



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**Факултет по телекомуникации
Катедра „Комуникационни мрежи“**

маг. инж. Виктор Росенов Стойнов

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА РЕСУРСИ В
АБСТРАКТНО МОДЕЛИРАНИ ЗАТВОРЕНИ СРЕДИ В
МРЕЖИ ОТ НОВО ПОКОЛЕНИЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация
за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3. Комуникационна и компютърна техника

Научна специалност: Теоретични основи на комуникационната техника

Научен ръководител:
доц. д-р Златка Вълкова-Джарвис

Рецензенти:
проф. д-р Георги Любенов Илиев
доц. д-р Розалина Стефанова Димова

СОФИЯ, 2018 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Комуникационни мрежи“ към Факултет по телекомуникации на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 19.02.2018 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 28.06.2018 г. от 17,00 часа в почивна база на ТУ-София в гр. Созопол, на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-84 / 12.03.2018 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р Георги Любенов Илиев
2. доц. д-р Златка Вълкова Вълкова-Джарвис
3. доц. д-р Розалина Стефанова Димова
4. доц. д-р Валентина Илиева Маркова
5. доц. д-р Борислав Георгиев Найденов

Рецензенти:

1. проф. д-р Георги Любенов Илиев
2. доц. д-р Розалина Стефанова Димова

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по телекомуникации на ТУ-София, блок № 1, кабинет № 1254.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Комуникационни мрежи“ на Факултет по телекомуникации. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Виктор Росенов Стойнов

Заглавие: Изследване на разпределението на ресурси в абстрактно моделирани затворени среди в мрежи от ново поколение

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Загубите при разпространението на сигналите, дължащи се на гъсто разположени сгради, затрудняват прогнозирането на покритието на клетъчните мрежи в градските райони. Негативните ефекти поради наличието на препятствия от различен вид в средата на разпространение на сигналите, стават все по-ясно изразени в среди с наличие на множество сгради и в гъстонаселените райони. Това налага използването на различни по мощност на предаване възли, които да гарантират покритие в зони, където големите базови станции не успяват. В този контекст – мобилните мрежи повишават своята хетерогенност. Също така клетките постоянно променят своята форма поради наличието на нискоенергийни възли. Освен това, с развитието на мрежите от ново поколение местоположенията на макро и микро базовите станции стават трудно определяеми и хексагоналният модел на клетките се превръща в неудобен за използване. Също така, той не предлага необходимото ниво на реалистичност.

В този контекст е наложително изграждането на улеснени от изчислителна и симулационна гледна точка абстрактни модели, които да дефинират с необходимата точност различни затворени среди на разпространение на сигналите. По този начин могат да бъдат изучени разнообразни важни характеристики и особености при осигуряване на услуги на потребителите в градска среда. В същото време се налага минимизиране и управление на наличната вътре- и междуклетъчна интерференция, която неминуемо се регистрира при наличието на множество възли с различна мощност на предаване, намиращи се в непосредствена близост един до друг. Това може да бъде постигнато чрез качествено и гъвкаво управление на наличните мрежови ресурси. Изследванията в литературата не представят достатъчно надеждни изводи, често продиктувано от нереалистичния характер на системните модели, които са използвани.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Основната цел на настоящия дисертационен труд е да бъдат предложени методи и модели за изследване на характеристиките и подобряване на качеството на услугите, предоставяни на потребители, локализирани в затворени пространства, от страна на мобилната мрежа. Поради множеството особености при разпространението на сигнали в затворени пространства е необходимо изграждането на математически модели на затворени среди и оптимизиране на управлението на радио-ресурсите.

За постигане на тази цел са формулирани следните задачи:

1. Разработване на абстрактни модели на затворени среди. Анализ на новопредложените абстрактни модели и обобщаване на основни изводи за характеристиките на разпространение на сигналите в подобни среди.
2. Модифициране и оптимизиране на базовите теоретични модели, с цел постигане на реалистичен модел, който да предоставя възможност за достигане до надеждни изводи.
3. Сравнителен анализ на работата на алгоритмите за разпределяне на мрежови ресурси в затворени среди, посредством обобщаващ, надежден и адаптивен сравнителен критерий.
4. Оптимизиране на алгоритми за разпределяне на ресурси с цел постигане на по-ефективна работа и минимизиране на интерференцията в затворени среди.
5. Анализ и оптимизиране на работата на СА технологията при обслужване на потребители в LTE/LTE-A хетерогенни мрежи.

Структура на дисертационния труд

В настоящия дисертационен труд е извършено изследване на особеностите при разпространение на сигнали в градска среда чрез разработването на абстрактни модели на затворени среди в контекста на съвременните хетерогенни мобилни мрежи. В същото време, е направен сравнителен анализ на множество класически и ново предложени алгоритми и методи за разпределяне на мрежови ресурси. Работата им в колаборация с едновременно използване на множество носещи ресурси (Carrier Aggregation – CA) също е изследвано, с цел анализиране на съвместната им работа при минимизиране на интерференцията и повишаване на производителността на потребителите.

В първа глава е направен детайлен обзор на литературата. Фокусът пада върху преглед на новите технологии, които ще бъдат част от мрежите от ново поколение – 5G. Също така се обръща особено внимание на хетерогенните мрежи, като мобилни мрежи, които са бъдещето при осигуряването на покритие в градски среди. Неминуемо наличието на множество възли с различно предназначение предполага и появата на интерференция, която може да влоши сериозно качеството на предоставяните от оператора услуги. Разгледани са различни техники за борба (минимизиране и управление) на интерференцията. Като логично допълнение е направен преглед и на различни техники за управление на мрежовите ресурси. В среда, в която са налични високи нива на интерференция, именно интелигентното управление на наличните, често ограничени като количество, мрежови ресурси може да доведе до подобряване на капацитета на мрежата и на спектралната ефективност. В контекста на градските среди, които са обект на изследвания в настоящия дисертационен труд, са разгледани различни способности за дефиниране чрез абстрактни модели на затворени среди на разпространение на сигнали.

Във втора глава са предложени четири абстрактни модела за дефиниране на затворени среди на разпространение на сигналите. Те позволяват да бъдат направени различни заключения по отношение на предоставянето на мобилни услуги в подобни среди. Разработеният реалистичен генератор на затворени среди (RIEG) се характеризира с по-високо ниво на реалистичност в сравнение с другите модели. Той бива използван по-късно в дисертацията като средство за реализиране на симулационна среда за изследване на различни алгоритми и методи за разпределяне на мрежови ресурси. Чрез сравнителен анализ на разработените теоретични модели са идентифицирани основните особености при разпространението на сигнали в затворени среди. Дефинирано е влиянието на средите върху SIR и производителността на потребителите. Изследвано е влиянието на вариращ брой потребители при използването на различните абстрактни модели.

В трета глава е предложен анализ и сравнение на пет алгоритъма за разпределяне на мрежови ресурси в затворени среди. Те може да бъдат разделени на две основни групи – алгоритми, постигащи високо ниво на справедливост при разпределяне на ресурси (PF, RR и RF) и алгоритми, максимизиращи производителността на потребителите (mTP и bCQI). Сравнението е осъществено чрез използване на новопредложена метрика наречена Сравнителен фактор (Comparative Factor – CF). Той взема предвид едновременно различни параметри характеризиращи работата на мобилната мрежа и се доказва като надежден способ за сравнение на различни алгоритми, методи и модели. PF алгоритъма показва най-добри характеристики при работа в затворени среди, в сравнение с другите изследвани методи и затова е използван в изследванията в следващата глава.

В четвърта глава е осъществено модифициране на PF алгоритъма по отношение на методите са осредняване, използвани от него. Предложени са два нови квантилни и двадесет нови квантилни методи. Всеки един от тях намира своето приложение отчитайки специфичните изисквания, които потребителите имат в конкретната мобилна мрежа. На базата на два от квантилните методи, е разработен алгоритъм – SBQMM-PF, който взема предвид моментното

отношение сигнал към интерференция и шум за всеки един потребител. По този начин, се постигат по-добри резултати, както за производителността на потребителите, така и по отношение на справедливото разпределяне на ресурси, в сравнение с класическия метод, използван в RF.

Практическа приложимост

Основна цел при разработването на аналитичните модели е лесното дефиниране на реални събития и обекти (група от обекти) с цел по-лесното им изучаване и модифициране за нуждите на мобилните мрежи. В този контекст, разработеният RIEG може да бъде използван от разработчиците с цел тестване на различни технологии и алгоритми в етапа на разработка и тестване. Необходимо е доразработване на RIEG в посока на отчитане на допълнителни явления, характеризиращи една реалистична среда на разпространение на сигнали – дифракция, отражения.

По отношение на разработените алгоритми, те могат също да намерят приложение в реална работеща мобилна мрежа. За да се случи това, трябва да бъдат направени допълнителни изследвания и действия в посока повишаване на тяхната интелигентност и гъвкавост.

Апробация

Апробацията на изследванията в дисертацията включва използване на теоретичен и симулационен подход. Теоретичният подход е приложен при дефиниране на основни параметри, свързани с разпределението на препятствия в пространството и за оценка на отношението сигнал – интерференция, посредством изчисления в среда MATLAB. Симулационният подход, реализиран в среда на MATLAB чрез използването на LTE-симулатор, е приложен за симулиране на мобилна мрежа с активни потребители.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 9 научни статии, от които 1 самостоятелна. 6 от тях са представени на престижни конференции в Европа, а останалите са отпечатани в научни списания у нас.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 157 страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 157 литературни източници, като 152 са на латиница, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 67 фигури и 7 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Особенности на телекомуникационни мрежи от ново поколение и разпространението на сигнали в затворени пространства

В първата глава от дисертационния труд е направен обзор на основните проблеми свързани с мрежите от ново поколение – внедряването на модерни технологии, борбата с интерференцията в хетерогенни мрежи, управлението на мрежови ресурси и т.н.

Като цяло, 5G базираните мрежи имат трудната задача да разрешат някои основни проблемни въпроси, зададени през последните години. На първо място, мрежите от ново поколение трябва да предложат подобрение в мрежите за достъп, нови технологии за достъп, да развият идеята на хетерогенните мрежи, и да помогнат за еволюирането на WLAN технологиите. На практика, 5G мрежите трябва да представляват една комбинация от подобрения в топологията на мрежата и нови възможности за UE [A1], [A2].

В основата на мрежите от ново поколение лежи разработването и експлоатацията на хетерогенните мрежи. Те дефинират съвкупност от възли в мрежата, работещи с различна мощност на излъчване (предаване). Вече добре познатите големи базови станции ще работят в колаборация с много на брой по-малки устройства, които ще бъдат разполагани на места, където базовата станция не може да предостави достатъчно силен сигнал и съответно – достатъчно добро качество на услугите. В този контекст, едновременно функциониране на макро- и микро-клетки и липсата на контрол при разполагането на ниско енергийните възли предполага наличието на клетки с неправилна форма, поради което може да се наблюдава повишаване както на вътреклетъчната така и на междуклетъчната интерференция. Именно затова са разгледани усъвършенствани методи за управление на интерференцията и способите за интелигентно разпределяне на мрежовите ресурси.

По отношение на борбата с интерференцията в хетерогенни мрежи, съществуват техники във времева и честотна област. В това число – разширяване на обхвата на покритие на фемто-клетките, едновременно използване на няколко носещи ресурса, използване на почти празни под-рамки и споделени клетки. Използването на споменатите техники води до повишаване на скоростите при обмен на данни в права и обратна посока и съответно до подобряване на капацитета на телекомуникационната мрежа. Също така се минимизира необходимостта от перфектно разполагане на възлите.

Едно от основните предизвикателства пред LTE/LTE-A мрежите е постигането на високи скорости на предаване в права и обратна посока. Ефективното използване на наличните мрежови ресурси играе ключова роля за удовлетворяване на гореспоменатите изисквания. RRM схемите трябва да бъдат дефинирани по начин, водещ до намаляване на интерференцията и в същото време – до повишаване на спектралната ефективност. При хетерогенните мрежи това се превръща в още по-трудна за изпълнение задача поради наличието на множество различни възли и особено високото ниво на вътре- и между-клетъчна интерференция. Следователно, основно изискване към RRM схемите трябва да бъде и високо ниво на интелигентност и адаптивност спрямо конкретните условия, в които се прилагат.

По отношение на управлението на мрежови ресурси в хетерогенни мрежи съществуват методи за преизползване на честотите, различни типове разпределяне на мрежови ресурси – хибридно, на базата на приоритети, стохастични подходи при разпределянето, чрез използване на теория на графите, на базата на когнитивното радио и др. В този контекст е необходимо дефинирането на основни изисквания при изграждането на техники за управление на интерференцията. Те трябва да се отличават с лесно имплементиране, ниско ниво на

изчислителна сложност и постигане на висока спектрална ефективност. Също така минимизирането на интерференцията трябва да бъде придружено и от справедливо разпределяне на мрежовите ресурси, като това да доведе до високо качество на обслужване на потребителите.

