



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

маг. инж. Соумя Ранджан Самал

**ЕФЕКТИВНО УПРАВЛЕНИЕ НА МОЩНОСТТА С КОНТРОЛ
НА СМУЩЕНИЯТА В D2D КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ С
ВИСОКА ПЛЪТНОСТ**

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

Научен ръководител: проф. д-р инж. Владимир Костадинов Пулков

София, 2018

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 04.12.2018 г. (протокол № 6)

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 26.03.2019 г. (вторник) от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.3-16/19.12.2018 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р Георги Любенов Илиев – председател
2. Проф. д-р Владимир Костадинов Пулков – научен секретар
3. Проф. д-р инж. Розалина Стефанова Димова
4. Проф. д-р Маргарита Кръстева Тодорова
5. Доц. д-р инж. Габриела Лъчезарова Атанасова

Рецензенти:

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

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в канцеларията на Факултет по Телекомуникации, блок 1, стая 1439-Б и на Интернет страницата на Технически Университет – София.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Комуникационни Мрежи“, Факултет по Телекомуникации. Изследванията по дисертационният труд са направени от автора, като резултатите от тях са публикувани.

Автор: маг. инж. Соумя Ранджан Самал

Заглавие: Ефективно управление на мощността с контрол на смущенията в D2D комуникационни мрежи с висока плътност

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Дисертационния труд третира проблем свързан с управление на смущенията и контрол на мощността, с цел оптимизация на покритието и повишаване на капацитета на хетерогенни мрежи, отчитайки и енергийната ефективност. Този проблем е много актуален като се има предвид, развитието на безклетъчните мрежи и увеличението на плътността на точките за достъп с цел осигуряване на свързаност на различни видове потребители, както хора така и машини. В такива хетерогенни мрежи намирането на енергийно ефективни решения за управление на мощността с контрол на смущенията са все още във фаза на изследване. В работата се предлагат няколко иновативни подхода към решаването на този проблем.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е: *Да се разработи рамка за контрол на мощността и управление на смущенията, като основния фокус е насочен към повишаване на енергийната ефективност на хетерогенни мрежи с висока плътност предлагащи и комуникации между устройства.* За постигане на поставената цел е необходимо решаването на следните изследователски задачи:

1. Стратегиите основаващи се на сътрудничество в мрежата (Network Cooperation: NC) и анулирането на смущения (Interference Cancellation: IC) могат да се използват за подобряване на отношението сигнал към интерференция плюс шум (Signal-to-Interference plus Noise Ratio: SINR) в хетерогенни мрежи (Heterogeneous Networks: HetNet). С помощта на стратегии, основаващи се на NC, значително подобрене на SINR се постига чрез комбиниране на сигнали от "n" на брой най-силни предаватели, които да обслужват един потребител. С помощта на IC базираните стратегии, (n-1) следващите най-силни смущаващи сигнали могат да бъдат анулирани, като се използва техника за последователно анулиране на смущенията (Successive Interference Cancellation: SIC). За двете стратегии, ефективността на покритие в HetNet с n-взаимодействащи предавателни възли трябва да се анализира статистически, за да се дадат насоки при избора на оптималната стойност на „n“, тъй като това е компромис между покритието и капацитета на мрежата.

2. Един от ключовите фактори, влияещи върху покритието в мобилните мрежи, е свързан с конфигурацията на антените и особено с настройката на наклона на антената. Силата на получения полезен сигнал в клетката може да се увеличи с подходящ наклон на антената, което води до значително подобрене на SINR, което също води до намаляване на смущенията по отношение на други клетки. Динамичната оптимизация на наклона на антената е още по-важна за следващото пето поколение (5G) на безжичните комуникации, особено в ултра-гъсти сценарии за осигуряване на достатъчно покритие и качество на обслужване (Quality of Service: QoS). В такава ултра-гъста и ориентирана към потребителите мрежа (хора и устройства), от съществено значение е мрежата да следва потребителя, което може да бъде постигнато чрез динамичното управление на наклона на антената. Но в такива случаи опростеният модел на разпространение не е достатъчно точен за ултра-гъсти градски мрежи. Следователно, трябва да се обмисли приложението на други модели на комуникационни канали, за да се намери най-подходящият.

3. За да се максимизира енергийната ефективност в клетъчните мрежи ограничени от смущения (Interference-Limited: IL), може да се приложи подход основаващ се на теорията на предаване на информацията за определяне на енергийната ефективност на мрежата като функция на мощността на предаване на базовите станции (Base Station: BS) при отчитане на всички смущаващи сигнали. Следователно може да се приложи градиентен подход за оптимизация, за да се определи оптималната мощност на предаване на BS, тъй като тя е компромис между енергийната ефективност (Energy Efficiency: EE) и спектралната ефективност (Spectrum Efficiency: SE).

4. В сценарии за комуникация между устройства (Device to Device: D2D), като например безжичните сензори мрежи (Wireless Sensor Networks: WSNs), сензорните възли работят с вградени батерии. Енергията, необходима за предаване на данни, винаги е по-висока от тази необходима за изчисления и обработката на данни. Това се дължи се на радиовръзката на дълги разстояния, което води до по-голямо потребление на енергия от вградените батерии. Затова е необходимо да се разработят енергийно ефективни алгоритми и протоколи за предаване на данни в такива мрежи, за да се удължи жизнения цикъл на мрежата. Протокола SEP (Stable Election Protocol), който се използва за хетерогенни структури и е използван за удължаване на живота на първия възел, трябва да бъде надежден. SEP се основава на претеглените вероятности за избор на всеки възел, за да се превърне в клъстерна глава (Cluster Head: CH) в зависимост от оставащата енергия във всеки възел. Протоколът LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) се основава на енергийно ефективно маршрутизиране през CH. Но в протокола LEACH клъстерните глави се избират на случаен принцип, без да се използва информация за останалата енергия в възлите. Това води до откази на CH, в следствие на което жизнения цикъл на сензорна мрежа намалява. Един подход за преодоляване на това е SEP за хетерогенна мрежа с D2D комуникации, да се имплементира съвместно с LEACH за подобряване на жизнения цикъл на мрежата. Това може да стане чрез разпределяне на енергийното натоварване между всички възли равномерно чрез избиране на клъстерни глави.

Методологията на изследванията в дисертацията включва използването на аналитични, статистически и симулационни подходи. За оценка на ефективността на покритие в HetNet с при избора на оптималната стойност на взаимодействащите предавателни възли е приложен статистически и аналитичен подход. Аналитична оценката на модели на комуникационни е направена и при предлагане на подход за оптимизация на динамичното управление на наклона на антената в хетерогенни мрежи с висока плътност. Градиентен подход за оптимизация е приложен за определяне на оптималната мощност на предаване на базовите станции на хетерогенни мрежи. Оценката на подобряване на жизнения цикъл на сензорни мрежи в следствие на предлагания подход за съвместната имплементация на протоколите SEP и LEACH е направена чрез симулационни експерименти.

Научна новост

Научната новост в настоящата дисертация е свързана с предлагането на нови методи за оценка на покритието и вероятността за покритие на базовите станции при различно разпределение на потребителското оборудване в хетерогенни мрежи. Предложени за иновативни подходи за определяне на оптимална стойност на броя на взаимодействащите си възли при сценарии за анулиране на смущенията, за максимизиране на енергийната

ефективност на клетъчни мрежи с ограничение на смущенията, както и подход за избор на адекватен модел на канала и подходящ алгоритъм за регулиране на наклона на антената за различни мрежови сценарии. Предложено е ново енергийно ефективно решение, за увеличаване на жизнения цикъл на хетерогенни безжични сензорни мрежи.

Практическа приложимост

Разработените методи и предложените подходи, са изследвани и анализирани посредством симулационни експерименти. Направени са сравнения и анализи на резултатите от симулационните експерименти с такива получени чрез аналитични изчисления. За тези цели са използвани съвременни софтуерни пакети и симулатори, чрез които се проверява функционалността на анализирания сценарии. Всичко това прави възможността за внедряване на резултатите от настоящия дисертационен труд непосредствени и лесно реализуеми практически.

Публикуване на резултатите от дисертационното изследване

Направените анализи, предложените подходи и получените резултати за периода 2015÷2018 са представени в общо **5** авторски публикации, **3** от които на *международни конференции*, а останалите **2** - в *международни научни списания*. Една от публикациите е самостоятелна, а останалите 4 са в съавторство. Международните конференции са: *Global Wireless Summit (GWS) 2018*; *IEEE International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS) 2017*; *IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR) 2018*. Международните научни списания са: *Journal of Mobile Multimedia 2018*, *International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN) 2017*.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е написан на английски език и е в обем от **117** страници формат А4 и съдържа увод, пет глави, заключение с изложени основни приноси, списък на фигурите, списък на таблиците, списък на използваните съкращения, списък с публикациите по дисертацията, списък на използваната литература. Изложението на дисертационния труд е направено в 5 глави, съдържащо **45** фигури и **3** таблици. Използвани са **225** литературни източници като всички са на латиница, **80%** от които са от последните десет години. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Управление на смущенията в безжични мрежи

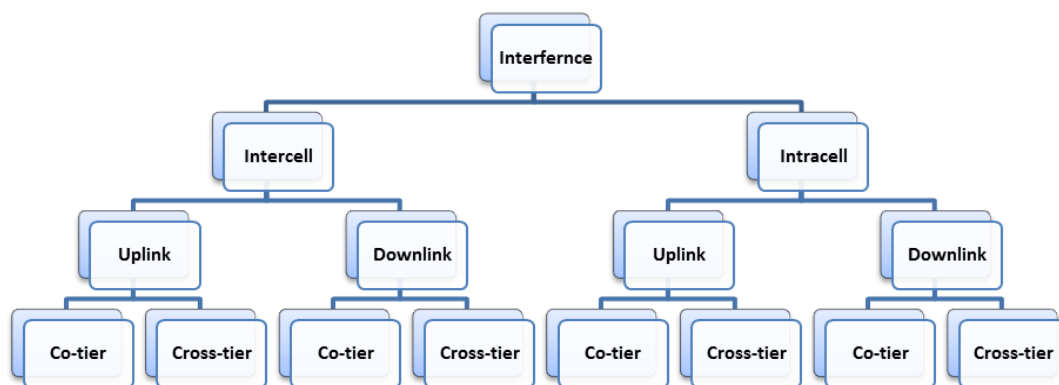
1.1. Въведение

За да се отговори на повишеното търсене за по-високи скорости за предаване на данни, заедно с нарастващия брой потребители, безжичната система трябва непрекъснато да повишава капацитета си. Това може да бъде постигнато чрез подобряване на спектралната

ефективност по отношение на увеличаване на честотната лента и добавяне на малки клетки към съпътстващите макроклетки.

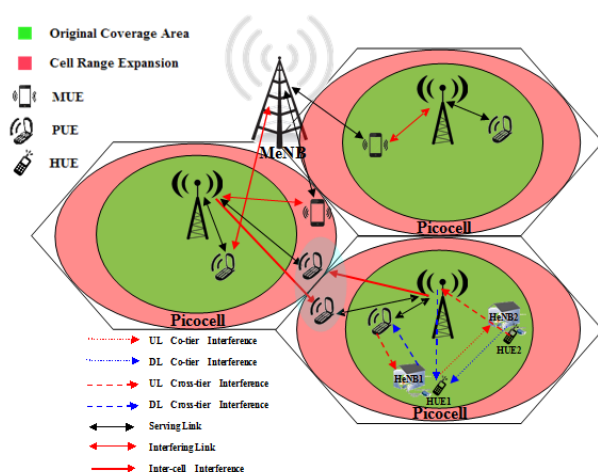
1.2. Смушения в безжичните клетъчни мрежи

Основната предпоставка зад съвременния дизайн на клетъчните мрежи е концепцията за преизползване на честотите [1]. На практика клетъчната мрежа се разделя на частично припокриващи се клетки, при което прехвърлянето на енергия от една базова станция към съседни клетки е причина за възникване на смушения [2, 3]. Този тип смушения се наричат междуклетъчна интерференция (intercell interference). Базовите станции или потребителите в съседни клетки могат да си сътрудничат помежду си, за да се намали тази интерференция [4]. В допълнение към междуклетъчната интерференция, потребителите също страдат от смушения, причинени от други потребители в една и съща клетка. Този тип интерференция се нарича вътрешноклетъчна интерференция. Въпреки, че в литературата се предлагат много начини за борба със смушенията темата за потискане и/или управление на смушенията е много актуална.

