and especially the antenna tilt angle. By utilizing RET, a method for CCO based on reinforcement learning is proposed. The simulation results show that the algorithm significantly improves the overall network capacity while reducing operational costs and complexity as compared to no tilt optimization. The effect of wireless channel model selection is also investigated and a comparative analysis of the application of various propagation models is carried out. An approach for dynamic and proactive performance optimization in dense and dynamic heterogeneous RANs taking into consideration the user distribution, mobility and activity is proposed. The approach is based on building up User Heat Maps (UHM) in consecutive time slots for a given area and predicting the map state in the next time slot. To avoid storage of big volumes of data and computational complexity, and to ensure real-time operation, the prediction is based on a Neural Network (NN) architecture utilizing the data from UHM. For alleviating the effect of limited-capacity fronthaul links in Fog RANs (F-RANs) and exploiting their hierarchical architecture, the idea of Hierarchical Beamforming (HBF) has been introduced in the literature. An enhancement to HBF is proposed which aims to manage Inter-Cell Interference (ICI) more efficiently by introducing the concept of grouping in pairs the channels between an F-AP and interfered F-UEs. A new similarity metric termed Interference Mitigation Coefficient (IMC) is proposed for determining whether the pairing would result in effective ICI reduction, and a distributed algorithm is devised at every F-AP deciding which channels to interfered F-UEs have sufficient similarity for pairing. An important challenge in massive multiple-input multiple-output (MIMO) systems operating with frequency-division duplexing (FDD) is to accurately estimate the channel response with low pilot signal overhead. Relying on the sparse structure of the channel vector, modern sparse signal recovery algorithms are investigated and applied to the channel estimation problem, and the estimation error and computation time is analyzed. As some of the algorithms are defined for real-valued problems, a means to appropriately transform the complex-valued problem is proposed. The effects of pilot matrix design, angular domain representation and prior probability distribution modeling are also considered. Compared to theoretical models, it is demonstrated that the practically measured channels do not always exhibit burst-sparsity.