Загубите при разпространението на сигналите, дължащи се на гъсто разположени сгради, затрудняват прогнозирането на покритието на клетъчните мрежи в градските райони. Негативните ефекти заради наличието на препятствия от различен вид в средата на разпространение на сигналите, стават все по-ясно изразени в хетерогенни мрежи, където често разполагането на маломощните възли не може да бъде контролирано от мобилния оператор.

В литературата съществуват различни методи за абстрактно моделиране на затворени среди на разпространение на радио-сигнали. Като основни способи за реализирането на такива модели се открояват стохастичната геометрия и ray tracing. При използването на стохастични методи, се допуска, че местоположението на телекомуникационната инфраструктура се определя чрез пространствен точков процес, обикновено хомогенен Пуасонов точков процес (Poisson Point Process - PPP). По този начин се постига липса на корелационна зависимост между различни параметри, дефиниращи препятствията. Основен недостатък на повечето изследвания свързани с приложението на стохастичната геометрия е, че загубите от преминаване на сигналите през различните по вид препятствия не са взети предвид. На практика, чрез използване на инструментите на стохастичната геометрия ефектите от разполагането на препятствия върху параметрите на мрежата могат да бъдат определени чрез дефинирането само на няколко параметъра на препятствията. Като цяло, стохастичните модели дават възможност за достатъчно изчерпателно анализиране на хетерогенни мрежи. Другия използван модел – ray tracing изисква точна информация за параметрите на съответната област – местоположение и големина на препятствията и базовите станции. Често наблюдаван недостатък е, че резултатите, постигнати чрез този метод, са получени за конкретна среда и не е разгледана по-голяма група от подобни сгради или помещения със сходни характеристики.

Основните изводи, които може да бъдат открити, касаят разработването и оптимизацията на различни методи, модели и алгоритми в мрежите от ново поколение, а именно:

- Мрежите от ново поколение ще предоставят на потребителите нови услуги и възможности, което ще представлява предизвикателство пред инженерите поради множеството проблеми, които трябва да бъдат разрешени;
- Бъдещето на архитектурата на мрежите от ново поколение е проектирането, реализирането и експлоатацията на хетерогенни мрежи. Поради различната мощност на излъчване на възлите, от които тя е изградена, е изключително важно да бъде постигнато устойчиво минимизиране на негативните ефекти от интерференцията, била тя вътреклетъчна или междуклетъчна. Осигуряването на високо качество на услугите, предоставяни на потребители, локализирани в периферията на обслужващата ги клетка, трябва да бъде основен приоритет;
- Управлението на мрежови ресурси е надежден способ за балансиране на трафикното натоварване и постигане на достатъчно високо QoS към всички потребители;
- Постигане на висока спектрална ефективност и справедливо разпределяне на мрежовите ресурси ще доведат до оптимизиране на капацитета на мрежата и до по-висока производителност на потребителите, без значение от конкретното им местоположение;
- Моделирането на затворени среди може да допринесе за по-задълбочено запознаване с характеристиките и особеностите при разпространението на радио-сигналите в такива среди. Това, от своя страна, ще помогне за постигане на оптимално разполагане на съответните обслужващи устройства и възможност за оптимизиране на работата на мрежата;
- Теоретичните модели на затворени среди трябва да бъдат достатъчно опростени и гъвкави като позволяват определяне на всички важни характеристики на препятствията.

ГЛАВА 2. Абстрактно моделиране на затворени среди в мрежи от ново поколение

В последните години, поради съществуващата масова урбанизация, все повече потребители изискват използване на мобилни услуги, когато се намират в затворени помещения - частни домове, офиси, магазини и др. В този контекст е изключително важно за операторите да използват стратегии за оптимизация на предоставянето на ресурсите, така че потребителите да бъдат доволни от качеството на услугата, която искат да използват във всеки един момент. С цел максимално покритие на пространствата, все повече се налага едновременно използване на макро- и микро-клетки (в затворени пространства обикновено се инсталират фемто-клетки). Това, от своя страна, разкрива един съществен проблем, който инженерите са длъжни да разрешат в контекста на 5G мрежите – затихване при преминаване на сигналите през стени и други видове препятствия както и увеличената интерференция, която влияе силно негативно на качеството на сигналите.

Абстрактно моделиране на затворени среди

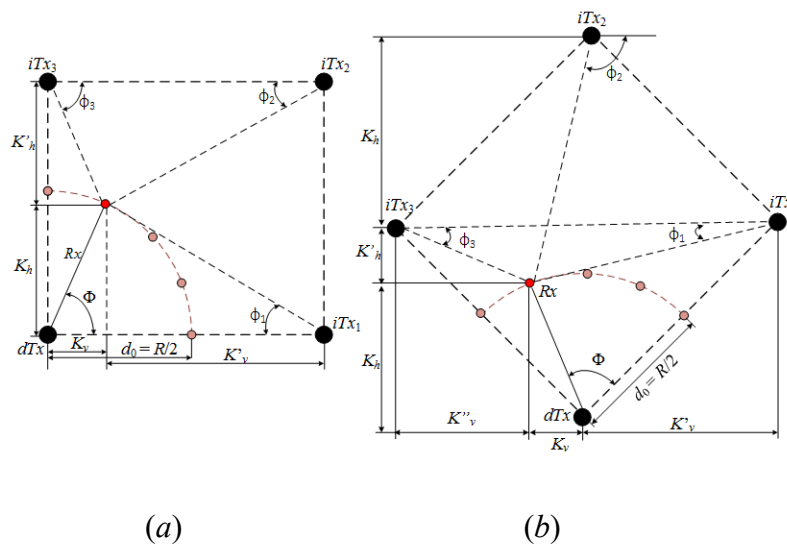
Въпреки факта, че е изключително важно разработването на математически модел на затворена среда за разпространение на сигналите, съществуват малко изследвания, в които да се излагат идеи за такива абстрактни модели. Често липсва фокус върху специфични среди на разпространение на сигналите, каквито например са затворените пространства в населените места – къщи, офис сгради, търговски центрове и др. Системните модели, с цел улесняване на изчисленията, биват силно опростявани и не дават възможност да се работи с голям брой препятствия.

Налице е необходимост от създаване на модел, който да гарантира изследване на сценарии на разпространение на сигнали в затворени пространства при реалистична подредба на потребители, фемто-клетки и препятствия. Моделът трябва да предоставя възможност за изследване на качеството на услугата, предоставяна на потребители в затворени пространства, при лесно дефиниране на характеристиките на мобилната среда.

Представеният, в настоящия дисертационен труд, математически модел е базиран на стохастичната геометрия при разполагане на множество препятствия в случайно генерирани симулационни сценарии. Моделът изследва влиянието на ъгловото разположение на стените и разположението на предавателните устройства върху производителността на мрежата. Чрез използвания подход се постига пълно избягване на стъпката на емпирично калибриране, която често е свързана с продължителни и затормозяващи работата на математическите модели Монте-Карло симулации. С цел изграждане на модел, който да бъде лесен за манипулиране, не се вземат предвид отраженията и дифракцията при разпространение на радио-сигналите.

Модел на позициониране на предавателни и приемни устройства

Системният модел, който се използва при конструирането на сценарии, съдържа 4 предавателни устройства (Tx), които са позиционирани в четирите ъгъла на квадрат с дължина на страната R . Това разположение е показано на фиг. 2.1a и е дефинирано като разположение **[квадрат]**. Подобен начин на позициониране на устройства ще ни позволи впоследствие лесно да оценим влиянието на интерференцията. Вторият тип позициониране е дефинирано като разположение **[ромб]**, като основната разлика тук е, че позициите на предавателните устройства е ротирано на $\pi/4$ градуса. Приема се допускането, че потребителите са асоциирани към най-близката клетка (dTx), а останалите устройства са дефинирани като източници на интерференция (iTx_i). Също така, се взема предвид наличието на приемник (приемно устройство, UE) Rx , разположен в границите на покритието на клетката, който се движи с радиус $d_0=R/2$ (фиг.2.1a и фиг. 2.1b).



Фиг. 2.1. Графично визуализиране на разположението на предавателните и приемните устройства – (a) [квадрат] и (b) [ромб]

В настоящия системен модел се вземат предвид федингът, наличието на преградни стени/препятствия, федингът на Релей, както и загубите при разпространение. Затихването, при преминаване на сигналите през преградните препятствия, е дефинирано чрез сумиране на затихванията, обусловени от всяко едно отделно препятствие.

Модел на разполагане на препятствия

При дефинирането на сценарии със случайно разполагане на препятствия, се използва случаен обектен процес (Random Object Process - ROP). Разполагането на препятствията се реализира при спазване на следните изисквания:

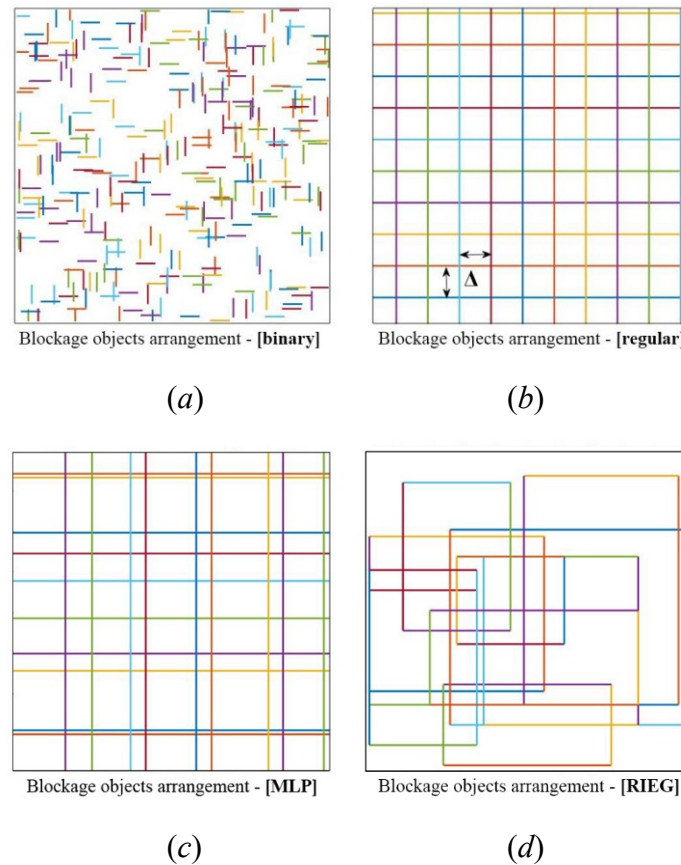
- средните точки (центровете) на всяко едно препятствие биват разпределени като се използва точков процес на Поасон - RPP с гъстота λ ;
- обектите са избрани на случаен принцип от група от прави линии със случайна дължина (при по-нататъшните изследвания дължината на препятствията бива строго дефинирана);
- параметрите на препятствията са такива, че ориентацията, формата и размерите им са взаимно независими.

За пространствената ориентация на препятствията са дефинирани следните варианти:

- [binary] – ъгълът на разположение на препятствията е с две възможни стойности – 0 или $\pi/2$;
- [regular] – стените са разположени във вид на мрежа и разстоянието между всеки две съседни стени е фиксирано. За дефинирането на различни сценарии, стените се отместват всеки път в една от четирите посоки със случайно число в диапазона $(0 \div 1)$;
- [MLP] – стените са разположени във вид на мрежа и разстоянието между всеки две съседни стени може да бъде различно - Δ ;

- [RIEG] – генерирано е случайно множество от правоъгълни елементи, които чрез застъпването си образуват помещения – използван е реалистичен генератор на затворени среди (Realistic Indoor Environment Generator – RIEG).

Пример за разпределения по тези четири типа разпределение на препятствия е даден на фиг. 2.2.



Фиг. 2.2. Графично визуализиране на разположението на препятствията

Реалистичен генератор на затворени среди (RIEG)

От гледна точка на изграждането на математически модел, по-лесни за представяне са детерминирани сценарии на разполагане на препятствия [binary], [regular] и [MLP]. Те притежават необходимото ниво на детерминираност, а стохастичната геометрия предоставя чудесен способ за аналитичното им моделиране. Тези модели могат да бъдат използвани за опростено представяне на външни и вътрешни среди на разпространение на радио-сигнали и са дефинирани чрез въвеждането на само няколко параметъра, характеризиращи препятствията. С напредването на технологиите, обаче, от симулационните изследвания се очаква необходимото ниво на реалистичност, което да гарантира достоверност на резултатите, които да доведат до изводи, заслужаващи доверие, за реални мобилни мрежи. В този смисъл, опростените модели са добри за насочване на изследванията в определена посока, но не са достатъчно добри за по-задълбочено и реалистично изследване на работата на мрежата или тестване на определени технологии, като алгоритми за разпределяне на мрежови ресурси, техники за борба с интерференцията, СА технологията и пр.