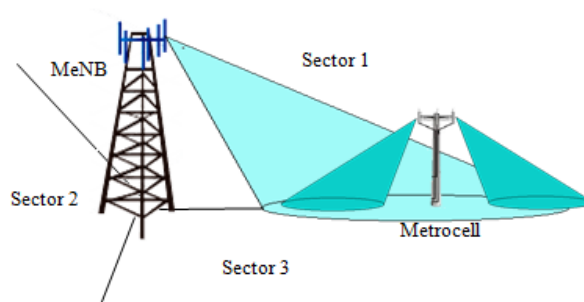


Фиг. 1.1 Класификация на смушенията в хетерогенни мрежи [A1]

1.3. Смушения в хетерогенни мрежи



Фиг. 1.2 Смушения в хетерогенни мрежи [A1]



Фиг. 1.3 Смушения между Макро и Метро клетки [A1]

Смушенията в хетерогенните клетъчни мрежи най-общо могат да бъдат класифицирани, както е показано на Фиг. 1.1, според това дали са междуклетъчни или вътрешно клетъчни, в посока нагоре или надолу, на едно ниво на мрежата, т.е. между съседни Фемто-клетки (Co-

layer; Co-tier) или между различни нива, т.е. между Макро-клетка и Фемто-клетка (Cross-layer; Cross-tier). Един сценарий отразяващ различните смущения в хетерогенни мрежи е показан на Фиг.1.2, където се приема, че структурата на клетките е хексагонална.

Обикновено, смущенията въздействат най-силно върху потребителските устройства които се намират на границите на клетката, но поради високата предавателна мощност на големите метроклетъчни базови станции, се покриват изцяло областите на покритие и на по-малките клетки както е показано на Фиг.1.3.

1.4. Управление на смущенията

Един от подходите за управление на смущенията е т.н. сътрудничество в мрежа. Той може да се разглежда като опит за трансформиране на работата на няколко независими базови станции в една единствена базова станция с множество антени, разпределени по зоната на покритие. Сътрудничеството в мрежа бива два вида: схеми за координация на смущенията, които обменят само информация за състоянието на канала или т.н. пълни схеми за сътрудничество, които предполагат допълнително обмен и на предадените данни [3]. Сред различните техники за мрежово сътрудничество съществуват следните схеми: изравняване на смущенията (Interference Alignment: IA); координирано разпределение на ресурси (Coordinated Scheduling: CS); координирано формиране на лъча (Coordinated Beamforming: CBF). Понастоящем определени функции, добавени към спецификациите на 3GPP LTE и LTE-Advance (LTE-A), могат да се използват за намаляване на проблема със смущенията в HetNets с малки клетки, такива като [44]: координация на междуклетъчните смущения (Inter-Cell Interference Coordination: ICIC); агрегиране на носещите честоти с разпределение между носещите (Carrier Aggregation with Cross-Carrier Scheduling: CA CCS); подобрена ICIC (enhanced ICIC: eICIC), която е адаптирана версия на ICIC за HetNet [39, 40]. Освен това, за да се намалят смущенията в HetNets, са разработени и eICIC техники за 3GPP LTE версия 10, които са разделени на три основни категории [45]: техники във времева област [46], техники във честотна област и техники за управление на мощността.

1.5. Техники за управление на смущенията в съвременни клетъчни мрежи

За бъдещите безжични клетъчни комуникационни системи, проектирането и оптимизирането на сложни мрежи изисква много по-задълбочени познания за системите за управление на смущенията. За хетерогенните клетъчни мрежи не съществува специален стандартен критерий за класификация на техниките за управление на смущенията. Повечето от тях са разработени в комбинация със схеми за разпределение на ресурсите и зависят от технологиите използвани при реализация на въздушния интерфейс, такива като: техника за управление на мощността; когнитивно базиран подход; подход, базиран на Q обучение; координиран подход; подход за разпределение на ресурсите; формиране на лъча.

1.6. Заключение

В бъдещите системи за клетъчна комуникация се отделя повече внимание на разгръщането на голям брой малки клетки, работещи на по-високи честоти, които се покриват от конвенционалната макро мрежа. За успешното внедряване на хетерогенни безжични клетъчни мрежи е желателно борбата със смущенията да се разглежда като ключово предизвикателство. Съществуват различни аспекти на смущенията, които възникват поради

хетерогенния характер на мрежата и случайното пространствено-времево разпределение на мобилните потребители. Затова е необходимо да се приложат различни техники за намаляване на смущенията, за да се осигури по-добро QoS, както и да се увеличат скоростите на предаване на данни, капацитета и ефективността на мрежата. Независимо от цялата работа, извършена в тази област, трябва да продължат изследванията свързани с управлението и разпределението на ресурсите, тъй като тези въпроси ще играят основна роля по отношение на използването на спектъра или енергийната ефективност. Поглеждайки към бъдещите 5G безжични комуникации, изследванията в тази област и текущите стандартизационни усилия от страна на ITU, IEEE, 3GPP и т.н., е очевидно, че 5G ще доведе до ултра-плътно разгръщане на малки клетки и IoT възли и нови комуникационни сценарии, особено в интелигентните градове [99]. Това ще наложи нови изследователски предизвикателства, свързани с контрола на мощността и смущенията.

1.7. Мотивация и цел на дисертационния труд

В контекст на намаляване на смущенията са идентифицирани три основни области на изследване, т.е. енергийна ефективност, анализ на покритието и оптимизация на мощността за бъдещите клетъчни мрежи. Анализирайки съществуващите подходи и въз основа на споменатите по-горе съображения, целта на дисертацията е формулирана както следва: *Да се разработи рамка за контрол на мощността и управление на смущенията, като основния фокус е насочен към повишаване на енергийната ефективност на хетерогенни мрежи с висока плътност предлагащи и комуникации между устройства.*

1.8. Приноси към първа глава

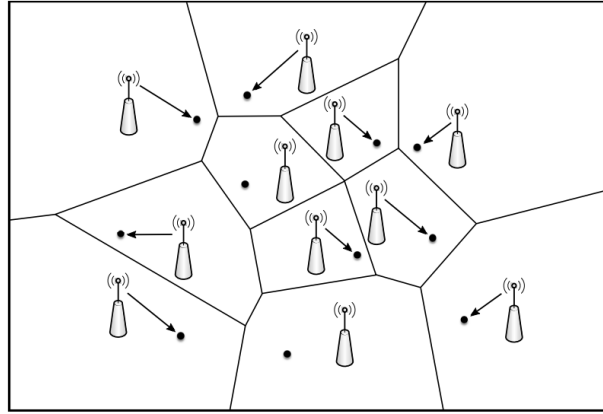
1. На базата на прегледа на съвременното ниво на различните техники за управление на смущенията заедно с подходите за управление на мощността и анализ на задачите за оптимизация на покритието и капацитета в многостепенна клетъчна мрежа е формулирана целта на дисертацията в аспекта на разработване на рамка за контрол на мощността и управление на смущенията, с основен акцент върху енергийната ефективност в плътни гъсто хетерогенни D2D комуникационни мрежи.

ГЛАВА 2. Анализ на покритието на D2D безжични хетерогенни мрежи с повишени показатели

2.1. Въведение

В тази глава се анализира вероятността за осигуряване на покритие на хетерогенна мрежа с повишени качествени показатели (enhanced HetNet: e-HetNet) и с взаимодействие между предавателните възли. Извършени са симулации за трислойни мрежи, като са сравнени стратегиите при взаимодействие на предавателните възли с работата на конвенционална мрежа по отношение на вероятността за осигуряване на покритие. Анализът, направен в тази глава, има за цел да установи степента на премахване на интерференцията, като се променя стойността на „n“.

2.2. Анализ на покритието и вероятност за прекъсване в безжични клетъчни мрежи



Фиг. 2.1 Схематично представяне на клетъчната мрежа с PPP, където зоната на покритие на различни BS образуват клетки на Ворони

Един сценарий на хетерогенна мрежа, с голям брой случайно разположени микро-клетъчни и фемто-клетъчни базови станции (BS) (Фиг. 2.1), може да се моделира чрез случаен Поасонов процес (Poisson Point Process: PPP). При канали със фединг, приетият сигнал зависи от канала, тъй като неговата мощност се променя по случаен начин. При тези условия SINR е случайна величина, като в следствие на това и начин максималният капацитет на системата е случайна величина. Следователно, тези приети сигнали трябва да бъдат дефинирани чрез вероятностни модели. Имайки предвид това, вероятността за прекъсване в HetNets се изследва чрез пространствен PPP в случай на логонормални канали с фединг. [120].

2.3. Анализ на покритието в права посока на безжична клетъчна мрежа

2.3.1. Системен модел

Вероятността за покритие в посока надолу може май-лесно да се опише като се разгледа модела в [122]. Нека да се разгледа една HetNet от K -ти ред състояща се от един ред от макро BSs и $(K - 1)$ реда на малки BSs, разположени независимо една от друга в 2-D Евклидово пространство. Местата на BS в k -ти ред се моделират в съответствие с хомогенен PPP Φ_k с плътност λ_k . В добавка, BS от всеки k -ти ред предават с една и съща мощност P_k с допустимо отклонение β_k . Експонентата на загубите от предаване по канала на k -тия ред е α_k , като всички експоненти $\{\alpha_j\} > 2, \forall j \in K$. По този начин всеки ред се описва еднозначно с редицата $(\lambda_k, P_k, \beta_k, \alpha_k)$. Потребителите също са разпределени независимо в съответствие с хомогенен PPP Φ_u с интензивност λ_u в същата Евклидова равнина $\mathbb{R}^2$. Мощността, приета от един потребител от обслужващата го BS, означена с b_o , се изразява чрез $l(r_k) = P_k h_{r_k} L \|r_k\|^{-\alpha_k}$. Резултантното SINR е:

$$SINR = \frac{P_k h_{r_k} L \|r_k\|^{-\alpha_k}}{\frac{\sigma^2}{L} + I_j} \quad (2.1)$$

Тук, $I_j = \sum_{j=1}^K \sum_{r_j \in \frac{\Phi_j}{r_k}} P_j h_{r_j} \|r_j\|^{-\alpha_j}$ е общата интерференция, която получава един потребител а σ^2 е мощността на адитивния шум. В хомогенна мрежа, (2.1) се опростява като добива вида:

$$SINR = \frac{h_r^{-\alpha}}{\frac{\sigma^2}{P_t L} + \sum_{r_j \in \frac{\Phi_j}{r_k}} \Phi_j R_i^{-\alpha} h_i} \quad (2.3)$$

2.3.2. Хомогенна мрежа

Една хомогенна мрежа се анализира сравнително по-лесно от една HetNet понеже тя има само една редица от BSs. По-долу се разглежда хомогенна мрежа в която BSs са разположени в съответствие с един независим хомогенен PPP Φ_b с интензитет λ_b в Евклидова равнина $\mathbb{R}^2$. Вероятността за покритие, означена с P_c , се дефинира като вероятността един типичен потребител да приеме SINR по-голямо от една предварително дефинирана прагова стойност T . С други думи, P_c е комплементарната кумулативна функция на разпределение (CCDF) на SINR докато вероятността за прекъсване, означена като P_o , е неговата кумулативна функция на разпределение (CDF). Следователно,

$$P_c = \mathbb{P}[\text{SINR} > T] \text{ and } P_o = \mathbb{P}[\text{SINR} < T] \quad (2.5)$$

Когато мрежата е ограничена от смущения (IL), вероятността за покритие става [122]:

$$\bar{P}_c(T, \alpha) = \frac{1}{1 + \rho(T, \alpha)} \quad (2.8)$$

2.3.3. Хетерогенна мрежа

HetNets обикновено комбинират няколко нива от различни видове BS, които предават с различна мощност и покриват клетки с много различни форми и размери. Вероятността за покритие на един типичен потребител намиращ се в референтна точка и свързан към BS от k -ти ред се дава като [123],

$$\mathbb{P}_{c,k} = \mathbb{E}_x[\mathbb{P}(\text{SINR}_k(x) > T)] = \int_0^\infty \mathbb{P}(\text{SINR}_k(x) > T) f_{x_k}(x) dx \quad (2.17)$$

Където, $f_{x_k}(x)$ е PDF на разстоянието между потребителя и обслужващата BS и зависи от схемата на асоцииране на потребителите. Като се използва израза за $\text{SINR}_k(x)$ от (2.1), се получава:

$$\mathbb{P}(\text{SINR}_k(x) > T) = \mathbb{P}\left[h_{x_k} > \frac{T x^{\alpha_k}}{P_k L} \left(I_j + \frac{\sigma^2}{L}\right)\right] \stackrel{(a)}{=} e^{-\left(\frac{T \sigma^2}{P_k L} x^{\alpha_k}\right)} \prod_{j=1}^K \mathcal{L}_{I_j}(T x^{\alpha_k} P_k^{-1}) \quad (2.18)$$

Където, (a) се поучава тъй като $h_{x_k} \sim \exp(1)$ [122] и $\mathcal{L}_{I_j}(s_c)$ е Лапласовото преобразуване на члена отразяващ интерференцията в s_c .

2.4. Анализ на покритието в D2D безжични хетерогенни мрежи с повишени показатели с n взаимодействащи си предавателни възли

2.4.1. Системен модел

Нека да се разгледа една HetNet от k -ти ред която е разположена на тор $\mathcal{S}$. Нека $\mathcal{T}$ да е множество от k независими хомогенни PPP, където $i^{\text{тия}}$ елемент е един PPP $\Xi^{(i)} = \{X_j^{(i)}\}_{j \in N}$ с интензитет λ_i , който дефинира пространственото разположение на предавателните възли на $i^{\text{тия}}$ ред, където $i = 1, 2, \dots, k$. P_T^i е предадената мощност за $i^{\text{тия}}$ ред. Мощността приета в мобилния потребител с пространствено разположение X_U като следствие от $X_j^{(i)}$ се дава чрез:

$$P_R(X_j^{(i)}) = A P_T^{(i)} S_{X_j^{(i)}} h_{jU}^{(i)} \|X_j^{(i)} - X_U\|^{-\beta}, \quad (2.21)$$

Където, A е константата на разпространение, β е експонентата на загубите по трасето, $S_{x_j^{(i)}} \in S_{x^{(i)}}$, което представлява множество от случайни величини с нормално разпределение с нулева средна стойност отразяващ засенчването, което се получава между предавателните възли на $i^{\text{тия}}$ ред и потребителското оборудване, и $h_{ju}^{(i)}$ е случайната променлива на фединга между възел намиращ се на $X_j^{(i)}$ и потребителското оборудване, $E[h_{ju}^{(i)}]=1$.

Вероятността за осигуряване на покритие за даден потребител при определен праг (Th) на SIR се дава чрез:

$$P_c(\text{Th}) = P_r[\text{SIR} > \text{Th}] \quad (2.25)$$

2.4.2. HetNet с взаимодействия си възли

Вероятността на покритие на мрежата може да бъде подобрена чрез увеличаване на ефективния SIR в крайния потребителски терминал, което може да бъде постигнато чрез анулиране на ефекта на най-силните смушаваци сигнали.

При стратегията за анулиране на n смушаваци сигнали (n -interference cancellation: n -IC), най-силните $(n-1)$ смушаваци сигнали се премахват, използвайки последователна техника за анулиране на смушания. Подобрената вероятност на покритие с дадената стратегия се изразява чрез:

$$P_{c_{n-IC}}(\text{Th}) = P_r[\text{SIR}_{n-IC} > \text{Th}] \quad (2.30)$$

При стратегията за n -мрежово сътрудничество (n -network cooperation: n -NC), двата последователни най-силни сигнала (n ; $n-1$) се комбинират и предоставят услугата на потребителя в сътрудничество. Подобрената вероятност за покритие с дадената стратегия е:

$$P_{c_{n-NC}}(\text{Th}) = P_r[\text{SIR}_{n-NC} > \text{Th}] \quad (2.34)$$

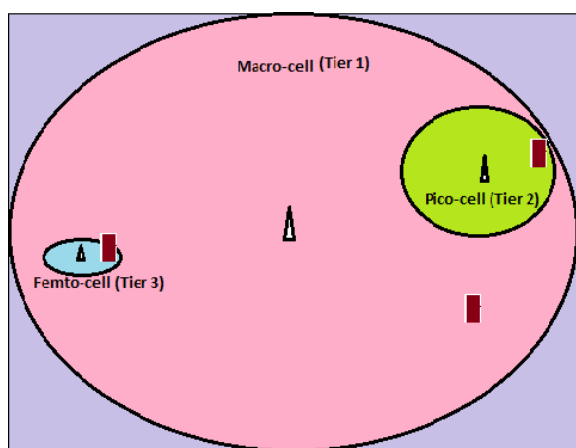
2.4.3. Симулационни резултати и анализ

Симулационния модел отразява една HetNet с три реда разположена на топ от $(10 \times 10) \text{ km}^2$; макро-клетка като ред 1, пикоклетка като ред 2 и фемтоклетка като ред 3. На Фиг. 2.2 е представена абстрактна схема на 3-слойна мрежа. Предавателната мощност за макро-клетката (ред 1), пикоклетката (ред 2) и фемтоклетката (ред 3) се приемат съответно за 50W, 2W, 0.2W [126]. Пространственото разположение на предавателните възли се счита за случайно и се моделира с 3 независими PPP с различни интензитети. Плътноста на възлите в отделните слоеве са в зависимост $\lambda_1 = 0.5\lambda_2 = 0.25\lambda_3$, където индексът на λ е индекса на реда. За общия случай, потребителският терминал се счита за разположен в началото.

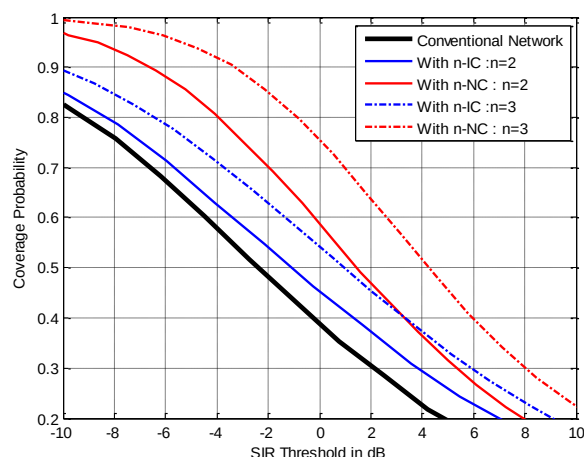
Анализира се статистическото поведение на трите вида мрежови характеристики по отношение на вероятността за покритие. Мрежата се симулира за 104 проби от данни чрез включване на независими идентично разпределени (independent identically distributed: i.i.d.) случайни изменения на фединга и замиранията във времето, моделирани с нулево средно логонормално разпределение със стандартно отклонение (σ) от 2dB. Малките изменения на фединга се моделират с Релеево разпределение с стойност на математическото очакване единица.

На Фиг. 2.3 и Фиг. 2.4 са показани резултати за вероятността за покритие във функция от SIR съответно за стойности на коефициента на загубите по трасето $\beta = 3$ и 5. Значително подобрене на вероятността за покритие се наблюдава и при двете стратегии в сравнение с това на една конвенционална мрежа.

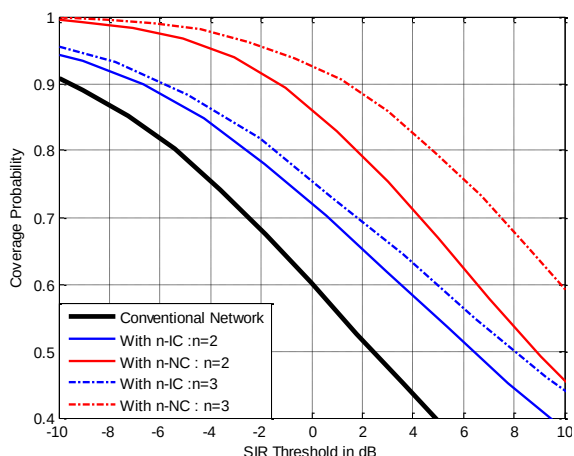
Фиг. 2.5 показва изменението на фактора на интерференция във функция от броя на взаимодействащите предавателни възли (n) за двете стратегии с $\beta = 3$ и 5. И в двата случая стратегията n-NC дава по-добри стойности от n-IC. За всички случаи стойността на ' ξ ' намалява с увеличаване на n . Въпреки това графиките стават почти плоски при $n > 6$, т.е. не може да се постигне значително подобрене на вероятността за покритие за сметка на увеличение на броя на n , т.е. увеличение на сложността на системата.



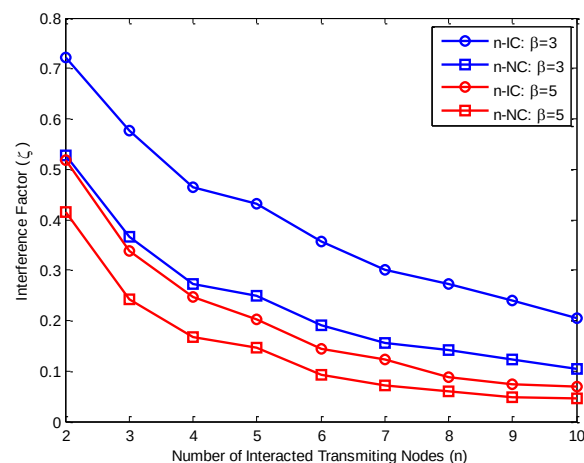
Фиг. 2.2 Абстрактна схема на трислойна мрежа [A2]



Фиг. 2.3 Вероятност за покритие във функция от SIR с $\beta = 3$ [A2]



Фиг. 2.4 Вероятност за покритие във функция от SIR с $\beta = 5$ [A2]



Фиг. 2.5 Фактор на интерференцията във функция от броя на взаимодействащи си възли ($\beta = 3$ & 5) [A2]

2.5. Заключение

В тази глава, вероятността за осигуряване на покритие в HetNet с n -взаимодействащи предавателни възли се анализира статистически, като се вземат предвид двата класа стратегии за подобряване на SINR. Извършени са симулации за трислойни мрежи и са сравнени характеристиките на стратегии с взаимодействащи предавателни възли с тези на конвенционалната мрежа по отношение на вероятността за покритие. С двете стратегии n-IC

и n -NC факторът на интерференцията намалява с увеличаване на стойността на n . Въпреки това, при $n > 6$, скоростта на намаление е незначителна и следователно по-високите стойности на n не са препоръчителни, като се има предвид усложнението на системата, което се получава с увеличение на броя на възлите. Направеният анализ има за цел да определи степента на анулиране на интерференцията, която се променя в стойността на „ n “ в двете стратегии. Този анализ дава насоки за избор на оптимална стойност на броя на „ n “, тъй като той влияе върху много работни параметри и включва компромис между осигуряване на покритие и сложност на мрежата.

2.6. Приноси към втора глава

1. Разработен е подход, базиран на стохастична геометрия (пространственото разположение на възлите е моделирано с независим PPP), за да се характеризира вероятността на покритие на всяко потребителско оборудване.
2. Въз основа на извършен анализ на ефективността на покритие в хетерогенни мрежи с n -взаимодействащи си предавателни възли и получените резултати от симулациите на трислойни мрежи прилагачи подходи за анулиране на смущенията (n -IC) и коопериране в мрежата (n -NC), е оценена степента на анулиране на смущения и е предложен подход за определяне на оптимална стойност на " n " като компромис между покритието и сложността на мрежата.

ГЛАВА 3. Оптимизация на покритието и пропускателната способност чрез само-оптимизиращо се управление на наклона на антената

3.1. Въведение

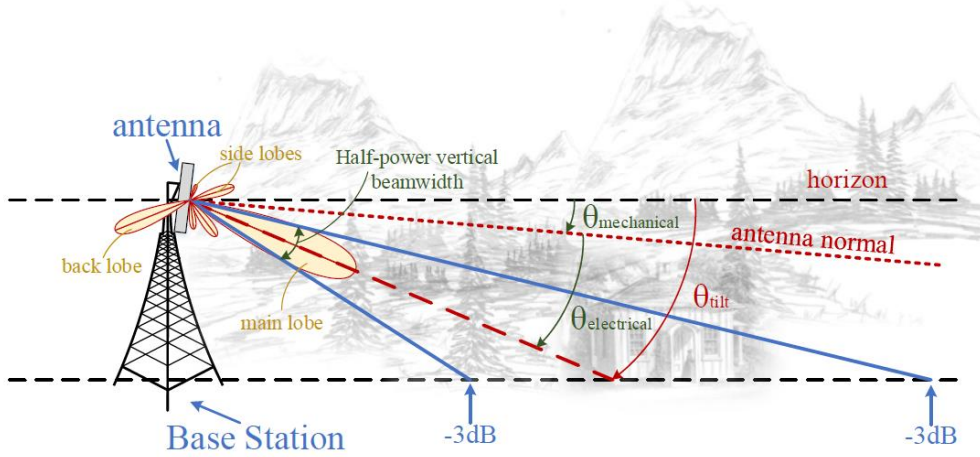
Чрез използване на техниката на накланяне на антената може да се постигне значително намаляване на интерференцията към другите клетки, а оттук значително подобрение в желаното SINR, сумарната скорост на предаване на данни и средната пропускателна способност на клетката [84, 85]. Анализът направен в тази глава се отнася до производителността на връзката в посока надолу в зависимост от SINR и мощността на получения сигнал от потребителите в крайните области на покритие на клетката. Предложеният алгоритъм за определяне на оптималния наклон на антената използва техниката на машинно обучение за решаване на проблема по предсказуем и автономен начин.

3.2. Моделиране на параметрите на антената на базовата станция

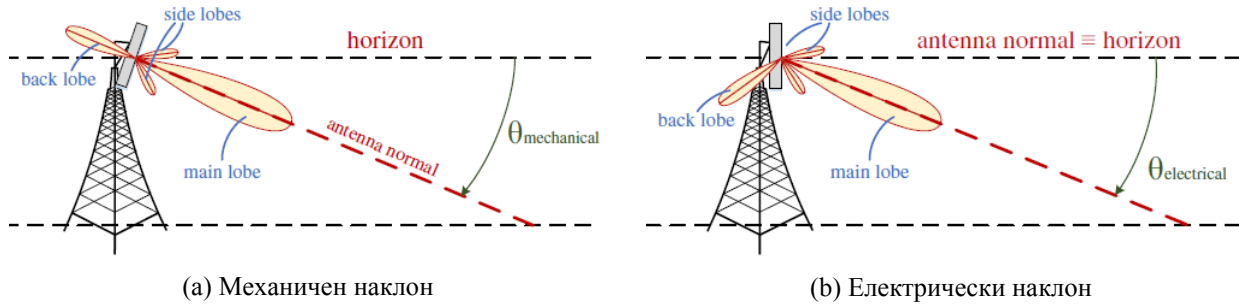
Въпреки че има голямо разнообразие от типове и геометрии на антените, всички антени могат да се характеризират с малък набор от основни параметри (фиг.3.1). На Фиг. 3.2, антената е наклонена надолу, което означава, че той е положителен, $\theta_{tilt} > 0$. По принцип наклонът може да се извърши по механичен или и електрически начин [130].