При разработването на новия реалистичен генератор на затворени среди (RIEG) са следвани следните стъпки:

- Позициониране на правоъгълници в предварително дефинирана област (Region of Interest – ROI);
- Координатите на началната точка на всеки правоъгълник са избрани случайно. Следва изчертаване на правоъгълника, като се следи той да остане в рамките на дефинираната област;
- Общата дължина на стените отчита стойността на средната гъстота на разполагане на стените (Wall Density) и големината на изследвания участък (ROI). Това прави възможно сравняването на различните методи за разполагане на препятствия.

Затворените пространства, образувани от застъпването на правоъгълниците, изграждат една по-реалистична среда, в сравнение с другите три изследвани метода.

Анализ на разработените теоретични модели

Качеството на доставяната на потребителите услуга се оценява чрез аналитични зависимости. Поради своята универсалност и възможността от него да се достигне до изрази за степента на покритие и скоростта на пренос на данни, се използва γ - отношението сигнал-интерференция (SIR).

При [MLP] отношението сигнал-интерференция (Signal to Interference Ratio – SIR) се изчислява чрез разделяне на линейните процеси на хоризонтални и вертикални (фиг. 2.2.с). При разпределение на предавателни устройства в [квадрат] (фиг. 1b), SIR се изчислява по следния начин:

$$\gamma = \frac{h_0 d_0^{-\alpha} \omega^{K_v + K_h}}{h_1 d_1^{-\alpha} \Omega_{sq_1} + h_2 d_2^{-\alpha} \Omega_{sq_2} + h_3 d_3^{-\alpha} \Omega_{sq_3}}, \quad (2.6)$$

където:

$$\begin{aligned} \Omega_{sq_1} &= \omega^{K'_v + K'_h}; \\ \Omega_{sq_2} &= \omega^{K'_v + K'_h}; \\ \Omega_{sq_3} &= \omega^{K_v + K'_h}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

K_v и K_h са броя на стените между всеки потребител и dTx , а K'_v и K'_h - броя на стените между потребителя и интерфериращите предаватели $iTx1$, $iTx2$, $iTx3$ (Фиг. 2.1.a).

При разполагане на предавателните устройства в [ромб] (фиг. 1b), SIR се определя чрез следната аналитична зависимост:

$$\gamma = \frac{h_0 d_0^{-\alpha} \omega^{K_v + K_h}}{h_1 d_1^{-\alpha} \Omega_{rh_1} + h_2 d_2^{-\alpha} \Omega_{rh_2} + h_3 d_3^{-\alpha} \Omega_{rh_3}}, \quad (2.8)$$

където

$$\begin{aligned}
\Omega_{rh_1} &= \omega^{K'_v + S(-\cos(\phi))K_v + K'_h}; \\
\Omega_{rh_2} &= \omega^{K_v + K'_h + K''_h}; \\
\Omega_{rh_3} &= \omega^{K''_v + S(-\cos(\phi))K_v + K'_h}.
\end{aligned} \tag{2.9}$$

K''_v и K''_h обозначават броя на стените между всеки потребител и интерфериращите устройства $iTx1, iTx2, iTx3$, както е показано на фиг. 2.1б.

Поради особеностите на разполагане на препятствия при [RIEG], не е възможно извеждането на подобни на горепосочените аналитични зависимости.

Приемаме, че разстоянието между потребителя и обслужващото го устройство е d_0 , тогава за SIR при [binary] се получава:

$$\gamma = \frac{P_0 h_0 l(d_0) \hat{\omega}_0}{\sum_{i=1}^3 P_i h_i l(d_i) \hat{\omega}_i}, \tag{2.10}$$

където h_i описва фадинга, d_i е разстоянието между приемното устройство P_x и i -тия предавател, $l(d_i)$ описва загубите при разпространение на сигналите, а P_i е мощността на предаване на i -тия предавател.

За да се улеснят анализите, при затворени среди на разпространение на сигналите, дефинираме понятието *средно затихване на препятствията* – ω :

$$\omega_i = e^{-E[K](1-\omega)} = e^{-\lambda E[L] d \beta_i d_i (1-\omega)}. \tag{2.11}$$

При разпределение [regular] се прави апроксимация, при която първо се полага:

$$\bar{\omega}_i = \text{geomean}(\hat{\omega}_i) = w^{E[K_i]}, \tag{2.12}$$

а след използване на факторите за корекция, се достига до следния аналитичен израз:

$$\text{geomean}(\gamma) \approx \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{d}{d\delta} \left(1 - \prod_{i=1}^3 \frac{1}{1 + \delta \frac{\bar{\omega}_i'}{\bar{\omega}_0} \frac{l(d_i)}{l(d_0)}} \right) \right]_{\delta=t} dt. \tag{2.13}$$

Сравнение на аналитични и симулационни резултати

За да се гарантира, че симулационният модел отразява в достатъчно висока степен реални работещи ситуации на телекомуникационните мрежи, за провеждане на експериментите са дефинирани следните десет сценария:

[2-S1] Случайно разполагане на препятствията [binary], разполагане на предавателите в [квадрат];

[2-S2] Случайно разполагане на препятствията [binary], разполагане на предавателите в [ромб];

[2-S3] Ортогонално разполагане на препятствията [regular], разполагане на предавателите в [квадрат];

[2-S4] Ортогонално разполагане на препятствията [regular], разполагане на предавателите в [ромб];

[2-S5] Ортогонално разполагане на препятствията [MLP], разполагане на предавателите в [квадрат];

[2-S6] Ортогонално разполагане на препятствията [MLP], разполагане на предавателите в [ромб];

[2-S7] Разполагане на препятствията, генерирани чрез RIEG, разполагане на предавателите в [квадрат];

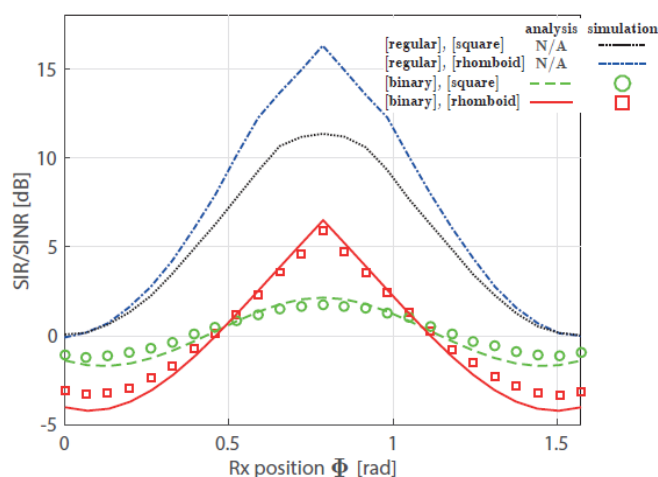
[2-S8] Разполагане на препятствията, генерирани чрез RIEG, разполагане на предавателите в [ромб];

[2-S9] Липса на преградни стени [Free space], разполагане на предавателите в [квадрат];

[2-S10] Липса на преградни стени [Free space], разполагане на предавателите в [ромб].

На фиг. 2.7. е представено, изчисленото по формули (2.10), (2.11) и (2.12), отношение на нивото на сигнала към нивото на интерференцията (SIR) при използване на сценарии [2-S1], [2-S2], [2-S3] и [2-S4].

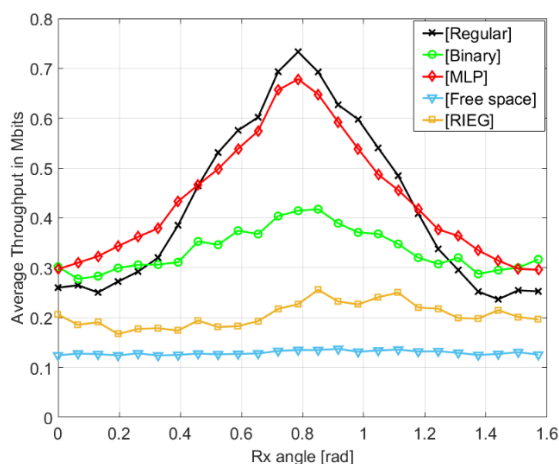
Впечатление прави симетричността на графиките, което е следствие от симетричността на позициониране на приемните (Rx) и предавателните устройства (Tx). Разстоянието между устройствата е еднакво, както и разстоянието между изследваните Rx и приемо-предавателното устройство, което ги обслужва dTx . От графичните резултати се вижда, че нивата на сигналите при ортогоналното разпределение са по-високи. При такова разпределение, в сравнение с [binary], се наблюдава по-ниска променливост, тъй като реално препятствията се отместват с много малка стъпка и не се стига до значително различна подредба при всяко следващо ново стартиране на симулацията.



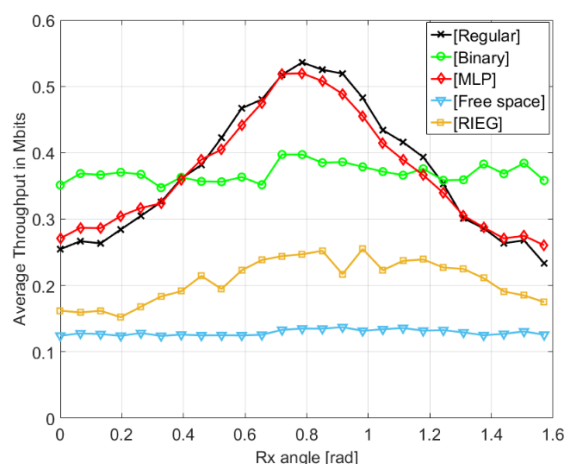
Фиг. 2.7. Отношение сигнал-интерференция (SIR) в зависимост от разположението на потребителските устройства (аналитични резултати)

Експерименталните резултати за средната производителност на потребителите (фиг. 2.19. и фиг. 2.20.), получени чрез симулации на системно ниво, показват същите тенденции като аналитичните резултати за отношението сигнал-шум SIR (фиг. 2.7.) [A3]. Поради еднаквата

тенденция са показани резултати само за 25 потребители. Оказва се, че съществува взаимовръзка между ъгъла на разполагане на предавателните устройства към препятствията и нивото на обслужване на потребителите. Това е и причината за различните резултати, които се получават при двете разпределения на предавателите. Когато не се използват стени, т.е. пространството на разпространение на сигналите е свободно, разположението на предавателите не влияе върху средната производителност на потребителите [A4], [A5].



Фиг. 2.19. Средна производителност при 25 потребителя при разположение на предавателите в [ромб]



Фиг. 2.20. Средна производителност при 25 потребителя при разположение на предавателите в [квадрат]

От направените изследвания се потвърждава теорията, че съществуването на стени между потребителите и предавателите намалява неблагоприятното въздействие на смущенията и води до по-добро покритие. Ако броят на стените, т.е. средната гъстота на стените, се увеличава неконтролируемо, това би довело до разпадане на услугата.

Най-близо до реалния сценарий е новият метод за подреждане на стени [RIEG], предложен в този дисертационен труд. Методът е достатъчно реалистичен, за да бъде използван като вътрешна среда за тестване на техниките за потискане на смущенията. Основен недостатък на представения аналитичен подход чрез използване на стохастична геометрия е високата сложност на задачата да се изгради математически модел за представяне на средите, реализирани чрез RIEG. Това е перспективно поле за развитие на идеите, заложи в настоящия дисертационен труд.

Приноси към втора глава

1. Разработени са и са имплементирани в LTE-симулатора четири абстрактни модела на разполагане на препятствия в затворени среди.
2. Разработен е нов абстрактен модел на базата на реалистичен генератор на затворени среди – RIEG, чрез който лесно се моделират затворени среди за разпространение на радиосигнали.
3. Осъществен е сравнителен анализ на разработените теоретични модели и е дефинирано влиянието им върху SIR и производителността на потребителите. Изследвано е влиянието на вариращ брой потребители при използването на различните абстрактни модели. Идентифицирани са основните особености при разпространението на сигнали в затворени среди.