Целта на схемата за управление на наклона на антената е да се намали предавателната мощност на BS и едновременно повторно използване на радио ресурсите в множество клетки. Чрез ограничаване на предавателната мощност към всяка клетка (секторизирана клетка), използвайки антени с насочени лъчи, вътрешно-каналната интерференция може да

бъде намалена, като по този начин се повиши ефективността на радио ресурсите [86]. Адаптирането на наклона на антената е формулирано като задача за оптимизация на справедливата полезност в клетъчната мрежа, подлежаща на определени мрежови ограничения [87]. Настройките за накланяне на антената могат да се извършат в базовите станции по координиран начин за управление на смущенията.



Фиг. 3.1 Антена на базова станция. Означени са параметрите на основната, страничната и задната част на диаграмата на излъчване на антената, както и вертикалната ширина на лъча и ъгъла на наклона



(a) Механичен наклон

(b) Електрически наклон

Фиг. 3.2 Механична и електрическа схема на управление на наклона [92]

3.3. Моделиране на шаблона на излъчване на антена на базовата станция

За моделиране на хоризонталния и вертикален шаблон на излъчване на антените в мобилните мрежи от следващо поколение двете уравнения предложени от 3GPP са [132],

$$A_H(\varphi) = -\min \left[12 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right), A_m \right], \quad A_m = 25\text{dBi} \quad (3.4)$$

$$A_V(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right), A_m \right], \quad SLA_v = 20\text{dBi} \quad (3.5)$$

Където, $A_H(\varphi)$ & $A_V(\theta)$ е съответно затихването на антената в хоризонталната (азимутална) и вертикалната равнина за 3-секторния клетъчен сайт. φ [°] е ъгълът между нормалата на антената и посоката на измерване, φ_{3dB} [°] е хоризонталната половина на мощността на ширината на лъча (Half Power Beamwidth: HPBW) на главния лист, A_m е затихването в обратна посока, с което страничните и задните листа на еталона на излъчване са апроксимирани и SLA_v е затихването на страничния лист. Следователно, уравнение 3.5 може да се запише като:

$$A_V(\theta, \theta_b) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta - \theta_b}{\theta_{3dB}} \right), A_m \right], \quad SLA_v = 20\text{dBi} \quad (3.6)$$

където θ_b е ъгъл на наклона на антената по отношение на хоризонта.

За трисекторни клетъчни сайтове хоризонталният и вертикалният модел на излъчване могат да бъдат комбинирани, за да образуват 3D модел на излъчване [132],

$$A(\varphi, \theta) = -\min\{-A_H(\varphi) - A_V(\theta), A_m\} \quad (\text{dBi}) \quad (3.7)$$

Следователно,

$$A(\varphi, \theta, \theta_b) = -\min\{-A_H(\varphi) - A_V(\theta, \theta_b), A_m\} \quad (\text{dBi}) \quad (3.8)$$

За да се получи усиляването на антената в дадена точка в пространството, максималното усиляване на антената $G_{T,\max}$ [dBi] може да се получи, както следва:

$$G_T(\varphi, \theta, \theta_b) [\text{dBi}] = [A(\varphi, \theta, \theta_b) + G_{T,\max}], G_{T,\max} = 15 \text{ dBi} \quad (3.9)$$

От уравнение 3.9 е ясно, че усиляването на антената на BS зависи от $(\varphi, \theta, \theta_b)$. Следователно, ако се променя ъгълът на накланяне (θ_b) усиляването на антената може да се регулира и може да бъде представено като функция на ъгъла на наклона на антената като $G_T(\theta_b)$.

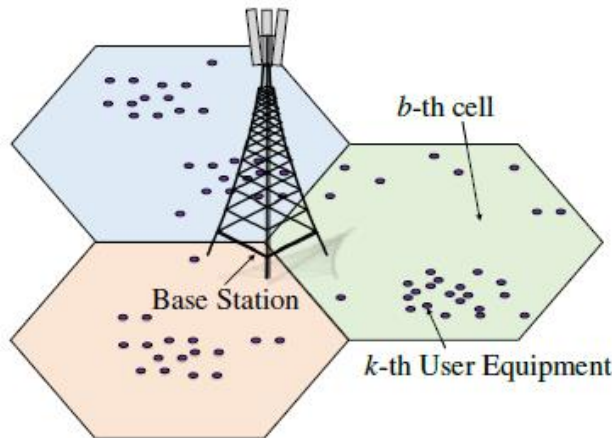
3.4. Подход, базиран на машинно обучение

Разработено е решение за прилагане на обучение с утвърждение (Reinforcement Learning: RL), за да се оптимизира ъгъла на накланяне на антената на BS. В такъв сценарий агентът е клетката и наблюдава околната среда (или мрежата) чрез данни от измервания, които тя събира.

Използването на методите на обучение с утвърждение е подходящо за решение на задачата за самооптимизация на наклона на антената. За тази цел е избран разпределен алгоритъм с координация между различни BS. За всяка BS има представителен случай на решение на задачата. Решенията се обменят и се координират между BS.

3.7. Оптимизация на покритието и капацитета чрез управление на наклона на антената в различни видове безжични канали

3.7.1. Системен модел



Фиг. 3.7 Модел на мобилната мрежа [A3]

Разгледан е модел на мобилна мрежа в градска среда. Той се състои от една BS, оборудвана с три антени, всяка от които покрива един сектор, както е показано на Фиг. 3.7. Потребителското оборудване (User Equipment: UE) е разположено по произволен начин в

мрежата. Анализът се фокусира върху радиосигналите, предавани от BS и получени от UE, т.е. по връзката в посока надолу на клетъчната система. Мощността на получения полезен сигнал $P_{R(k,b)}$ за потребител $k = \{1, \dots, B\}$ е:

$$P_{R(k,b)} = P_T G_{T(k,b)} |h_{(k,b)}|^2 \quad (3.28)$$

Където, P_T е мощността на предавания сигнал, $G_{T(k,b)}$ е коефициентът на усилване на BS антената в посока надолу, $G_{R(k,b)}$ е приемното усилване на потребителската антена (обикновено $G_{R(k,b)} = 1$) и $|h_{(k,b)}|^2$ е усилването на канала между UE и антената на BS.

Полученият SINR за потребител k е:

$$\gamma_{k,b} = \frac{P_{R(k,b)}}{P_N + P_{I(k)}} \quad (3.29)$$

Където изразът $P_{I(k)}$ е мощността на смущаващите сигнали, получени от потребител k и предавани от всички клетки, различни от b , $P_{I(k)} = \sum_{l=1, l \neq b}^B P_{R(k,l)}$, и P_N мощността на шума в канала и вътрешния шум на потребителското оборудване, които са апроксимирани като адитивен бял гаусов шум (Additive White Gaussian Noise: AWGN).

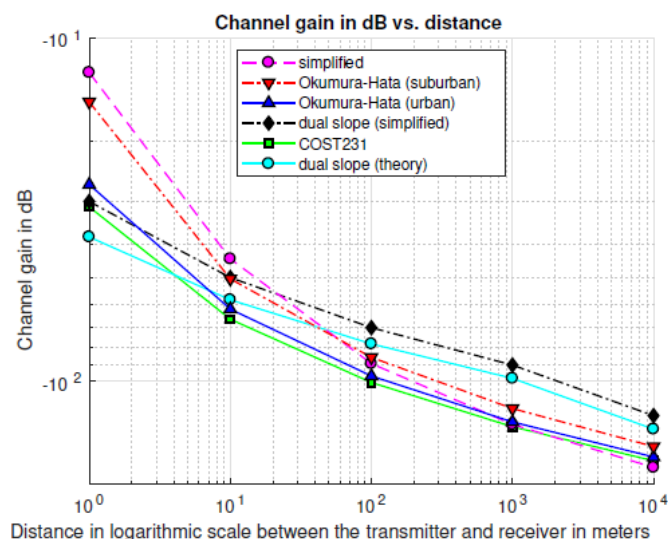
За да се подобри полученото SINR, трябва да се повиши или мощността на приетия сигнал $P_{R(k,b)}$, или да намалее сумата от мощността на шум и интерференцията $P_N + P_{I(k)}$, или и двете. В настоящата работа е анализиран ефектът от модела на безжичния канал върху усилването на канала $|h_{k,b}|^2$ и следователно върху получената мощност $P_{R(k,b)}$ и постигнатото SINR($\gamma_{k,b}$).

3.7.2. Симулационни резултати и анализ

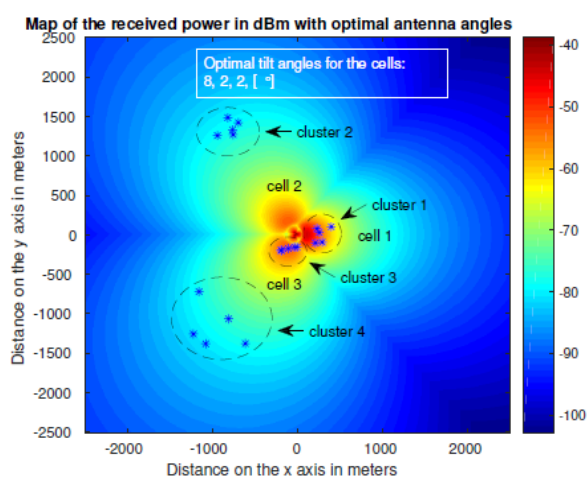
В тази точка се разглеждат резултатите от симулациите, извършени чрез симулационните параметри, дадени в Таблица 3.2. Подробните общи и специфични за антената параметри са дадени в [92].

Таблица 3.2 Симулационни параметри

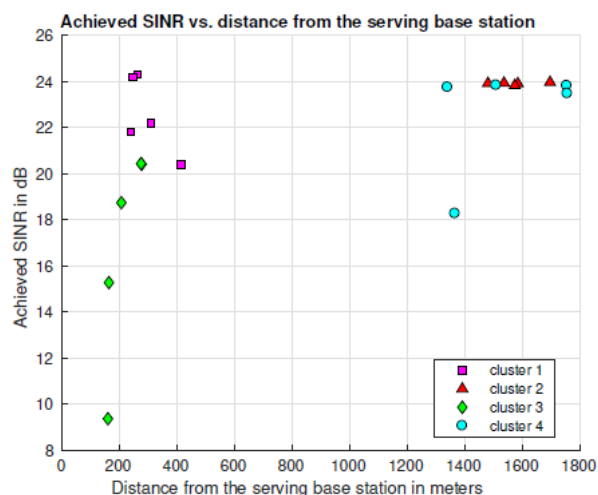
Parameter	Notation	Modeling	Value	Dimension
Number of users	K	—	20	—
Number of cells	B	—	3	—
Carrier frequency	f	—	1-1.9	GHz
Minimum tilt angle	$\theta_{b,min}$	According to [88]	0	°
Maximum tilt angle	$\theta_{b,max}$		10	°
Step of tilt adjustment	$\Delta\theta_b$	—	2	°
BS antenna height	H_b	According to [132]	32	m
UE antenna height	H_k		1.5	m
Path loss exponent (simplified model)	α	According to [1]	4.5	—
Reference distance (simplified model)	d_0		30	m
COST 231 coefficient	C_M		3	dB
Path loss exponents (dual slope model)	n_1, n_2	According to [137]	2, 4	—
Path loss at reference distance (dual slope model)	p_1		38	dB



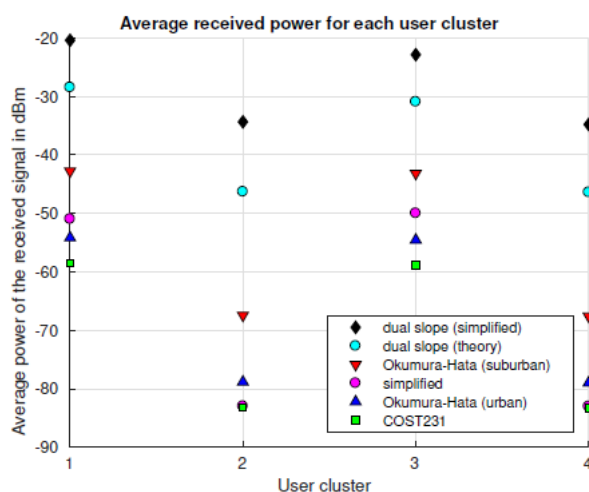
Фиг. 3.8 Зависимост на усилването на канал от разстоянието между предавателя и приемника [A3]



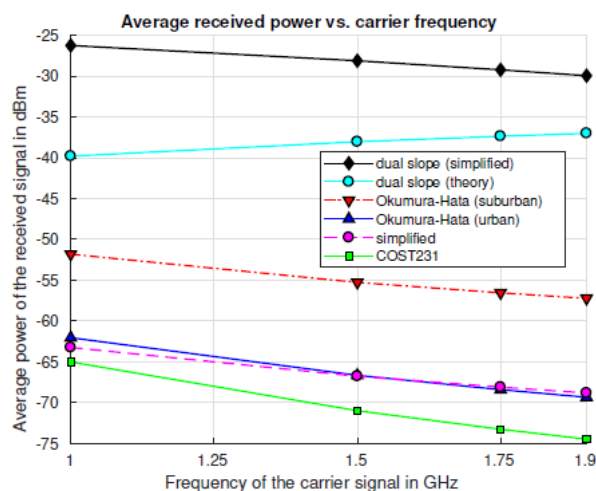
Фиг. 3.9 Симулиран мрежов сценарий; карта на приетата мощност с оптимален ъгъл на наклона на антената за носеща честота $f = 1.5$ GHz и градски Okumura-Hata модел на канала [A3]



Фиг. 3.10 Постигнато SINR за всеки един потребител като функция на разстоянието на обслужващата антена на за носеща честота $f = 1.0$ GHz и градски Okumura-Hata модел на канала [A3]



Фиг. 3.11 Средна приета мощност за всеки един потребителски клъстер в зависимост от модела на канала за носеща честота $f = 1.5$ GHz [A3]



Фиг. 3.12 Средна приета мощност от всички потребителски клъстери в зависимост от модела на канала и носещата честота [A3]

Фиг. 3.8 илюстрира зависимостта на усилването на канала за различни модели на разпространение от разстоянието между предавателя и приемника (двете оси са с логаритмични скали). Линеините отсечки за опростения модел (dual slope) имат един ъгъл на наклона преди критичното разстояние и различен след него, което е пряко свързано с експонентите на загубите на пътя [130]. Може да се отбележи, че опростения модел дава сходни резултати с първоначално предложеното в [137] с отместване от около 10dB.

3.8. Заключение

Предложеният метод за оптимизация на капацитета и покритието при използване на електрически наклон на антената BS в мобилните мрежи има потенциал да подобри работата на мрежата, като същевременно намали оперативните разходи и сложността. Резултатите след прилагане на оптимизацията на ъгъла на наклона на антената показват до 30% увеличение на сумарната скорост на предаване на данните на мрежата, като същевременно покритието е оптимизирано в зависимост от географското разпределение на потребителите. Работата в тази глава отразява влиянието на динамична самооптимизация на наклона на антенните базирана на RL, при различни модели на каналите, върху капацитета на връзката в посока надолу в градски сценарий на клетъчна мрежа. Постигнатите резултати показват, че внимателният избор на модел на канала и свързаните с него параметри е от решаващо значение за процеса на самооптимизация на наклона на антената.

3.9. Приноси към трета глава

1. Извършен е сравнителен анализ на влиянието на различни модели на канали върху прилагане на метод за динамично и адаптивно управление на наклона на базиран на машинно обучение с утвърждение.
2. Въз основа на резултатите от този анализ и извършените симулационни експерименти е предложен подход за избиране на адекватен модел на канала и подходящ алгоритъм за регулиране на наклона на антената за различни мрежови сценарии.

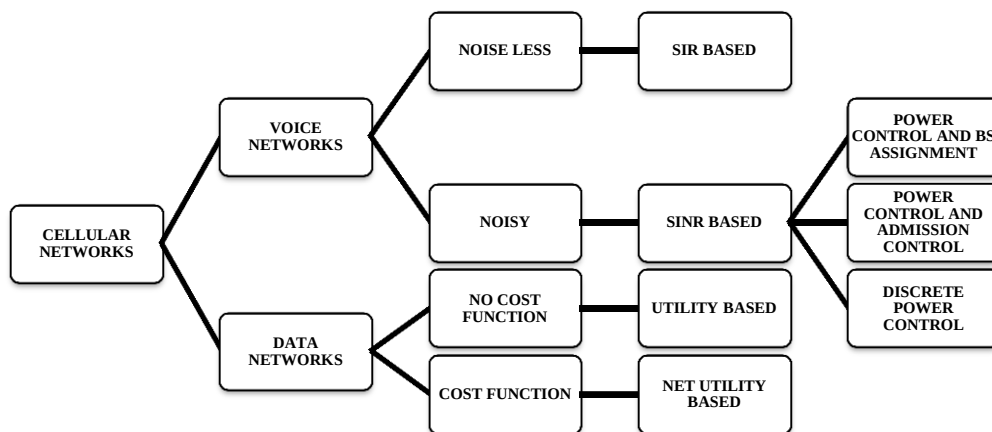
ГЛАВА 4. Оптимизация на предавателната мощност в ограничена от интерференция хетерогенна клетъчна мрежа

4.1. Въведение

В тази глава се анализират енергийно-ефективни механизми за управление на мощността в хетерогенни мрежи и се предлагат различни подходи за намаляване на потреблението на енергия. Основният фокус е ефективно управление на мощността във физическия слой чрез помощта на информацията, генерирана от висшите слоеве.

4.2. Управление на мощност в безжични комуникационни системи

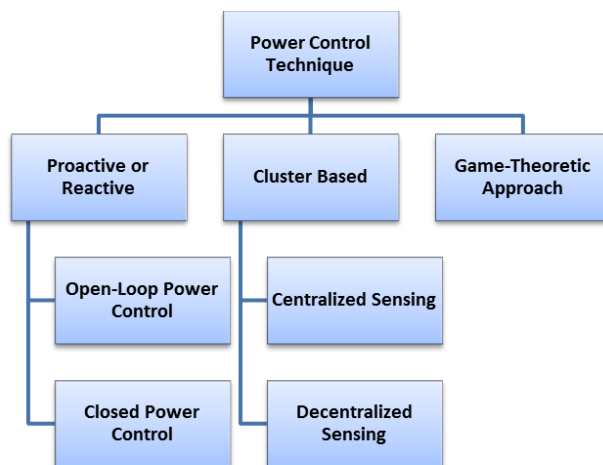
Ефективното прилагане на различни алгоритми за управление на мощността в клетъчните радиокомуникационни системи може да предложи значително подобрение на QoS за всички потребители. Така че изборът на подходящ алгоритъм за управление на мощността е от първостепенно значение, тъй като е важно да се повиши цялостната ефективност на системата. Таксономията на различните подходи за управление на мощността в клетъчните мрежи е показана на Фиг. 4.1 [146].



Фиг. 4.1 Таксономия на различните подходи за управление на мощността в клетъчни мрежи

4.4. Видове механизми за управление на мощността в клетъчни мрежи

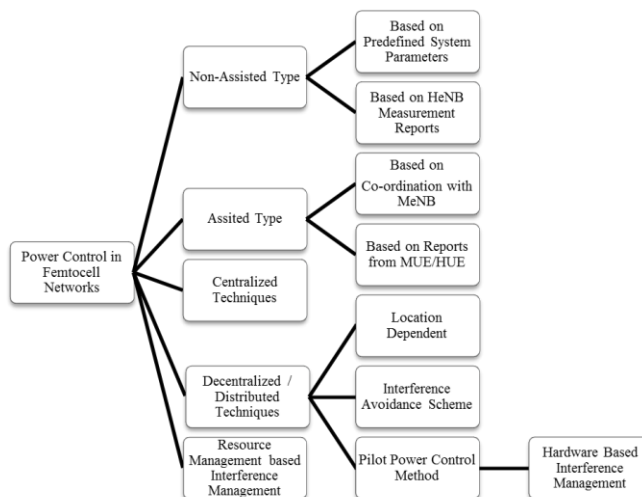
На фиг.4.3 са показани основните подходи за управление на мощността в безжични клетъчни мрежи.



Фиг. 4.3 Основни подходи за управление на мощността в безжични клетъчни мрежи [A1]

4.5. Управление на мощността в хетерогенни клетъчни мрежи

Класификация на подходите за управление на мощността в хетерогенни клетъчни мрежи е показана на Фиг. 4.4.



Фиг. 4.4 Различни подходи за управление на мощността в фемто-клетъчни мрежи [A1]

4.6. Оптимизация на предавателната мощност на базовите станции в клетъчни мрежи ограничени от интерференция

4.6.1. Системен модел

Нека разгледаме една клетъчна мрежа изградена върху тор с радиус $\mathfrak{R}^2$. Пространственото разположение на базовите станции (BSs) са моделирани с PPP с интензитет λ . Един d размерен случаен процес $\Xi \subset \mathfrak{R}^d$ е PPP само, ако броят на точките в затвореното пространство $\subset \mathfrak{R}^d$ е поасонова случайна величина. Пространствените локации на $j^{\text{тата}}$ BS в мрежата се дефинират чрез $\Xi = \{X_j\}_{j \in N}$, където N е естествено число. Пространственото разположение на потребителския терминал се приема да бъде в точка X_o . За да може да се достигне горна граница на SE, всяка BS може да използва всички налични честотни ленти. Схемата за асоцииране на потребителите се приема да се базира на максимална мощност на приетия сигнал (maximum Received Signal Strength: maxRSS). BS с най-силен сигнал за UT е определена като обслужваща BS за този потребител. Работоспособността на мрежата е ограничена тъй като сигналите от останалите BS се разглеждат като смущения. Нека P_T да е предаваната мощността на всички BSs. Мощността приета в UT от BS в X_j се изразява по следния начин:

$$P_R(X_j) = KL_j P_T \quad (4.7)$$

където, K е константата на разпространение, L_j е член, свързан със загубите от разпространение изразени чрез $\|X_j - X_o\|^{-\gamma}$, където γ е експонентата на загубите, зависеща от типа на повърхнината на торуса. BS се определя като обслужващ възел, когато $X_S : X_S = \arg \max_{X_j \in \Xi} P_R(X_j)$ и оттук мощността на сигнала, приет от UT от обслужващата BS се дава чрез $KL_S P_T$, където загубите от разпространение, свързани с обслужващата BS са L_S . Мощността на смущенията представлява сумарната мощност на всички сигнали без тези на обслужващата BS и се дава чрез $\sum_{X_j \in \Xi, j \neq S} KL_j P_T$. В IL мрежа мощността на смущенията, а не термичния шум, оказва основно въздействие върху качеството на работата [145].

4.6.2. Оптимизация на предавателната мощност на базовата станция

В този раздел е даден подход за оптимизиране нивото на мощността на BS с цел за максимизиране на EE на мрежата. EE теоретично се оценява чрез пропускателна способност на системата за единица мощност (bits/sec/Watt). Пропускателната способност се дава чрез $W \log_2(1 + SINR) \text{ bits/sec}$, където W е честотната лента на сигнала и $SINR$ е отношението сигнал към интерференция плюс шум. Следователно, EE се формулира по отношение на SE като:

$$EE = \frac{SE}{P'/W} \quad (4.8)$$

където, $SE = \log_2(1 + SINR) \text{ bits/sec/Hz}$ и $P' > P_T$ е мощността консумирана от предавателя. Двете количества са свързани с линейното уравнение $P' = xP_T + y$, а положителните константи x и y отразяват загубите във външните и антената [184, 185]. Замествайки в горното уравнение за SE, се получава:

$$EE = \frac{W \log_2(1 + SINR)}{P'} \quad (4.9)$$

Изразът за $SINR$ в една PL мрежа се дава като:

$$SINR = \frac{KL_S P_T}{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} KL_j P_T + \eta W} \quad (4.10)$$

където, η е спектралната плътност на мощността на адитивния термичен шум и $SINR$ може да се изрази като:

$$SINR = \frac{1}{\frac{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} L_j}{L_S} + \frac{\eta W}{KP_T L_S}}. \quad (4.11)$$

Следователно, изразът за EE се получава като функция на предаваната мощност чрез заместване на (4.11) в (4.9), т.е.:

$$EE(P_T) = \frac{W \log_2 \left(1 + \frac{1}{\frac{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} L_j}{L_S} + \frac{\eta W}{KP_T L_S}} \right)}{xP_T + y}. \quad (4.12)$$

Диференцирайки уравнение (4.12) по P_T и приравнявайки го към нула, се получава $\frac{\partial EE(P_T)}{\partial P_T} = 0$

$$\Rightarrow \frac{(xP_T + y) \frac{\eta W}{KL_S}}{\left(\frac{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} L_j}{L_S} P_T + \frac{\eta W}{KL_S} \right) \left(\left(\frac{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} L_j}{L_S} + 1 \right) P_T + \frac{\eta W}{KL_S} \right)} = x \log_2 \left(\frac{\left(\left(\frac{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} L_j}{L_S} + 1 \right) P_T + \frac{\eta W}{KL_S} \right)}{\left(\frac{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} L_j}{L_S} P_T + \frac{\eta W}{KL_S} \right)} \right) = 3.3x \log_{10} \left(\frac{\left(\left(\frac{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} L_j}{L_S} + 1 \right) P_T + \frac{\eta W}{KL_S} \right)}{\left(\frac{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} L_j}{L_S} P_T + \frac{\eta W}{KL_S} \right)} \right)$$