ГЛАВА 3. Сравнителен анализ на алгоритмите за разпределяне на мрежови ресурси в затворени среди в мрежи от ново поколение

Осигуряването на отлично качество на обслужване (QoS) за потребители в затворени пространства е основна цел на мрежите от следващо поколение (New Generation Networks - NGN). Интелигентните техники за разпределяне на мрежови ресурси играят важна роля за подобряване на цялостната производителност на NGN. Основно предизвикателство е постигането на оптимален компромис между скоростта на предаване на данните и справедливостта при разпределяне на ресурсите на потребителите.

Алгоритми за разпределяне на мрежови ресурси

Алгоритмите за разпределяне на ресурси, описани тук, са широко използвани и изследвани в контекста на предаване на информация в мобилни мрежи. Те се различават предимно по входните параметри, които се задават и целите, за които биват използвани. Също така, алгоритмите се делят на две основни групи, в зависимост от това дали при функционирането им е необходима информация за канала или не.

RR алгоритмът разпределя ресурси към всички потребители, без да взема предвид състоянието на канала или конкретното качество при предаване на данни, което се достига при изпълнението му. Първоначално, изискващите използване на мрежови ресурси UE, са подредени на случаен принцип. Всеки нов UE, който се асоциира към съответната клетка, застава на последно място в опашката. Всички налични мрежови ресурси са предоставени на първия UE1 в опашката. Частта, от ресурсите, които остават неизползвани от UE1, може да бъде използвана от следващия в опашката - UE2. Тази елементарна по своята същност операция се изпълнява докато за всички мрежови ресурси биват разпределени между всички UE.

RF алгоритмът разпределя наличните мрежови ресурси по равно между всички UE. Основната цел при прилагането му е постигане на максимална скорост на предаване към всички UE и в същото време поддържане на високо ниво на справедливост на разпределяне на наличните ресурсни блокове.

mTP алгоритмът цели постигане на максимални нива на производителност на потребителите. Първоначално се изисква информация за състоянието на канала между UE и обслужващите ги устройства. Това се прави с цел да се установи каква трябва да бъде скоростта на предаване към UE. По този начин, UE биват класифицирани като такива с добри и такива с лоши канали за предаване на данни. В този контекст, се предоставят мрежови ресурси на UE с цел постигане на най-високата възможна производителност на базата и на нивата на SIR.

Основната цел на PF алгоритма е постигането на справедливо разпределяне на мрежовите ресурси. Алгоритмът използва осреднената стойност на всички производителности на всички потребители (Average Throughput Window Size) във всяка под-носеца в последните T_{PF} на брой TTI. Колкото по-голяма е стойността на този параметър, толкова по-несправедливо е разпределянето на мрежови ресурси – постига се максимизиране на производителността на определени потребители, подобно на mTP алгоритма. Когато стойността T_{PF} намалява, справедливостта при разпределянето на ресурсите расте. За всеки потребител е изчислен определен приоритет, който променя стойността си за всеки нов TTI. Потребителите с по-висок приоритет получават повече ресурси от другите потребители.

Основната идея стояща зад bCQI алгоритъма е назначаването на ресурси към UE, които имат много добра радио-връзка с обслужващото ги устройство. С цел изчисляване на Channel Quality Indicator (CQI), UE и eNB си предават необходимата информация – в права посока на предаване eNB предава към UE референтни сигнали (CRS). Те помагат на UE да изчисли CQI, който впоследствие е изпратен обратно на eNB. На базата на стойностите на CQI на всички потребители, се определя каква част от наличните мрежови ресурси да бъдат използвани от всеки един от тях.

Сравнителен фактор

Различните алгоритми за разпределяне на ресурси могат да бъдат сравнени по-добре, когато се използва една по-цялостна и обобщаваща оценка. Тя би предоставила както обща информация за полезността на конкуриращите се алгоритми, така и специфична информация за нивото на производителността, което би могло да се достигне при използване им. По този начин ще бъде възможно да се избере най-добрият RAA при предаване в права посока в затворена среда на разпространение на сигналите.

В настоящия дисертационен труд е разработен и предложен обобщен критерий, наречен *сравнителен фактор* (Comparative Factor - CF), който взема под внимание едновременно четири различни параметъра - нормираната средна производителност на потребителите (F_1), нормираната средна производителност на потребителите в периферията на обслужващата клетка (F_2), справедливостта при разпределяне на ресурсите (F_3) и съотношение на необслужените към всички потребители (F_4):

$$F = F_1 + F_2 + F_3 - F_4 . \quad (3.3)$$

За да бъде стойност на CF смислена и логична, всичките четири параметъра са нормирани, така, че да приемат стойности от 0 до 1. В резултат, стойността на CF е число в интервала от -1 до 3.

Нормирана средна производителност на потребителите (F_1): скоростта на предаване на данни зависи от качеството на канала, дефинирано чрез отношението сигнал-интерференция. Следователно, висока стойност на SIR, води до висока производителност на потребителите. Въздействието на топологиите на мрежата върху производителността на потребителите може да бъде оценено, когато се има предвид средната производителност на потребителите T_{avg} :

$$T_{avg} = \frac{\sum_{k=1}^N T_k}{N} , \quad (3.4)$$

където T_k е производителността на k -тия потребител и N е броят на потребителите. За да се трансформира (3.4) в бездименсионна величина, средната производителност на потребителите се нормира спрямо експериментално получена производителност на референтния потребител T_R . Експериментите за получаване на T_R са извършени в условията на една фемто-клетка, без стени и при същия брой потребители. Това е сценарий, при който на теория не съществува интерференция. Така получената стойност на средната производителност на потребителите е максимална. В резултат на това, нормираната средна производителност на потребителите (F_1) ще бъде:

$$F_1 = \frac{T_{avg}}{T_R} . \quad (3.5)$$

Най-високата стойност на F_1 е 1, когато средната производителност на потребителя е равна на производителността на референтния потребител. Най-лошият случай възниква, когато препятствията са толкова многобройни, че производителността на потребителите става 0, т.е. $F_1 = 0$.

Нормирана средна производителност на периферните потребители (F_2): в периферията на клетката сигналът е най-слаб и междуклетъчните смущения допълнително намаляват общата производителност на мрежата, а от тук и производителността на периферните потребители. Следователно, за да се постигне отлично покритие и да се избегнат разпадания по време на предаване на информация, е задължително да се поддържа задоволителна производителност в периферията на клетката. Средната производителност на периферните потребители T_{avg_edge} се дефинира като 5-ия перцентил от емпиричната кумулативна функция за разпределението (CDF) на потребителя. По аналогия с F_1 , производителността на периферните потребители се нормира спрямо референтната си стойност - T_{R_edge} . Следователно, нормираната средна производителност F_2 на потребителите в периферията на клетката е както следва:

$$F_2 = \frac{T_{avg_edge}}{T_{R_edge}}. \quad (3.6)$$

Тъй като референтните производителности се използват за определяне на максималната стойност на производителността, както при F_1 , F_2 също варира от 0 до 1.

Справедливост на разпределяне на ресурсите (F_3): Справедливостта при разпределяне на мрежовите ресурси е изключително важен параметър при сравняването на различните алгоритми. Последствията от несправедливото разпределяне на ресурсите между различните потребители могат да доведат до глад за мрежови ресурси или дори загуба на връзка с мрежата. Параметърът F_3 достига своята максимална стойност 1, когато ресурсите се разпределят равномерно, независимо от потребностите на отделните потребители. Като основна метрика е използван JFI:

$$F_3 = \frac{\left[\sum_{k=1}^N T_k \right]^2}{N \sum_{k=1}^N T_k^2}. \quad (3.7)$$

Отношение на броя необслужени N_{out} към броя на всички потребители N (F_4):

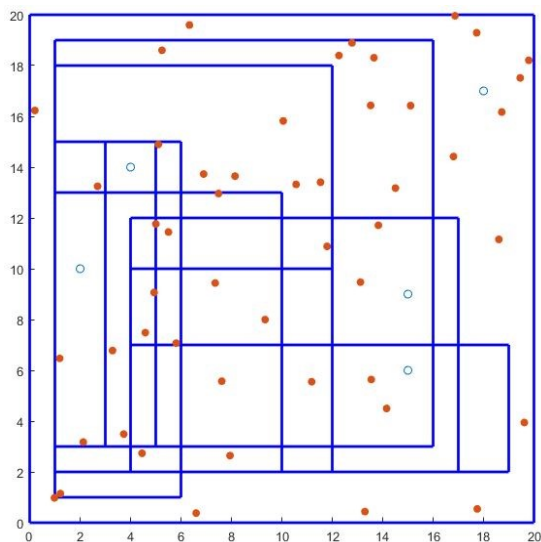
$$F_4 = \frac{N_{out}}{N}. \quad (3.8)$$

Очевидно, максималната стойност на F_4 е 1, когато всички потребителите са получили достъп до мрежата, и 0 – в обратния случай.

Сравнението на селектираните и описани в тази глава RAA, е осъществено в абстрактно моделирани затворени пространства, симулирани чрез RIEG (фиг. 3.3.).

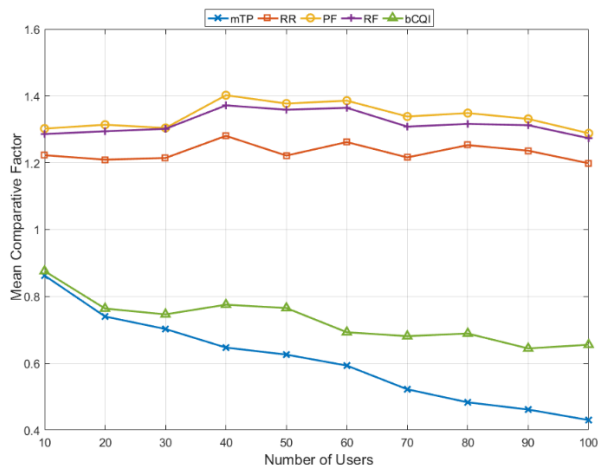
Плътните точки на фигурата представляват потребителите/UE, а кръгчетата – HeNB, формиращи съответно 5 фемто-клетки. Както бе казано, RIEG предоставя възможността за генериране на среди с висока степен на реалистичност. Експериментите са проведени с помощта на фиксиран брой от 5 фемто-клетки и вариращ брой потребители – от 10 до 100.

Всяка от симулациите използва 5000 еднакви времеинтервала за предаване - TTI. Дългата продължителност на симулациите гарантира висока надеждност на получените резултати. Не са поставени специални изисквания нито върху модела на трафика, нито върху производителността на потребителя, и се приема, че не съществуват други източници на интерференция извън областта на симулация ROI, които да оказват някакво влияние върху потребителите. Максимизиране на стойността на CF за всеки потребител е основна цел. Всички параметри имат еднаква стойност във всяка симулация.

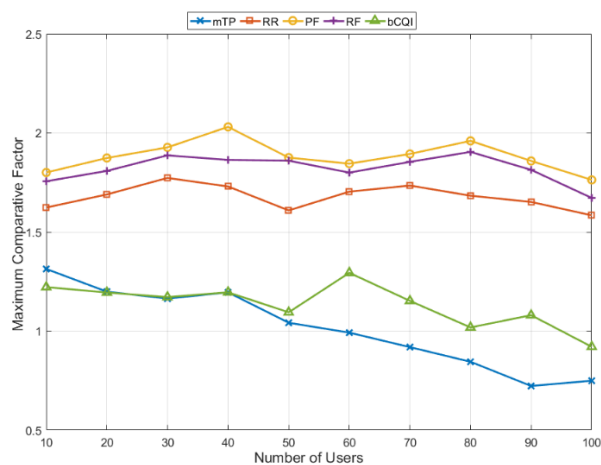


Фиг. 3.3. Разпределяне на потребители, фемто-клетки и стени, използвайки RIEG

Пиковите и средните стойности на CF за изследваните пет RAA, за различен брой потребители, са показани на фиг. 3.4. и 3.5. [A6]. Пиковата стойност на CF за всеки RAA се постига при най-доброто разположение на фемто-клетките за съответния брой потребители.