Като се приложи разширение на Тейлор за дясната страна на уравнението и се пренебрегнат членовете от по-висок ред се получава:

$$(xP_T + y) \frac{\eta W}{KL_S} = 3.3xP_T \left(\left(\frac{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} L_j}{L_S} + 1 \right) P_T + \frac{\eta W}{KL_S} \right) \quad (4.13)$$

Решението за оптимална мощност на BS е:

$$P_{T_{OPT}} = \frac{Q + \sqrt{Q^2 - P}}{R}. \quad (4.14)$$

Тук,

$$P = 13.2xy \frac{\eta W}{KL_S} \left(\frac{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} L_j}{L_S} + 1 \right) \quad Q = 2.3x \frac{\eta W}{KL_S} \quad R = 3.3x \left(\frac{\sum_{\substack{X_j \in \Xi \\ j \neq S}} L_j}{L_S} + 1 \right)$$

В един практически сценарии, приетата мощност не е постоянна а варира поради ефекти като фединг и отражения в безжичния канал. Като се отчетат двата ефекта приетата мощност породена от X_j се дава с израза [152]:

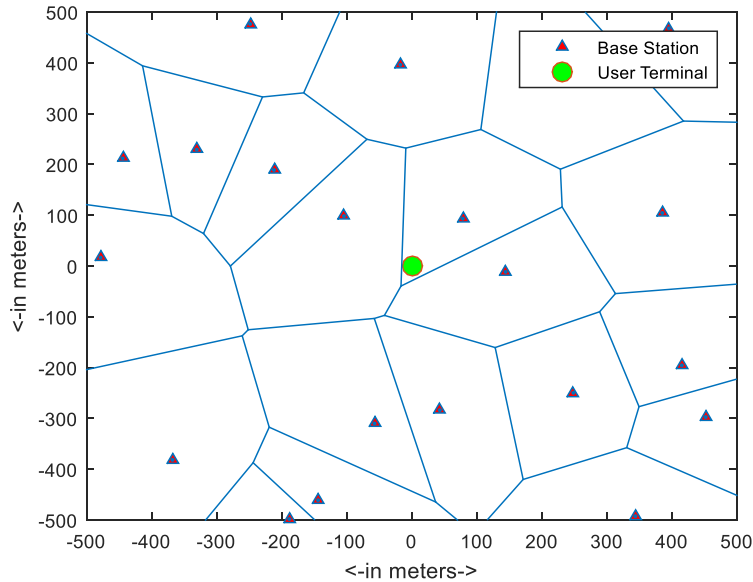
$$P_R(X_j) = K S_{X_j} h_{jo} P_T L \quad (4.15)$$

където, $S_{X_j} \in S_X$, което е набор от променливи, имащи логонормално разпределение с средна нулева стойност, отразяващи фадинга между предаващите възли и UT. Тук h_{jo} е случайната променлива, отразяваща фадинга между възел X_j и UT, $E[h_{jo}] = 1$. BS е обслужваща станция $X_S : X_S = \arg \max_{X_j \in \Gamma} E[P_R(X_j)]$, където $E[.]$ е математическото очакване. Следователно, изразът за EE от уравнение (4.12) се модифицира чрез включване на очакваното SINR в приемната страна, както следва:

$$EE(P_T) = \frac{W \log_2 \left(1 + \frac{1}{\frac{\sum_{j \in \Xi, j \neq S} L_j}{L_S} + \frac{\eta W}{K \cdot E[S_{X_j} h_{jo} P_T] L_S}} \right)}{x P_T + y} \quad (4.16)$$

4.6.3. Симулационни експерименти и анализ на резултатите

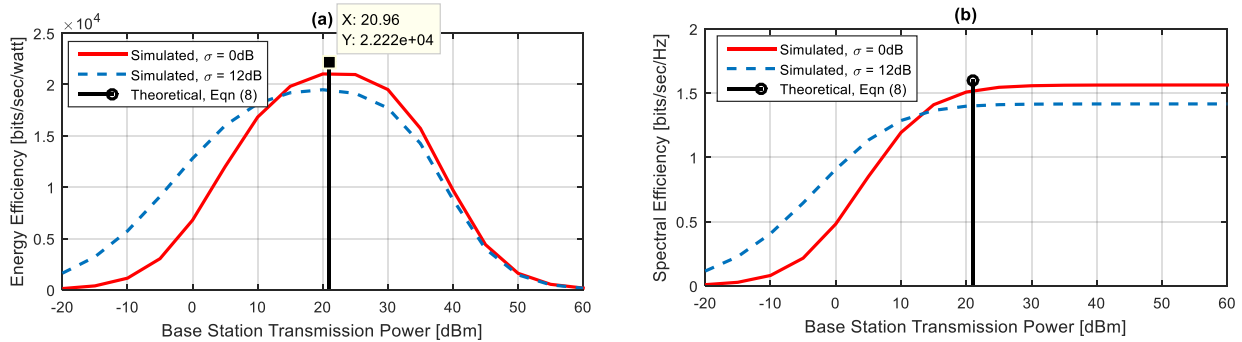
Анализът, направен в предишния раздел, се валидира чрез симулации в тази точка. Симулирана е 1L клетъчна мрежа, която е разположена на площ от 1x1 km². Пространственото местоположение на BS се счита за произволно и се моделира с PPP. Една типична мрежа е представена на Фиг. 4.5. Потребителския терминал идентифицира дадена BS като обслужваща станция, базирана на максимален RSS. Всички сигнали, с изключение на тези на обслужващата BS, се считат за смущения. В симулацията честотната лента на канала (W) и мощността на шума (ηW) се приемат съответно за 5MHz и -93dBm.



Фиг. 4.5 Типична клетъчна мрежа при която разположението на BS е моделирано с PPP с интензитет $\lambda=20$ [A4]

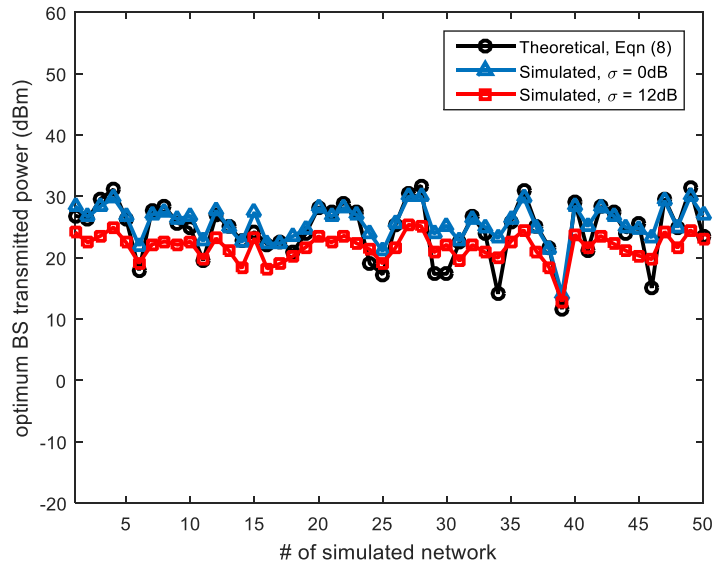
Оптималната стойност на предаваната мощност ($P_{T_{opt}}$) от BSs на мрежата се изчислява теоретично от уравнение 4.16 и се изчисляват съответните стойности на EE и SE. Освен това EE и SE на съответната мрежа се оценяват с различни мощности, предавани от BS, в диапазона от -20dBm до 60dBm. За всяко ниво на мощност се извършват 10^4 симулации.

Фадингът се моделира с логнормално разпределение с нулева средна стойност. Стандартното отклонение (σ) за разпределението се приема за 0dB, отразяващо мрежа без фадинг и за 12dB при мрежа с наличие на фадинг.



Фиг. 4.6 Резултати от симулиране на IL клетъчни мрежи [A4]

На Фиг. 4.6(a) и 4.6(b) са показани съответно предадената мощност на BS спрямо енергийната ефективност и предаваната BS мощност спрямо спектралната ефективност. От Фиг. 4.6(a) се вижда, че стойността на мощността, предавана от BS, която съответства на максимално постижимо ЕЕ, почти съответства на теоретичната стойност. Освен това, както се вижда на Фиг. 4.6(b), въпреки че SE е монотонно увеличаваща се функция, тя почти се насища след P_{OPT} .



Фиг. 4.7 Оптимална предавана мощност на BS за 50 мрежи [A4]

IL клетъчната мрежа с посочените по-горе параметри е симулирана 10^3 пъти, използвайки независими, но идентични PPPs. За всяка мрежа, P_{OPT} се оценява с помощта на уравнение 4.14. За всяка мрежа симулацията е извършена 10^4 пъти с *i.i.d.* фадинг и очакваната стойност за мощността на предаване, свързана с максимално постижима ЕЕ, се оценява и сравнява със съответната теоретична стойност. Сравнението на първоначалните 50 симулирани мрежи е представено на Фиг. 4.7. Математическото очакване на мощността на предаване, свързана с максимално постижима ЕЕ, е много близко до теоретичния резултат за всяка симулирана мрежа. Математическото очакване за мрежите с $\sigma = 0$ dB и 12dB са съответно 2.08dB и 3.18dB. Следователно стойността на P_{OPT} в мрежата осигурява максимална ЕЕ, като същевременно осигурява SE почти по-близо до максималната си стойност.

4.7. Заключение

В тази глава се разглежда управлението на мощността в мрежи с универсално преизползване на честотите, в които всяка клетка в мрежата използва целия наличен спектър [122, 186]. В такъв тип мрежи, интерференцията става основен фактор, ограничаващ ефективността, доминираща ефекта на топлинния шум. За разлика от мрежата без смущения, в една ограничена от смущения клетъчна мрежа на увеличението на предавателната мощност не води непременно до пропорционално подобрене на спектралната или енергийна ефективност [187]. Освен това, такива мрежи увеличението на ЕЕ е нелинейна функция на увеличаването на предавателната мощност на BS [188] и след достигане на максимум започва да намалява. Следователно от съществено значение е да може да се определи оптималната стойност на предавателната мощност, при която се постига компромис между ЕЕ и SE. Във връзка с това, е представено ново решение за максимизиране на ЕЕ като функция на предавателната мощност на базовата станция. ЕЕ се представя като функция на мощността на предаване на BS, като се вземат предвид всички смущаващи сигнали и се намира оптимално градиентно решение. Намирането на оптимални нива на мощност за хетерогенни мрежи и D2D комуникационните системи може да се разглежда като бъдещо направление на изследванията за 5G.

4.8. Приноси към четвърта глава

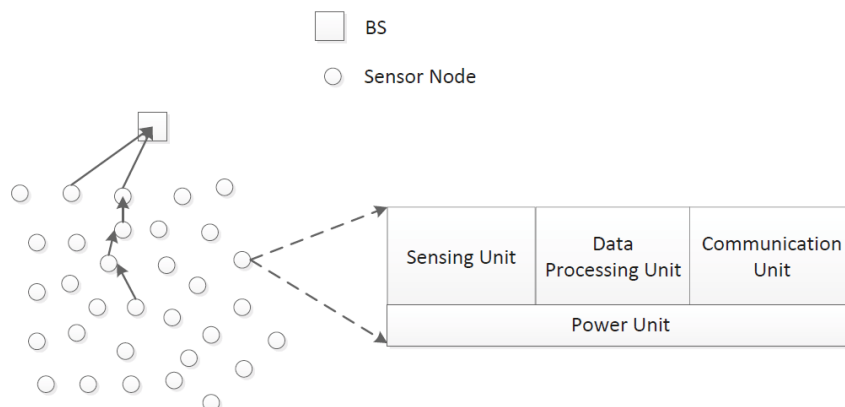
1. Предложен е нов подход за максимизиране на енергийната ефективност на клетъчни мрежи ограничени от смущения на базата на прилагане на градиентно оптимално решение за нивото на предавателната мощност на базови станции. Резултатите от симулационните експерименти показват, че теоретичната стойност за оптималната мощност на предаване на една базова станция, която да гарантира максимална енергийна ефективност, съответства на експерименталните резултати.

ГЛАВА 5. Енергийно балансиране на товара в плътни безжични D2D хетерогенни мрежи

5.1. Въведение

В тази глава е представен анализ и е предложено ново решение за енергийно ефективен протокол с балансиране на натоварването в безжични сензорни мрежи.