Фиг. 3.4. Средна стойност на CF във функция от броя на потребителите

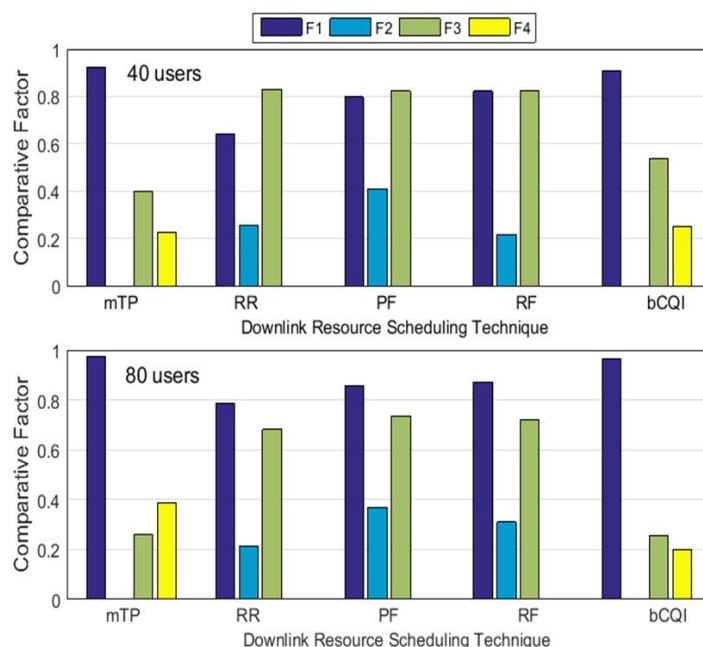


Фиг. 3.5. Максимална стойност на CF във функция от броя на потребителите

Алгоритмите RR, PF и RF достигат по-високи стойности на CF в резултат на добър баланс между производителността на потребителите и справедливост при разпределяне на мрежови ресурсите сред тях. Кривите на тези три RAA са монотонно гладки поради отличната справедливост на разпределяне на ресурсите – F_3 . Алгоритъмът PF показва най-добра производителност, независимо от броя на потребителите, постига баланс между компонентите на CF и по този начин най-доброто ниво на обслужване QoS. PF и RF са най-

справедливите алгоритми, тъй като основната им цел е да се увеличи производителността на потребителите.

На фиг. 3.6. са показани стойностите на четирите параметъра, съставляващи CF, при 40 и 80 потребителя за сравняваните алгоритми [A6]. Основна причина експериментите да се проведат именно за този брой потребители е, че за тях се постигат двете най-високи стойности на CF (фиг. 3.5.).



Фиг. 3.6. Стойности на пиковия CF при различен брой потребители

Най-добрите три RAA (RR, PF и RF), съгласно достигнатата стойност на CF, успяват да се справят с намаленото количество мрежови ресурси чрез прилагане на интелигентно разпределение. Те се стремят да сведат до минимум прекъсванията (F_4) и същевременно да балансират останалите три параметъра, характеризиращи работата на мрежата. Алгоритмите RR, PF и RF отделят значително внимание на производителността на крайните потребители (F_2), който е важен параметър, дефиниращ нивото на обслужване на потребителите в затворени среди. Потребителите, разположени в периферията на клетката, са най-силно засегнати от смущенията при преминаване на сигналите през препятствия, поради тяхната отдалеченост от обслужващия ги предавател. От друга страна, mTP и bCQI алгоритмите успяват да увеличат нормираната средна производителност на потребителите F_1 , но за сметка на това напълно пренебрегват средната потребителска производителност F_2 на периферните потребители. Увеличаването на параметъра F_1 е за сметка на увеличения брой прекъсвания - F_4 [A7].

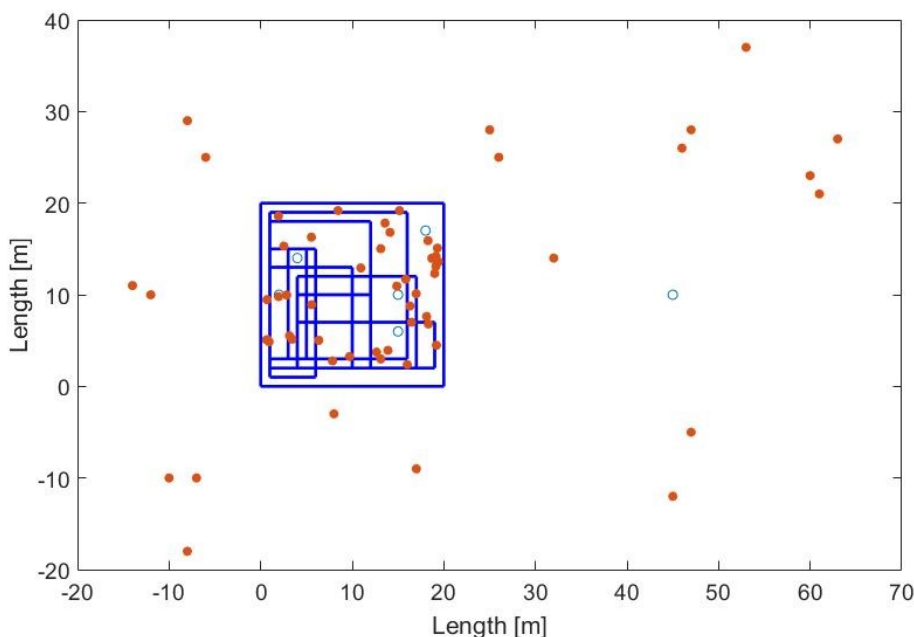
При определянето на максималните стойности на CF, броят на извършените симулации е от голямо значение. Местоположението на фемто-клетките оказва огромно влияние върху получените резултати и понякога увеличаването на броя на потребителите няма очакваното отрицателно въздействие върху общата производителност в мрежата. Това се дължи факта, че може да бъде постигнато едно оптимално местоположение на фемто-клетките, което да намали, или дори неутрализира отрицателното въздействие на увеличения брой потребители и последващото логично намаляване на ресурсите, с които разполага всеки един от тях.

Едновременно използване на спектралните ресурси

За да се задоволят на все по-нарастващите изисквания на потребителите в LTE-A мобилни мрежи, се използва концепцията за едновременно използване на наличните спектрални ресурси, по-широко познато като Carrier Aggregation или Spectrum Aggregation (SA). SA позволява използване на няколко компонентни носещи ресурси - CC, част от една и съща или от различни честотни ленти. Възможно е използването на до 5 CC. По този начин може реално да бъде използвана честотна лента от 100 MHz - при 5 CC с по 20 MHz честотна лента. Като цяло, използването на системи, поддържащи SA може да допринесе за повишаване скоростите на предаване към потребители, поради по-ефективното използване на честотния спектър.

Симулационни изследвания и изводи

За целите на сравнителен анализ на PF и RR при налична SA функционалност в хетерогенни мрежи, са извършени множество симулационни изследвания. На фиг. 3.15. е показана използваната при експериментите симулационната област с правоъгълна форма с размери 90 м на 60 м. В нея е добавена квадратна област с размери 20 м на 20 м, която представлява затворена среда за разпространение на сигнали (например, сграда с помещения). Пет фемто-клетки обслужват потребителите в сградата, а една макро-клетка, обслужва потребителите извън нея. Следователно, в зависимост от тяхното местоположение са дефинирани два типа потребители – външни (вън от сградата) и вътрешни (във вътрешността ѝ). Началните местоположения на потребителите са указани с точки, а кръгчетата представляват съответно 5^{-те} фемто-клетки (в сградата) и една eNB (извън сградата).



Фиг. 3.15. Симулационна област (ROI)

Дефинирани са следните сценарии:

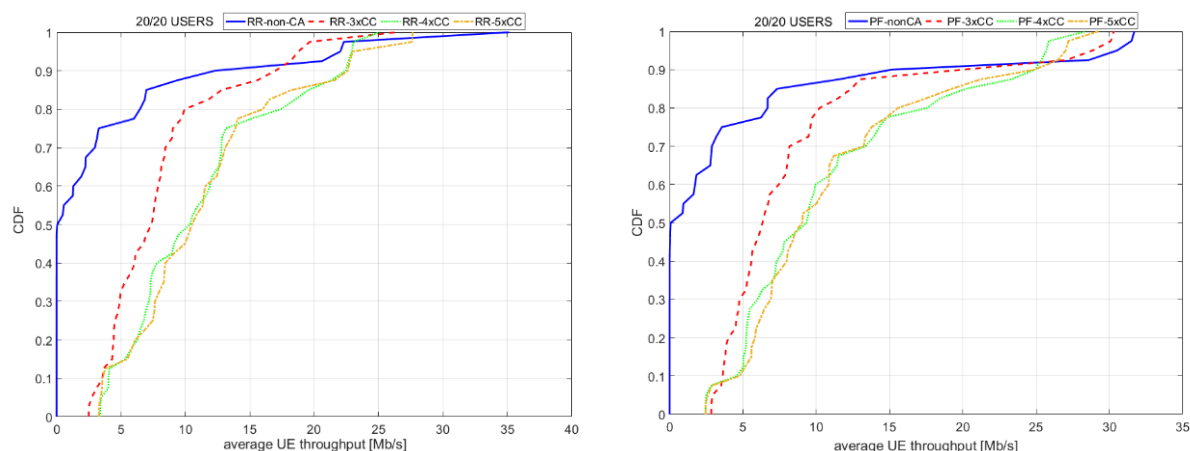
[3-S1] 20 външни/ 20 вътрешни потребители, използване на алгоритъм за разпределяне на ресурси Round Robin със/без CA;

[3-S2] 20 външни/ 40 вътрешни потребители, използване на алгоритъм за разпределяне на ресурси Round Robin със/без CA;

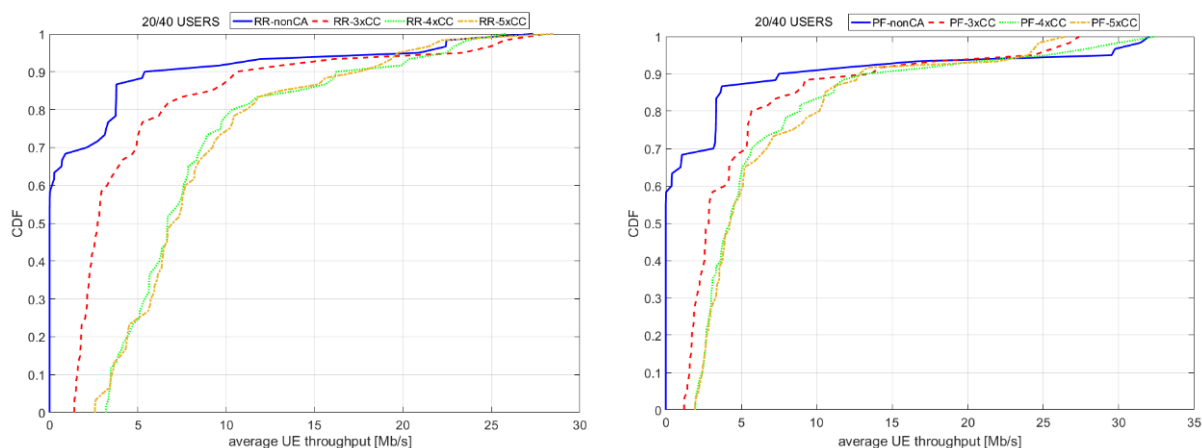
[3-S3] 20 външни/ 20 вътрешни потребители, използване на алгоритъм за разпределяне на ресурси Proportional Fair със/без СА;

[3-S4] 20 външни/ 40 вътрешни потребители, използване на алгоритъм за разпределяне на ресурси Proportional Fair със/без СА.

Двата алгоритъма за разпределяне на ресурси, изследвани в тази глава, RR и PF, показват сходни характеристики, без значение от броя на потребителите (фиг. 3.16, 3.18). Поради избрания режим на работа на фемто-клетките - CSG, не е позволено свързването на външни потребители към тях. Това води до не обслужване на тези потребители от страна на фемто-клетките. Респективно, този случай се наблюдава високо ниво на интерференция в права посока на предаване от страна на фемто-клетките към външните потребители, разположени близо до сградата. Режимът CSG, в същото време, позволява поддържане на отлично ниво на услугата, предоставяна на потребителите във вътрешността на сградата.



Фиг. 3.16. Разпределение на производителностите на потребителите
при сценарии [3-S1] и [3-S3]



Фиг. 3.18. Разпределение на производителностите на потребителите
при сценарии [3-S2] и [3-S4]

Използването на СА функционалност, очаквано води до минимизиране на интерференцията, повишаване на производителността на потребителите и благоприятства по-ефективното използване на честотния спектър. Увеличаването на броя на компонентните носещи ресурси не води задължително до повишаване на

производителността на потребителите. Забелязва се насищане и се оказва, че 4 е оптималният брой на СС в конкретния случай. В този аспект, усилията могат да се съсредоточат върху предлагането на алгоритъм, който да подпомогне динамичното определяне на необходимия брой компонентни носещи СС, който да удовлетворява изискванията на потребителите в конкретната хетерогенна мрежа.

Изводи и приноси към трета глава

1. Анализирани са и са сравнени пет алгоритъма за разпределяне на мрежови ресурси в затворени среди. Според получените резултати, те може да бъдат разделени на две основни групи – алгоритми, постигащи високо ниво на справедливост при разпределяне на ресурси (PF, RR и RF), и алгоритми, максимизиращи производителността на потребителите (mTP и bCQI).