5.2. Безжични сензорни мрежи

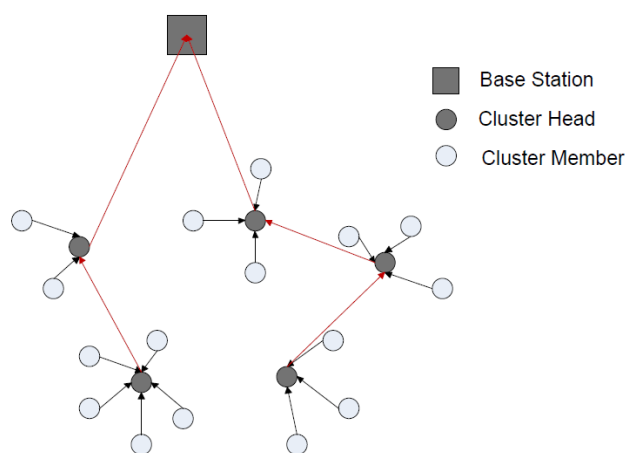


Фиг. 5.1 Компоненти на WSN

Една типична WSN се състои от определен брой сензорни възли, които събират информация от обкръжаващата среда и го препращат към колектор (тук наричан BS) за по-нататъшна обработка. Един пример на WSN е показан на Фиг. 5.1, където системните компоненти на сензорния възел също са илюстрирани [190].

5.3. Методи за рутиране, базирани на клъстериране

Концепцията за техниката на клъстериране е да се предава информация от много сензорни възли към една BS по ефективен начин; обикновено се използва йерархична техника за маршрутизиране. Маршрутизацията, базирана на клъстери, има за цел да формира йерархия от клъстери, както е показано на Фиг. 5.3.



Фиг. 5.3 Клъстерирана мрежа

5.4. Аспекти на проектиране на алгоритми, базирани на клъстеризация

Алгоритъмът, базиран на клъстериране, може да бъде реализиран по разпределен или централизиран начин. Разпределеният алгоритъм не изисква централна точка, за да бъде изпълнен. Задачата за конфигуриране на мрежата е споделена между всички възли в мрежата.

5.5. Увеличаване на жизнения цикъл на енергоспестяващите техники за маршрутизиране в WSN

Редица проучвания са изследвали въпроса за енергийно ефективни подходи за маршрутизиране за безжични сензорни мрежи [205]. Много от тях се основават на идентифициране и дефиниране на подходящи метрики за връзка по най-краткия път, докато някои извличат енергийно ефективни маршрути за мрежа, използвайки формулировка за глобална оптимизация.

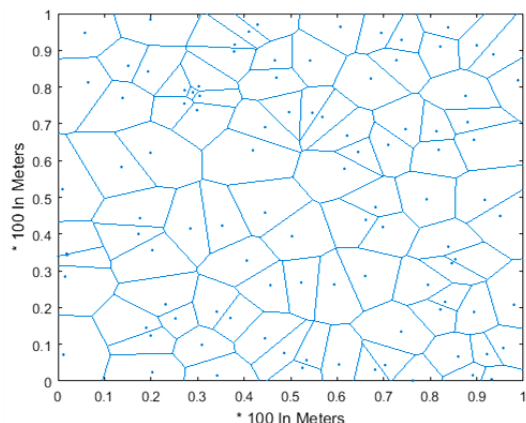
5.6. Балансиране на натоварването в хетерогенен WSN чрез енергийно ефективен решение за определяне на главния възел

5.6.1. Хетерогенен модел за WSN

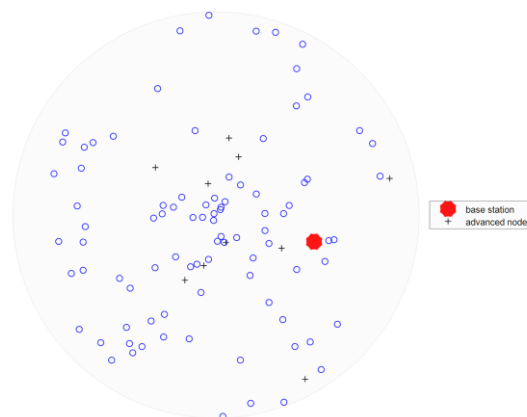
Хетерогенната WSN се състои от сензорни възли с различни възможности, като например такива, които са различни по тип и обхват на комуникация/отчитане, което осигурява по-голяма гъвкавост при реализацията на мрежата. Реализацията на хетерогенна WSN е по-

сложна от тази на хомогенна WSN. Поради това се препоръчва симулация и анализ на работата на мрежата преди реалното имплементиране на сензорните възли, тъй като различните конфигурации на разполагане могат да бъдат тествани, без да се вземат предвид разходите за реалното инсталиране на мрежата. В тази глава се предлага енергийно ефективно решение за хетерогенна WSN, базирано на LEACH и SEP, което също така осигурява и балансиране на натоварването с увеличаване на броя на предаване на пакети до BS на мрежата, чрез разпределяне на енергийния товар равномерно между всички възли. Това подобрява ЕЕ и цялостната работа на мрежата.

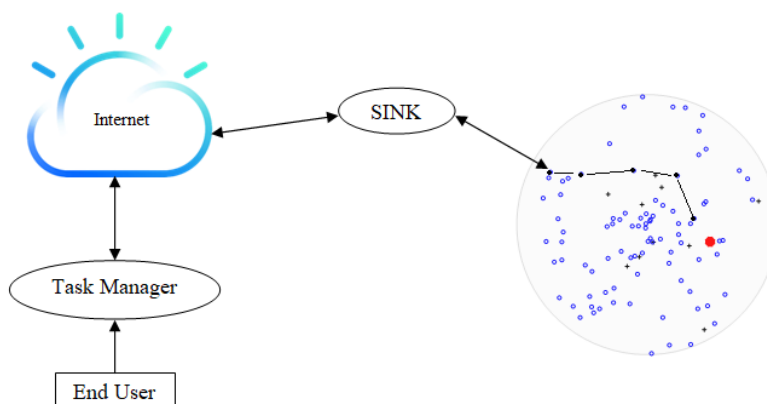
5.6.2. Системен модел



Фиг. 5.4 Равномерно разпределение на 100 възли на площ 100^2 метра [A5]



Фиг. 5.5 Симулиран модел на WSN с нормални и разширени възли [A5]



Фиг. 5.6 SEP протокол за клъстерирана хетерогенна WSN [A5]

Разглежда се HetNet модел на WSN с възли на различни енергийни нива и батерии с различни нива на мощност. За тази цел се приема, че m на брой възли имат a пъти повече енергия от останалите. Тези по-мощни възли се наричат „Разширени“ възли. Останалите $(1 - m) \times n$ са нормални възли. Предполага се, че всички възли са равномерно разпределени по сензорното поле [213]. Характеристиките на модела могат да бъдат обобщени, както следва:

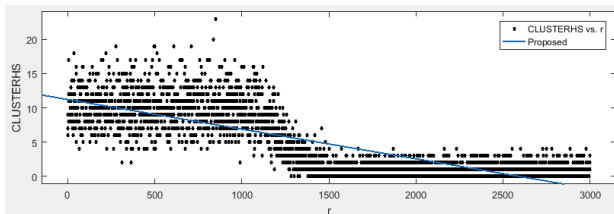
- Всички сензорни възли са разпределени равномерно в дадена област с една BS.
- Възлите не са мобилни и са хетерогенни.
- Всички възли могат да изпращат и получават данни.
- Възможно е възлите да не могат да изпращат данните към BS с еднократно предаване, т.е. само през един хоп.
- Допустимите възли изпращат и получават данни надеждно.

Първоначално се разгледани 100 възли с еднакви батерии на площ от 100 x 100 метра и BS е разположена централно. Всички параметри са дадени в Таблица 5.1, а на Фиг. 5.6 е илюстриран SEP протокола за клъстерирана хетерогенна WSN.

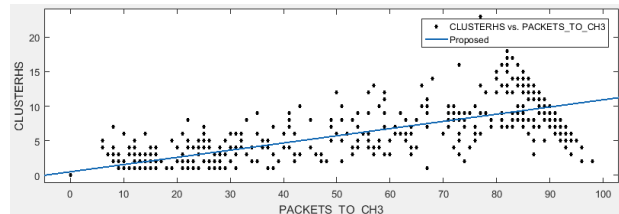
Таблица 5.1 Симулационни параметри [A5]

Parameters and Values Used During The Simulation	
Field Dimensions – M x M (in meters)	100 X 100
x and y Coordinates of the Sink	(50, 50)
Number of Nodes in the field	n =100
Optimal Election Probability of a node to become CH	P = 0.1
Data packet length	L = 2000bit
Parameters And Values Used For Energy Model (All Values In Joules)	
Initial Energy	$E_o = 0.5$
Transmitted Energy	$E_{TX} = 50.000000001$
Received Energy	$E_{RX} = 50.000000001$
Amplification Factor For Free Space	$E_{fs}=10.000000000001$
Multipath Fading	Emp=0.0013
Data Aggregation Energy	EDA=5.000000001
Parameters And Values For Heterogeneity	
Percentage of nodes that are advanced	m = 0.1
maximum number of rounds	$r_{max} = 3000$
Number of times advance nodes have energy greater than normal nodes	a = 2

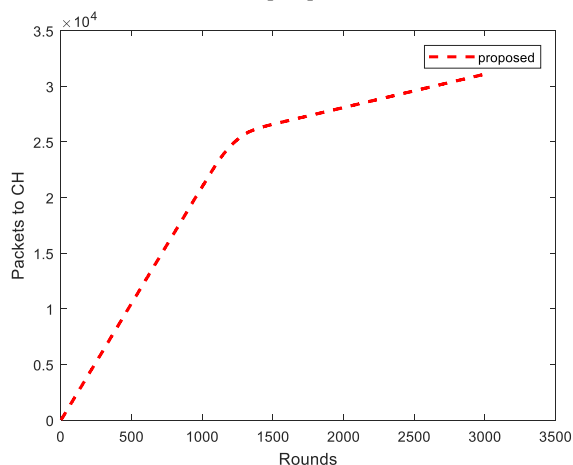
5.6.3. Анализ на симулационните резултати



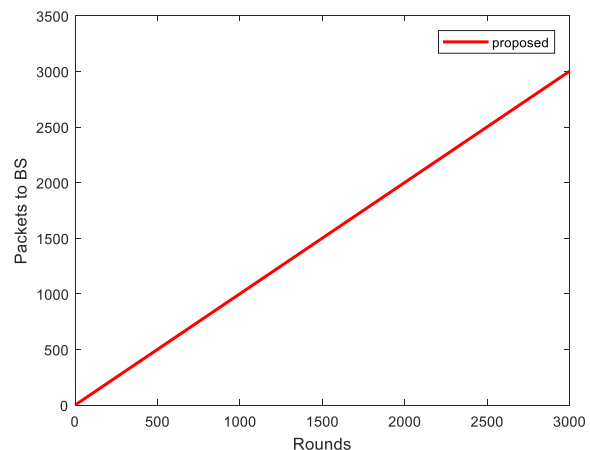
Фиг. 5.12 Брой на активни клъстерни глави след всеки рунд на предаване в хетерогенна мрежа [A5]



Фиг. 5.15 Брой на енергийни пакет изпратени до клъстерните глави във функция от броя на клъстерите [A5]



Фиг. 5.13 Брой на енергийни пакети изпратени от сензорите до клъстерните глави след всеки рунд на предаване в хетерогенна WSN [A5]



Фиг. 5.14 Брой на енергийни пакети изпратени от клъстерните глави до BS след всеки рунд на предаване в хетерогенна WSN [A5]

От горните фигури може да се види, че в следствие на предложения протокол се получава равномерност в броя на информационните пакети изпращани от клъстерните глави към базовата станция, което осигурява замяната на една клъстерна глава с друга при отпадане или отказ от обслужване.

5.7. Заключение

В тази глава е изследвано въздействието на хетерогенността на възлите, които са йерархично групирани в клъстери. В такъв мрежов сценарий, някои от нормалните възли стават клъстерни глави и агрегират данните на членове на своя клъстер, за да ги предадат на базовата станция. Хетерогенността води до нестабилно поведение на мрежата, когато един възел умира. В тази глава е предложено ново енергийно ефективно решение за предаване на данни в хетерогенна WSN. Предложената схема се базира на принципите на работа на съществуващи протоколи като LEACH и SEP. Симулационните резултати показват, че броят на предадените пакети към BS на мрежата се увеличава чрез равномерно разпределяне на енергийния товар между всички възли, което осигурява значително подобрене в работата на мрежата. Така предложеното решение гарантира, че процедурата за избор на глава на клъстера за разпределяне на натоварванията е енергийно ефективно, което води до подобрене в живота на мрежата.