2. Разработен е сравнителен критерий (метрика), подходящ за сравнение на работата на алгоритмите за разпределяне на ресурси, наречен сравнителен фактор (Comparative Factor). Чрез него се улеснява осъществяването на всякакъв тип сравнителен анализ в контекста на мобилните мрежи, поради универсалността, които предлага.

3. Извършен е симулационен анализ на работата на двата алгоритъма с най-добро ниво на справедливост - PF и RR, при използване на СА функционалност в хетерогенни мрежи. Двата алгоритъма показват сходни резултати, което води до идеята за подобряване на някой от тях. В глава 4, PF алгоритъмът ще бъде подложен на процедури по оптимизация.

ГЛАВА 4. Оптимизиране на Proportional Fair алгоритъма чрез прилагане на нови методи за осредняване в затворени среди в мрежи от ново поколение

Както беше споменато по-рано в дисертационния труд, основната цел на PF алгоритъма е да поддържа баланс между максимизирането на общата производителност на потребителите и справедливото разпределяне на ресурсите сред тях. PF изчислява уникалния приоритет k^* за всеки потребител и след това на всеки потребител с най-висок приоритет при всеки интервал от време за предаване (TTI) се предоставя определен ресурсен блок (RB).

Изчисляването на приоритета започва с определянето на средната производителност. Типичният метод за осредняване, използван в PF алгоритъма, е известен като Original Mean Method (ОММ). ОММ е единствения метод, използван при настоящите изследвания, при който се вземат предвид едновременно предишните стойности на средната производителност $T_k(M)$ и производителността на потребителя $R_k(M)$ в M -тия TTI при изчисляване на текущата средна производителност $T_k(M+1)$ на k -тия потребител:

$$T_k(M+1) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_{PF}}\right) T_k(M) + \frac{1}{T_{PF}} R_k(M), & k = k^* \\ \left(1 - \frac{1}{T_{PF}}\right) T_k(M), & k \neq k^* \end{cases}, \quad (4.1)$$

където T_{PF} е средният размер на прозоречния коефициент, а k^* е приоритетната функция. T_k съдържа информация за всяка средна производителност във всеки TTI за k -тия потребител и се актуализира за всеки TTI, използвайки текущите R_k стойности.

Приоритетната функция k^* използва данните за средната производителност, за да подобри справедливостта на системата. Той е аналитично изразен като:

$$k^* = \arg \max_{(k)} \frac{R_k(M)}{T_k(M)}. \quad (4.2)$$

Наличните ресурси се раздават на потребителите в зависимост стойността на приоритетната функция, докато всички ресурсни блокове не се изчерпят. Тъй като ОММ изисква информация за T_k и R_k едновременно, методът се характеризира с висока изчислителна сложност.

Методи за намиране на средна стойност, приложени в PF алгоритъма

В дисертационния труд са разгледани класически методи за намиране на средна стойност, като напр. – средна аритметична стойност, геометрична, хармонична, контрахармонична средна стойност. Също така са използвани няколко осредняващи методи използвани в други научни разработки и са първоначално са предложени два нови кватилни осредняващи методи.

Първият нов, предложен в настоящия дисертационен труд, метод е наречен кватилен осредняващ метод (Quartile Mean Method – QMM). Аналитично, той се представя така:

$$T_k(M+1) = \frac{\sum_{m=1}^{\lfloor M/4 \rfloor} R_{k_group-min}(m)}{\lfloor M/4 \rfloor}. \quad (4.10)$$

За изчисляването на средната производителност на потребителите за съответния ТТІ по QMM метода, се взима предвид средно-аритметичната стойност на най-малката група от стойности - group-min. По този начин се постига по-високо ниво на справедливост при предоставяне на мрежови ресурси на потребителите. Когато се използва и средно-аритметичната стойност на най-голямата група от стойности group-max, сборът от двете средно-аритметични стойности дефинира втория новопредложен метод – модифициран кватилен осредняващ метод (Modified Quartile Mean Method – MQMM):

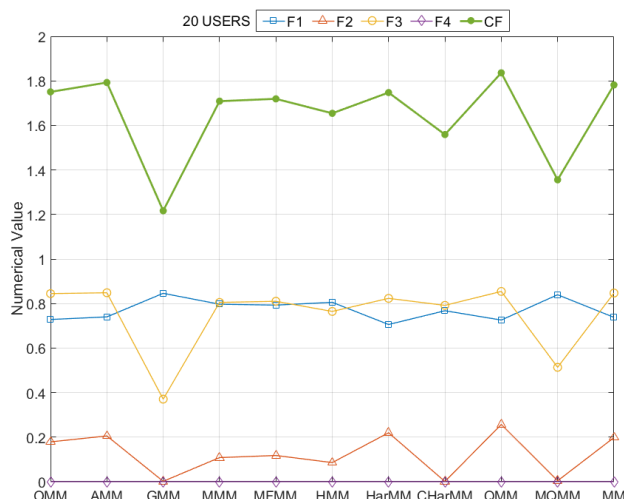
$$T_k(M+1) = \frac{\sum_{m=1}^{\lfloor M/4 \rfloor} R_{k_group-min}(m)}{\lfloor M/4 \rfloor} + \frac{\sum_{m=1}^{\lfloor M/4 \rfloor} R_{k_group-max}(m)}{\lfloor M/4 \rfloor}. \quad (4.11)$$

По този начин, повече мрежови ресурси се предоставят на потребители с висока производителност, в сравнение с QMM. Това води до подобряване на средната производителност на потребителите, докато справедливостта на разпределяне на ресурсите намалява. Предложените кватилни методи са приложими при $M \geq 8$, а при $M < 4$ те стават невъзможни за реализиране и вместо това се прилага класическият АММ. Когато $4 \leq M < 8$, MQMM се превръща в проста сума от минимална и максимална стойност, докато QMM отчита само минималната стойност на производителността за всеки потребител. Колкото е по-голяма стойността на M , толкова по-качествена е работата на кватилните методи.

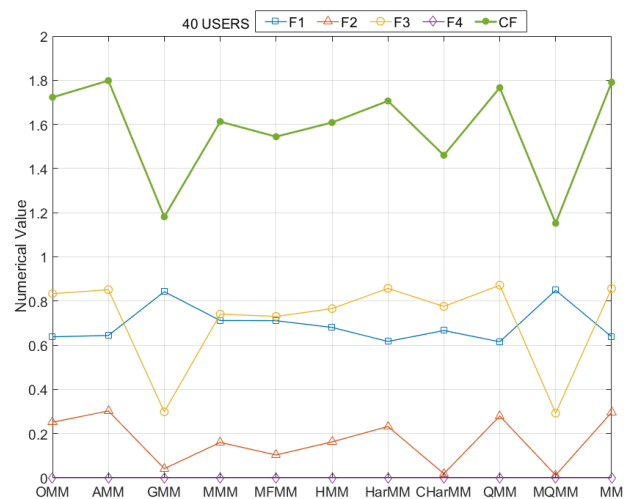
Експериментите са проведени с помощта на фиксиран брой от 5 фемто-клетки и вариращ брой потребители - 10, 20, 30, 40 и 50. Всяка от симулациите използва 5000 еднакви време-интервали за предаване - ТТІ. Планът на помещенията е получен чрез прилагане на

RIEG (фиг.3.3.), на която чрез кръгчетата се дефинират местоположенията на HeNB, формиращи фемто-клетките, а плътните точки представляват потребителите. Не са поставени специални изисквания нито върху модела на трафика, нито върху производителността на потребителите, и се приема, че не съществуват други източници на интерференция извън областта на симулация ROI, които да оказват някакво влияние върху потребителите. Максимизиране на стойността на CF за всеки потребител е основна цел. Всички параметри имат еднакви стойности във всички проведени симулация.

На фиг. 4.2. и 4.4. са представени стойностите на CF и отделните компоненти, които го съставляват при 20 и 40 потребители [A8].



Фиг. 4.2. Симулационни резултати за CF и съставляващите го компоненти за 20 потребителя при различни TAM



Фиг. 4.4. Симулационни резултати за CF и съставляващите го компоненти за 40 потребителя при различни TAM

RF алгоритъмът винаги предоставя достъп до мрежата на всички потребители, без значение от техния брой. Това води до нулеви стойности на F_4 и, съответно, до липса на необслужени потребители (фиг. 4.2. и 4.4.).

GMM и предложеният MQMM са най-несправедливите методи за разпределяне на ресурсите, но и двата достигат висока и стабилна стойност на средната производителност F_1 на потребителите, без значение от техния брой. Подобно на тези два метода, CHarMM също пренебрегва потребителите, намиращи се в периферията на клетките (F_2), но постига много по-голяма справедливост при разпределянето на ресурсите за потребители, намиращи се близо до обслужващите възли. Когато броят на потребителите нараства, CHarMM остава стабилен, запазвайки добро ниво на справедливост F_3 и добра стойност на CF (фиг. 4.4.). Тези три TAM, особено CHarMM, могат да се използват в затворени пространства, като например офис-сгради и търговски центрове, където вътрешните потребители трябва да получат много високо ниво на обслужване, за сметка на тези извън сградата.

Предложеният QMM показва по-добро ниво на справедливост, в сравнение с MMM и MFMM. QMM позволява да се предоставят повече ресурси на крайните потребители, особено при малък брой потребители (фиг. 4.2.). Очаквано, QMM разпределя наличните ресурси по-справедливо от MQMM, но последният подобрява общата производителност за не периферните потребители.

Методите за определяне на средна стойност ОММ, АММ и QMM разпределят повече ресурси на крайните потребители и постигат добри нива на справедливост F_3 . Експерименталните резултати показват, че предложеният QMM е основният конкурент на широко използвания ОММ и класическия АММ. Освен това, АММ не е много стабилен и надежден метод, тъй като се влияе от големите разлики в осредняваните стойности.

Логично, HarMM демонстрира противоположната тенденция при отчитане на стойностите на компонентите на CF, в сравнение с CHarMM, но общата стойност на CF е по-добра, без значение от броя на потребителите.

Трите метода, базирани на максимални и минимални стойности на производителностите - МММ, MFMM и HMM - показват подобно поведение и близки резултати както за CF, така и за неговите компоненти.

В сравнение с АММ, новопредложените квантилни методи QMM и MQMM показват по-добра производителност по отношение на средната производителност на потребителите. Независимо от броя на потребителите, QMM постига подобни стойности на F_3 и по-добри нива на F_2 , в сравнение с АММ и ОММ. Това е важно предимство, тъй като при затворени помещения мобилният оператор трябва да предлага добро качество на обслужване на потребителите, намиращи се в периферията на фемто-клетките.

Като допълнение към предишните изследвания, в тази глава е оценена и работата на методи, базирани на PF алгоритъма, като се използва отново същата среда, генерирана чрез RIEG (фиг. 3.3.). Дефинирани са 20 различни квантилни методи за определяне на средна стойност (Throughput Quantile Averaging Method - TQAM), работещи като част от PF алгоритъма [A9].

Квантилни методи за намиране на средна стойност, приложени в PF алгоритъма

Методи, базирани на групата с най-малките стойности

Групата с най-малките стойности съдържа $1/K$ от данните и е означена като *min-group*. Когато средната аритметична стойност на минималната група $R_{k_min-group}$ е взета предвид, TQAM използва следната формула:

$$T_k^{min}(M+1) = \frac{\sum_{m=1}^{\lfloor M/K \rfloor} R_k(m)}{\lfloor M/K \rfloor} = \frac{R_{k_min-group}}{\lfloor M/K \rfloor}, \quad (4.12)$$

където $R_k(m)$ са стойностите на производителността, сортирани във възходящ ред, за M предишни ТП за k -тия потребител. В зависимост от стойността на K се определят и изследват пет различни TQAM, наречени min-TQAM: 2-min, 3-min, 4-min, 5-min и 6-min.

Методи, базирани на групата с най-големите стойности

$1/K$ от стойностите за производителността формират група, която съдържа най-високите стойности на производителността, наречена *max-group*. Методите, базирани на max-group, са означени като max-TQAM и за дефинирането на средната производителност се използва следния аналитичен израз:

$$T_k^{max}(M+1) = \frac{\sum_{m=\left\lfloor \frac{(K-1)M}{K} \right\rfloor}^M R_k(m)}{\left\lfloor \frac{M}{K} \right\rfloor} = \frac{R_{k_{max-group}}}{\left\lfloor \frac{M}{K} \right\rfloor}. \quad (4.13)$$

Аналогично на min-TQAM, петте max-TQAM за различни стойности на K са именувани респективно – 2-max, 3-max, 4-max, 5-max и 6-max.

Методи, базирани на групите с най-малки и най-големи стойности

Третият тип квантилни методи са дефинирани като min+max-TQAM и при изчисляването на средната производителност участват минималната и максималната група от стойности:

$$T_k^{min+max}(M+1) = \frac{R_{k_{min-group}}}{\left\lfloor \frac{M}{K} \right\rfloor} + \frac{R_{k_{max-group}}}{\left\lfloor \frac{M}{K} \right\rfloor}. \quad (4.14)$$

Съответно, 2-min+max, 3-min+max, 4-min+max, 5-min+max и 6-min+max, са петте метода, дефинирани чрез ф-ла (4.14) при варираща стойност на K от 2 до 6. Методът 2-min+max взема предвид всички предишни стойности на производителността на съответния потребител в предишни ТТІ, но получената стойност се различава от тази при прилагане на широко използвания аритметичен метод.

Методи, базирани на групата със средните стойности

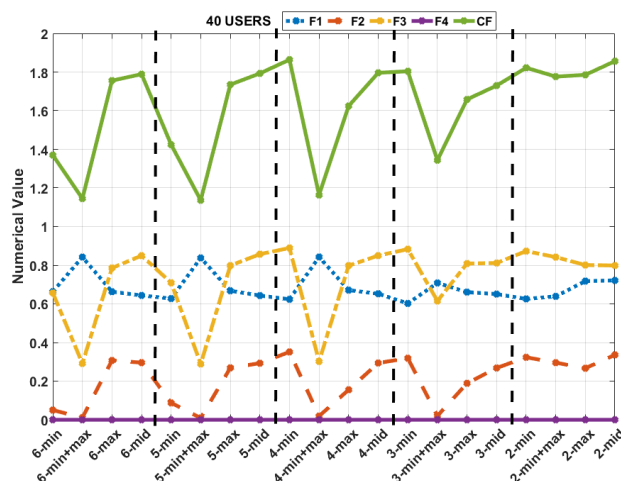
Последната група методи се нарича mid-TQAM. При тях се използва средната група от стойности – mid-group, след като минималната и максималната са вече премахнати. Изразът за средно-аритметична стойност на дефинираната група е:

$$T_k^{mid}(M+1) = \frac{\sum_{m=\left\lfloor \frac{(K-2)M}{K} \right\rfloor}^{\left\lfloor \frac{(K-2)M}{K} \right\rfloor} R_k(m)}{\left\lfloor \frac{(K-2)M}{K} \right\rfloor} = \frac{R_{k_{mid-group}}}{\left\lfloor \frac{(K-2)M}{K} \right\rfloor}. \quad (4.15)$$

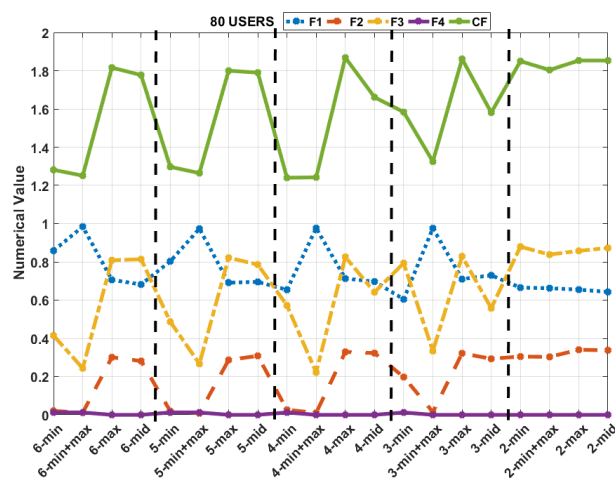
Mid-TQAM са отново пет на брой и са дефинирани като 2-mid, 3-mid, 4-mid, 5-mid и 6-mid. Методът 2-mid е една единствена стойност, която на практика представлява медианната стойност, разделяща групата от стойности на две подгрупи, съдържащи еднакъв брой стойности.

Представените четири типа TQAM не могат да бъдат използвани, ако броя на ТТІ не е по-голям от броя на групите, на които искаме да бъдат разделени стойностите. В такъв случай ($M < K$), за симулациите е използван АММ. Колкото по-голяма е стойността на M, толкова по-добра е работата на методите, предложени и изследвани в настоящата дисертация.

Експерименталните резултати за CF и неговите компоненти - F_1, F_2, F_3 и F_4 - за всичките двадесет TQAM, дефинирани в предишната точка, са показани на фиг. 4.7 и фиг. 4.8. за 40 и 80 UEs. Проведени са експериментални изследвания и за 10, 20, 60 и 100 потребители, но тъй като резултатите са сходни и следват демонстрираната тенденция, не са представени.



Фиг. 4.7. Симулационни резултати за CF и съставляващите го компоненти за 40 потребителя за различни TQAM



Фиг. 4.8. Симулационни резултати за CF и съставляващите го компоненти за 80 потребителя за различни TQAM

min-TQAM постигат по-добри резултати, когато броя на квантилите е по-малък и потребителите са малко на брой - стойностите на CF достигат до максимума, благодарение на високите равнища на справедливост. Нормираната средна потребителска производителност се влияе слабо от броя групи и от броя на потребителите и остава относително постоянна, но с минимални стойности, когато се използват min-TQAM.

Max-TQAM показват сходни резултати с min-TQAM за малък брой потребители по отношение на всичките три компонента F_1 , F_2 и F_3 на CF и постигат още по-добри резултати за по-голям брой групи K , независимо от броя на UE.

Min+Max-TQAM предоставя много високо ниво на услугата на потребители, намиращи се близо до обслужващото устройство (фемто-клетка), като им предоставя повече ресурси, но за сметка на потребителите, локализирани в периферията на клетката, което влошава справедливостта на разпределяне на системните ресурси. Ефективността на методите min + max се подобрява с увеличаването на броя на потребителите.

Mid-TQAM се характеризират със справедливо разпределение на мрежовите ресурси и предоставят добро ниво на услугата на потребители, локализирани в периферията на обслужващата ги клетка. Те показват стабилност като поддържат подобни стойности на изследваните параметри без значение от трафичното натоварване т.е. от броя на потребителите.

Повишаване на стойността на F_1 се наблюдава, когато броят на потребителите нараства, като това е по-ясно изразено при разделяне на стойностите на производителностите на по-голям брой групи. Когато броят на потребителите е по-малък, разстоянието между тях и фемто-клетките е по-голямо и, съответно, влиянието на препятствията е по-голямо. Когато нарастването на F_1 е основната цел при разпределяне на системните ресурси, е препоръчително използването на методите min + max. Стойностите на F_2 и F_3 варират повече, когато броят на потребителите и броят на групите се увеличат. Оптимална справедливост на разпределяне на ресурсите се постига, когато се използват max- и min-методи.

Квантилен метод за намиране на средна стойност, базиран на SINR

В настоящата глава е предложен нов метод, базиран на моментния SINR на потребителите – (SINR Based Quantile Mean Method in Proportional Fair – SBQMM-PF). Той

цели постигане на по-справедливо разпределяне на мрежови ресурси в сравнение с широко използваният PF алгоритъм чрез модифицирането му. В зависимост от стойността на SINR на всеки потребител във всеки TTI, се избира между използването на два от новите, предложени в четвърта глава., квантилни метода – 3-min+max и 2-min. Чрез използването им се цели увеличаване на производителността на потребители, които имат нисък SINR, т.е. са обект на високи нива на интерференция от страна на намиращите се в близост други клетки или поради отдалечеността им от обслужващата ги клетка. Граничната стойност на SINR - Ω_{SINR} , се избира да бъде медианната стойност от групата от стойности, представляващи SINR на всички потребители в конкретния TTI. За потребителите със SINR по-малък от Ω_{SINR} , се прилага 3-min+max, тъй като той цели максимизиране на производителността на потребителите, отчитайки в голяма степен и справедливостта на разпределяне на мрежови ресурси. За потребителите със SINR, равен или по-голям от Ω_{SINR} се прилага 2-min - метод, който е един от най-справедливите по отношение на разпределяне на ресурсите. При използването на PF алгоритъма е избрано $T_{PF}=1$, което гарантира постигане на максимални стойности на справедливото разпределяне на ресурси, възможни за алгоритъма. Сравнението, което ще бъде направено посредством симулационни изследвания, цели оптимизиране на справедливостта и качествено обслужване на потребителите, локализирани в периферията на обслужващата ги клетка.

Дефинирани са следните четири сценария:

[4-S1] 20 външни/ 20 вътрешни потребители, използване на алгоритъм за разпределяне на ресурси Proportional Fair и SBQMM-PF без CA;

[4-S2] 20 външни/ 40 вътрешни потребители, използване на алгоритъм за разпределяне на ресурси Proportional Fair и SBQMM-PF без CA;

[4-S3] 20 външни/ 20 вътрешни потребители, използване на алгоритъм за разпределяне на ресурси Proportional Fair и SBQMM-PF със CA;

[4-S4] 20 външни/ 40 вътрешни потребители, използване на алгоритъм за разпределяне на ресурси Proportional Fair и SBQMM-PF със CA.

Симулационните изследвания са реализирани в ROI, дефиниран и представен на фиг. 3.15. Работи се с 5 фемто-клетки, обслужващи вътрешни потребители, и 1 макро-клетка – за външни потребители. За разлика от изследванията проведени в глава 3, избраният режим на работа на фемто-клетките е OSG. Свързването на макро потребители към фемто-клетките е позволено, което води до повишаване на производителността на макро потребителите. Съответно, индуцираната интерференция е много по-малко в сравнение с изследванията в глава 3 - използването на CA редуцира влиянието на интерференцията, което води до увеличаване на капацитета на мрежата и производителността на потребителите, без значение от тяхното местоположение.

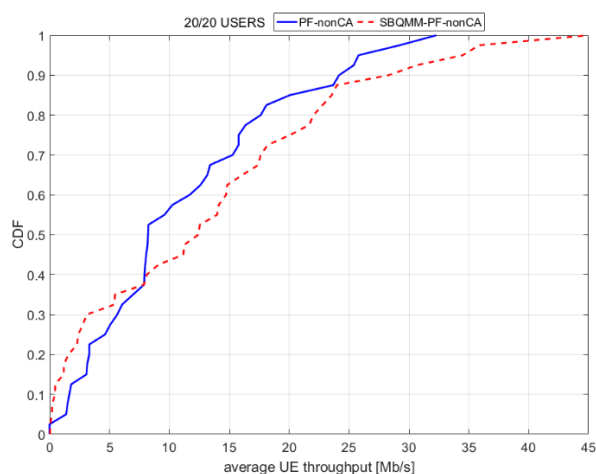
Компонентният носещ ресурс CC1 обслужва само потребители, свързани към макро-клетката, докато CC2, CC3 и CC4 и CC5 обслужват потребителите, намиращи се в затвореното помещение, свързани към фемто-клетката. За разлика от изследванията в глава 3, е избран режим на фемто-клетката Open Subscriber Group (OSG).

В таблица 4.4. са дадени числените стойности на справедливостта на разпределяне на ресурсите и на средната производителност на потребители в различните сценарии, в зависимост от използвания алгоритъм.

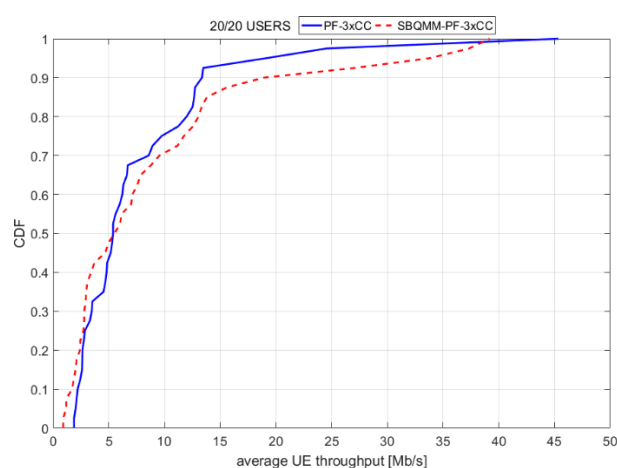
Табл. 4.4. Сравнение на PF и SBQMM-PF алгоритмите по отношение на справедливостта на разпределяне на ресурси и средната производителност

Използван алгоритъм	PF						SBQMM-PF					
Брой потребители	20/20			20/40			20/20			20/40		
СА	без СА	с 3 СС	с 5 СС	без СА	с 3 СС	с 5 СС	без СА	с 3 СС	с 5 СС	без СА	с 3 СС	с 5 СС
Справедливост при разпределяне на ресурси	0,65	0,50	0,43	0,62	0,46	0,6	0,58	0,47	0,53	0,57	0,53	0,6
Средна производителност на потребителите	10,97	7,91	10,54	9,63	4,13	5,19	13,36	9,08	11,55	12,34	4,21	6,28

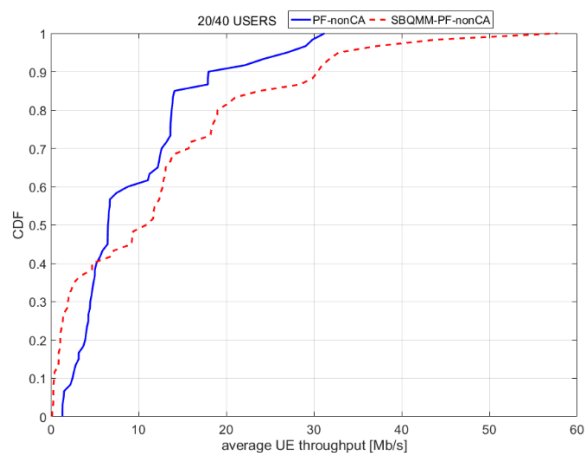
На фиг. 4.9. – 4.14. са показани разпределенията на производителностите на потребителите в различните сценарии – [4-S1] ÷ [4-S4].