5.8. Приноси към пета глава

1. Предлага се ново енергийно ефективно решение, което цели подобряване на жизнения цикъл на хетерогенни WSN въз основа на съществуващите протоколи LEACH и SEP. Резултатите от симулацията показват значително подобрене в жизнения цикъл на такива мрежи и увеличение на пропускателната им способност.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНИ ПРИНОСИ

Трябва да се отбележи, че поставената цел е осъществена чрез изпълнение на поставените задачи, вследствие на което са постигнати следните съществени резултати с научно-приложен характер:

1. Въз основа на извършен литературен обзор на различни методи за управление на смущенията заедно с подходи за управление на мощността и анализ на проблемите на покритието и оптимизацията на капацитета в клетъчни мрежи използващи различни видове комуникационни възли, е формулирана целта на дисертационния труд. Тя касае разработване на рамка за контрол на мощността и управление на смущенията, като основният акцент се поставя върху енергийната ефективност в много плътни хетерогенни D2D комуникационни мрежи.
2. Предложен и разработен е математически подход, базиран на стохастична геометрия (пространственото разположение на комуникационните възли е моделирано с независим поасонов процес), характеризиращ вероятността за покритие при различно разпределение на потребителското оборудване в хетерогенни мрежи.
3. Въз основа на извършен анализ на ефективността на покритие в хетерогенни мрежи с n -взаимодействащи си предавателни възли и получените резултати от симулациите на

трислойни мрежи прилагащи подходи за анулиране на смущенията (n-IC) и коопериране в мрежата (n-NC), е оценена степента на анулиране на смущения и е предложен подход за определяне на оптимална стойност на "n" като компромис между покритието и сложността на мрежата.

4. Извършен е сравнителен анализ на приложението на различните модели на канали за разпространение, използвайки съществуващ метод за динамично и адаптивно регулиране на наклона на предавателните антени, основаващ се на методологията на машинно обучение с утвърждение. Въз основа на резултатите от този анализ и извършените симулационни експерименти е предложен подход за избиране на адекватен модел на канала и подходящ алгоритъм за регулиране на наклона на антената за различни мрежови сценарии.
5. Предложен е нов подход за максимизиране на енергийната ефективност на клетъчни мрежи ограничени от смущения на базата на прилагане на градиентно оптимално решение за нивото на предавателната мощност на базови станции. Резултатите от симулационните експерименти показват, че теоретичната стойност за оптималната мощност на предаване на една базова станция, която да гарантира максимална енергийна ефективност, съответства с експерименталните резултати.
6. Предложено е ново енергийно ефективно решение, което цели подобряване на жизнения цикъл на хетерогенни безжични сензорни мрежи въз основа на съществуващите протоколи LEACH и SEP. Резултатите от симулацията показват значително подобрене в жизнения цикъл на такива мрежи и увеличение на пропускателната им способност.

IV. ИЗПОЛЗВАНИ СЪКРАЩЕНИЯ

AWGN - Additive White Gaussian Noise
 BS - Base Station
 CA CCS - Carrier Aggregation with Cross-Carrier Scheduling
 CBF - Coordinated Beamforming
 CH - Cluster Head
 CS - Coordinated Scheduling
 D2D - Device to Device
 EE - Energy Efficiency
 e-HetNet - enhanced HetNet
 eICIC - enhanced ICIC
 HetNet - Heterogeneous Networks
 HPBW - Half Power Beamwidth
 i.i.d - independent identically distributed
 IA - Interference Alignment
 IC - Interference Cancellation
 ICIC - Inter-Cell Interference Coordination

IL - Interference-Limited
 LEACH - Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
 LTE-A - LTE-Advance
 maxRSS - maximum Received Signal Strength
 NC - Network Cooperation
 n-IC - n-interference cancellation
 n-NC - n-network cooperation
 PPP - Poison Point Process
 QoS - Quality of Service
 RL - Reinforcement Learning
 SE - Spectrum Efficiency
 SEP - Stable Election Protocol
 SIC - Successive Interference Cancellation
 SINR - Signal-to-Interference plus Noise Ratio
 UE - User Equipment
 WSNs - Wireless Sensor Networks

V. СПИСЪК С ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

- [A1] S. R. Samal, "Interference Management Techniques in Small Cells Overlaid Heterogeneous Cellular Networks", *Journal of Mobile Multimedia*, vol. 14, no. 3, pp. 273-306, July 2018, doi: <https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.1432>.
- [A2] S. R. Samal, S. Bandopadhaya, S. K. Dora, V. Poulkov, "Coverage analysis of heterogeneous wireless network with n-interacted transmission nodes", *IGI Global, International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN)*, vol. 9, no. 4, pp. 49-58, 2017, doi: 10.4018/IJITN.2017100106.
- [A3] N. Dandanov, S. R. Samal, S. Bandopadhaya, V. Poulkov, K. Tonchev and P. Koleva, "Comparison of Wireless Channels for Antenna Tilt based Coverage and Capacity Optimization", *GWS-2018 (Accepted)*.
- [A4] S. Bandopadhaya, S. R. Samal, S. K. Dora and V. Poulkov, "Base station transmission power optimization in interference-limited cellular networks for maximum energy efficiency", in *Proceedings of 13th IEEE International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, pp. 228-231, Nis, Serbia, Oct. 2017.
- [A5] S. R. Samal, S. Bandopadhaya, A. Pathy, V. Poulkov and A. Mihovska "An Energy-Efficient Head Node Selection For Load Balancing in a Heterogeneous Wireless Sensor Network", *IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR-2018)*, Pacific Grove, United States, Oct. 2018.

VI. ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [2] S. Shamai and B. M. Zaidel, "Enhancing the cellular downlink capacity via co-processing at the transmitting end", in *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 5(5), pp. 1745-1749, 2001.
- [3] D. Gesbert, et al., "Multi-cell MIMO cooperative networks: A new look at interference," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28(9), pp. 1380 – 1408, 2010.
- [4] A. Carleial, "A case where interference does not reduce capacity," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 21(5), pp. 60–70, 1975.
- [39] B. G. Lee, D. Park, and H. Seo, *Wireless Communications Resource Management*. John Wiley & Sons, Singapore, 2008.
- [40] I. Jatzela and M. Naghshineh, "Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunication systems: A comprehensive survey", *IEEE Pers. Commun. Mag.*, vol. 3, no. 3, pp. 10–31, June 1996.
- [44] M. M. Do and H. J. Son, "Interference Coordination in LTE/LTE-A (1): ICIC", tech@netmanias.com, June 2014.
- [45] Ekram Hossain, Long Bao Le, Dusit Niyato, "Radio Resource Management in Multi-Tier Cellular Wireless Networks", Wiley Publication, January 2014.
- [46] D. Zhang, et al., "The Time-Domain Enhanced Inter-Cell Interference Coordination in Heterogeneous Networks", *Wireless Conference (EW)*, Guildford, UK, UK, 16-18 April 2013.
- [84] Fredrik Athley, Martin N. Johansson, "Impact of Electrical and Mechanical Antenna Tilt on LTE Downlink System Performance", *71st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, 24th June 2010.
- [85] J. Parikh and A. Basu, "Impact of base station antenna height and antenna tilt on performance of LTE systems", *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 9, Issue 4, pp. 06-11, Aug. 2014.
- [86] H. Cho, Y. -I Kim and D. K. Sung, "Protection against cochannel interference from neighboring cells using down-tilting of antenna beams", *53rd IEEE Vehicular Technology Conference*, Aug. 2002.

- [87] B. Partov, D. J. Leith & R. Razavi, "Utility fair optimization of antenna tilt angles in LTE networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 23, Issue 1, pp. 175–185, Feb. 2015.
- [88] O. N. C. Yilmaz, J. Hamalainen & S. Hamalainen, "Self-optimization of remote electrical tilt", 21st IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, pp. 1128-1132, 2010.
- [92] N. Dandanov, H. Al-Shatri, A. Klein, V. Poulkov, "Dynamic Self-Optimization of the Antenna Tilt for Best Trade-off Between Coverage and Capacity in Mobile Networks", *Wireless Personal Communications: Springer Link*, vol. 92, Issue1, pp. 251–278, Jan 2017.
- [99] T. Han, et al., "5G converged cell-less communications in smart cities", in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 44-50, Mar. 2017.
- [120] K. Youngju, S. Lee and D. k. Hong, "Performance analysis of two-tier femtocell networks with outage constraints", *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 9, no. 9, pp. 2695–2700, 2010. [Online]. Doi:10.1109/TWC.2010.070910.090251
- [122] J. G. Andrews, F. Baccelli, and R. Ganti, "A tractable approach to coverage and rate in cellular networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 11, pp. 3122–3134, November 2011.
- [123] H.-S. Jo, Y. J. Sang, P. Xia, and J. Andrews, "Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: A comprehensive downlink SINR analysis," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 10, pp. 3484–3495, October 2012.
- [126] A. Ghosh, J. Zhang, J.G.Andrews, and R. Muhamed, "Fundamentals of LTE", Prentice-Hall, 2010.
- [130] O. N. C. Yilmaz, S. Hamalainen and J. Hamalainen, "Comparison of remote electrical and mechanical antenna downtilt performance for 3GPP LTE", 70th IEEE Vehicular Technology Conference Fall, pp. 1–5, 2009.
- [132] 3GPP, TR 36.814 V0.4.1, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA Physical layer aspects.
- [137] M. J. Feuerstein et al., "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, 1994.
- [145] B. Błaszczyszyn, M. Karray, and H. Keeler, "Using Poisson processes to model lattice cellular networks", In the *Proc. of IEEE INFOCOM*, July 2013.
- [146] V. G. Douros and G. C. Polyzos, "Review of some fundamental approaches for power control in wireless networks", *Computer Communications* 34, 1580–1592, Elsevier, Mar 2011.
- [152] J.W. Lee, R. R. Mazumdar, and N. B. Shroff, "Opportunistic power scheduling for dynamic multi-server wireless systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(6):1506–1515, June 2006.
- [184] F. Richter, A. J. Fehske and G. Fettweis, "Energy efficiency aspects of base station deployment strategies of cellular networks", 70th IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC), Sept. 2009.
- [185] O. Arnold, F. Richter, G. Fettweis and O. Blume, "Power consumption modelling of different base station types in heterogeneous cellular networks", In *IEEE Future network and mobile summit*, June 2010.
- [186] IEEE std 802.16e/D9, "Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems", IEEE standard for local and metropolitan area networkspart, 2005.
- [187] G. Y. Li, et al., "Energy-efficient wireless communications: Tutorial, survey, and open issues", *IEEE Wireless Communications*, vol. 18(6), pp. 28-35, 2011.
- [188] B. Błaszczyszyn, and H. Keeler, "Studying the SINR process of the typical user in Poisson networks by using its factorial moment measures", *IEEE Transaction on information theory*, vol. 61(12), pp. 6774-6794, 2015.
- [190] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292 – 2330, 2008.
- [205] B. Krishnamachari, "Networking Wireless Sensors", Cambridge University Press, 2005. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541025>.
- [213] G. Smaragdakis, I. Matta, and A. Bestavros, "SEP: A Stable Election Protocol For Heterogeneous Wireless Sensor Networks", Technical Report BUCS-TR-2004-022, Mar. 2004.



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

Soumya Ranjan Samal, M.Sc.

**INTERFERENCE BASED EFFICIENT POWER CONTROL IN HIGHLY DENSE D2D
COMMUNICATION NETWORKS**

ABSTRACT of Ph.D. THESIS

The topic of this thesis is related to coverage and capacity optimization in D2D (Device to Device) enabled dense heterogeneous networks, with the goal of maximizing the energy efficiency. For the achievement of this goal were proposed and developed novel routing techniques ensuring load balancing in heterogeneous wireless sensor networks, transmission power optimization techniques. Several channel models have been analyzed to obtain the best trade-off between the coverage and capacity through dynamic and self-optimized antenna tilt.

The thesis consist of 5 Chapters, 47 Figures, 2 Tables. The number of references is 225 with more than 80 % from the last 10 years. The analysis, proposed methods and results are presented through 5 author publications, 2 of which in Journals and 3 presented at international conferences. In Chapter 1 a survey and analysis of the state of the art is carried related to interference management techniques in wireless systems with their inherent challenges and future research work. In Chapter 2, the coverage performance in enhanced D2D HetNet (Heterogeneous Network) with n-interacted transmission nodes is analyzed statistically. In Chapter 3, the effect of different types of wireless channel models and their selection for obtaining dynamic self-optimization of the Base Station (BS) is investigated. In Chapter 4, a novel solution to maximize Energy Efficiency (EE) in Interference-Limited (IL) cellular networks encountered in Long-Term Evolution (LTE) and LTE-Advanced (LTE-A) Systems is proposed. In Chapter 5, a novel energy efficient solution for data transmission in a heterogeneous wireless sensor network is proposed.

The major contributions and novelties of the thesis are related to: a) the proposal a strategy to improve the coverage performance of HetNet which includes network cooperation and interference cancelation technique; b) the comparative analysis of the application of different propagation models to achieve better trade-off between coverage and capacity by dynamic self-optimized antenna tilt using an existing method for dynamic and adaptive tilt adjustment based on reinforcement learning methodology which figure out that, the channel model and related parameter must be carefully chosen for the performance of tilt adjustment algorithm and the network; c) the proposal a novel solution to maximize the energy efficiency in IL cellular networks encountered in LTE and LTE-A systems where a gradient based optimal level solution for the BS transmission power is derived; d) the proposal a novel energy efficient solution for data transmission to improve the network life-time of heterogeneous Wireless Sensor Network based on the existing protocols like Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) and Stable Election Protocol (SEP).