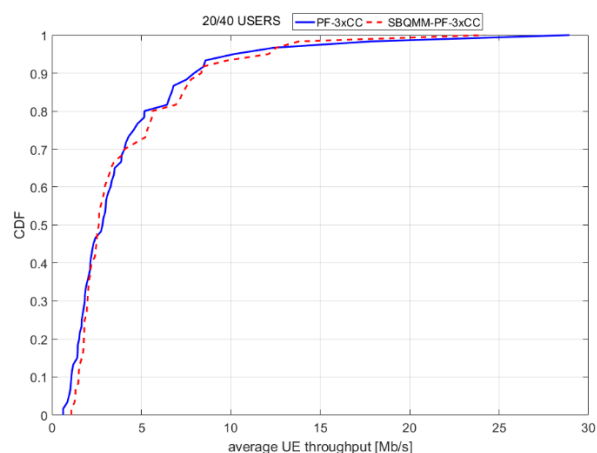
Фиг. 4.9. Разпределение на производителностите на потребителите при сценарий [4-S1] – без използване на СА



Фиг. 4.10. Разпределение на производителностите на потребителите при сценарий [4-S3] – с използване на 3СС



Фиг. 4.12. Разпределение на производителностите на потребителите при сценарий [4-S2] – без използване на СА



Фиг. 4.13. Разпределение на производителностите на потребителите при сценарий [4-S4] – с използване на 3СС

Разработеният SBQMM-PF алгоритъм, постига по-добри резултати от PF алгоритъма, независимо от броя на потребителите и наличието на СА функционалност. Нивата на справедливост при разпределяне на мрежовите ресурси, постигнати от двата алгоритъма, са близки по стойност, но новопредложеният SBQMM-PF алгоритъм се отличава с по-високи нива на средната производителност (табл. 4.4.).

При повишен брой потребители в мрежата, т.е. при наличие на по-голямо трафично натоварване, се наблюдава по-слабо влияние на СА. С други думи, използването на технологията, не винаги дава по-добри резултати. В случая, основната причина е в избрания режим на работа на фемто-клетките – OSG. За разлика от ситуацията при CSG, интерференцията в мрежата е много по-малка и, респективно, влиянието на СА е много по-незначително. Интелигентното използване на СА може да доведе до намаляване на разходите на мобилния оператор. Създаването на алгоритъм за динамично определяне на броя на СС, в зависимост от спецификите на мрежата – наличието на сгради, броят на потребителите, трафичното натоварване, SINR и видовете клетки, от които е изградена тя, е цел на бъдещи научни изследвания.

Използваният трафичен модел Full Buffer, води до максимално натоварване на мобилната мрежа. В този ред на мисли, SBQMM успява да оптимизира работата на мрежата, въпреки агресивното трафично натоварване, което се наблюдава при всичките изследвани сценарии. Необходими са допълнителни аналитични и симулационни изследвания за прецизиране на оптималната комбинация от квантилни методи, които да бъдат използвани в SBQMM-PF.

Изводи и приноси към четвърта глава

1. Разработени са два нови квантилни метода за намиране на средна стойност, приложени в PF алгоритъма. Новопредложените квантилни методи QMM и MQMM показват по-добри резултати от често използваните други методи. Първият показва по-голяма стабилност и може да се използва когато справедливостта на разпределяне на мрежови ресурси е приоритет. Вторият метод гарантира по-висока производителност за потребители, разположени близо до обслужващия ги LPN.

2. Разработени са 20 нови квантилни метода за намиране на средна стойност, приложени в PF алгоритъма. Те успяват в отлична степен да максимизират стойностите на различните параметри, характеризиращи работата на мрежата. Всеки един от разработените методи намира своето приложение отчитайки специфичните изисквания, които потребителите имат в конкретната мобилна мрежа.

3. Разработен е нов метод за намиране на средна стойност, базиран на SINR, който е приложен в PF алгоритъма. Методът води до по-справедливо разпределяне на ресурсите, в сравнение с класическия осредняващ метод, като в същото време предоставя по-висока производителност на потребителите.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Тематиката на дисертационния труд е актуална, а в резултат на извършените проучвания и експериментални изследвания, разработване на модели и алгоритми, е постигната основната цел на дисертацията чрез изпълнение на формулираните предварително задачи за изпълнение. Постигнати са следните значими резултати с научно-приложен характер:

- Разработени са четири абстрактни модела на затворени среди. Предложен е аналитичен апарат за дефинирането им, посредством възможностите на стохастичната геометрия. Изследвано е влиянието на разпределението на препятствия върху нивата на интерференция и производителността на потребителите в съответната безжична телекомуникационна мрежа.
- Разработен е нов реалистичен генератор на затворени среди (RIEG), чрез който може да бъдат осъществени симулации в различни по вид затворени пространства, като: домове, офиси, магазини и др. Посредством RIEG могат да бъдат тествани различни алгоритми и технологии за оптимизиране на работата на мрежата.
- Разработен е нова обобщаваща метрика, наречена сравнителен фактор (CF), чрез който са оценени и сравнени различни алгоритми и методи за разпределяне на мрежови ресурси в мрежи от ново поколение. CF притежава високо ниво на гъвкавост, като в същото време не е сложен математически.
- Анализирани са и са сравнени пет, от най-често използваните в практиката, алгоритми за разпределяне на мрежови ресурси в затворени среди. Сред тях PF алгоритъмът се откроява с високото си ниво на справедливост на разпределяне на ресурсите.
- Анализирана е работата на PF и RR алгоритмите при работа в мрежи от ново поколение с налична CA функционалност.
- Разработени са и са изследвани експериментално два нови квантилни метода за намиране на средна стойност, приложени в PF алгоритъма. Новопредложените квантилни методи QMM и MQMM показват по-добри резултати от използваните до сега други осредняващи методи.
- Разработени са 20 нови квантилни метода за намиране на средна стойност и са вградени в PF алгоритъма. Чрез използването им става възможно оптимизирането на различни параметри на мрежата, в зависимост от специфичните изисквания на потребители и предназначението на съответните мобилни мрежи.
- Разработен е метод за намиране на средна стойност, базиран на SINR, който е приложен в PF алгоритъма. Новият метод SBQMM-PF постига по-справедливо разпределяне на ресурсите, в сравнение с класическия осредняващ метод – ОММ, като, едновременно с това, предоставя повече ресурси на потребителите.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

[A1] Z. V. Jarvis, V. Stoyanov, K. Kassev, "Insights Into 5G Technology: Some Network Aspects", Computer & Communications engineering, 1/2015, pp. 61-65.

[A2] Z. V. Jarvis, V. Stoyanov, "Insights Into 5G Technology: Some Data Transmission Aspects", Computer & Communications engineering, 2/2015, pp. 58-63.

[A3] M. K. Müller, M. Taranetz, V. Stoyanov and M. Rupp, "Abstracting Indoor Signal Propagations: Stochastic vs. Regular" in 58th International Symposium ELMAR-2016, Zadar, Sept. 2016, pp. 249-252.

[A4] V. Stoyanov, "Investigation of Indoor Wireless Communication Environment Using Abstract Modelling", Journal "Electrotechnica&Electronica (E+E)", vol. 52 No 1-2/2017, pp. 26-31.

[A5] V. Stoyanov, Z. Valkova-Jarvis, "The Impact of Abstract-Modelled Wall Layouts on User Throughput in Wireless Indoor Environments", First International Balkan Conference on Communications and Networking (BalkanCom 2017), Tirana, Albania, May 30-June 2, pp. 1-2.

[A6] V. Stoyanov, Z. Valkova-Jarvis, "Aggregated Assessment of Downlink Resource Scheduling Techniques in Indoor Environments via a Comparative Factor", ELMAR 2017, Zadar, Croatia, 18-20 September, 2017, pp. 185-188.

[A7] V. Stoyanov, Z. Valkova-Jarvis, "A Comparative Factor Evaluation of Downlink Resource Allocation Algorithms in Indoor Communication Environments", ICEST 2017, Niš, Serbia, 28-30 June, 2017, pp. 13-16.

[A8] V. Stoyanov, Z. Valkova-Jarvis, "Performance Evaluation of Throughput Averaging Methods for the Proportional Fair Algorithm in Indoor Mobile Networks", 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS-2017), Nish, Serbia, 18-20 October, 2017, pp. 232-235.

[A9] Z. Valkova-Jarvis, V. Stoyanov, "Novel Throughput Quantile Averaging Methods for the Proportional Fair Algorithm in Indoor Mobile Networks", 2017 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), Riga, Latvia, 2-3 November, 2017, pp.198 - 202.

По тематиката на дисертационния труд е работено в рамките на 1 научно-изследователски договор към ТУ-София:

- Договор 162ПД0011-07, тема : „Методи и алгоритми за намаляване на интерференцията в телекомуникационни мрежи от ново поколение“

Investigation of Resource Allocation in Abstract Modelled Indoor Wireless Communication Environments in New Generation Networks

Viktor Rosenov Stoyanov, M. Sc.

Abstract of Ph.D. Thesis

Modern wireless communications are realized to a large extent in closed environments. A serious problem for broadband wireless exchange of data in such an environment is the poor quality of signal transmission due to walls and other barriers, generally called blockages. The simulation of such a complex environment can be accomplished using abstract modelling of enclosed spaces and the deployment of the blockages can be on a random or deterministic principle.

The aim of the PhD thesis is to study and improve the quality of the communication environment in indoor areas, through abstract modelling and development of intelligent resource allocation methods.

Different wall generation methods ranging from approaches from random shape theory to semi-deterministic and heuristic approaches are developed. A constant wall density is taken into account aiming to attain comparable results. The influence of the relative orientation between the walls and the transmitter and receivers is described and mathematically tractable expressions for the Signal-to-Interference Ratio (SIR) are obtained. The conducted research shows a good accordance between theoretical and simulation results.

A new blockage object arrangement called realistic indoor environment generator (RIEG) is introduced and compared with existing abstract-modelled blockage arrangements to demonstrate its improved representation of real-life scenarios. It is the closest to a real-world scenario wall arrangement method, which is realistic enough to be used as an indoor environment to test interference control and suppression techniques.

A novelty of this thesis is also the definition of a Comparative Factor (CF) that simultaneously takes into account the average throughput of the indoor users, the fairness and the outage ratio. Different downlink Resource Allocation Algorithms (RAA) can be better evaluated when a summative integrated assessment is applied. CF provides both general information about the usefulness of the competing algorithms and specific information about the level of particular performance parameters. Thus it was possible to select the best downlink RAA for use in an indoor environment.

Two Quartile Mean Methods (QMMs) and twenty distinct Throughput Quantile Averaging Methods (TQAMs) are newly proposed aiming to enhance the performance of the PF algorithm. The quantiles theory is applied to the data set of throughputs for each TTI, once they are sorted into ascending order. It is then divided into K equal groups, where $K = 2, 3, 4, 5$, or 6 . The results show that the newly proposed methods offer opportunities for additional improvement of the performance of the PF algorithm.

The performance of heterogeneous network with Carrier Aggregation (CA) capability is studied using RR and PF algorithms. They show similar performance in high interference scenarios. The newly proposed SINR-based Quantile Mean Method (SBQMM) outperforms the PF algorithm, when the femtocells work in Open Subscriber Group, and thus the macro users are allowed to connect to them. In such a scenario the increase of the Component Carriers (CC) does not necessarily lead to improved average UE throughput values.