



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Електротехника и електроника”

маг. инж. Михаил Николаос Маламатудис

**МОДЕЛИРАНЕ И СЪВРЕМЕННИ МЕТОДИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА
ЕФЕКТИВНОСТТА НА МІМО КАНАЛИ В БЕЗЖИЧНИ
КОМУНИКАЦИОННИ СИСТЕМИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3. Комуникационна и
компютърна техника

Докторска програма: Комуникационни мрежи и системи

Габрово, 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Комуникационна техника и технологии” към факултет „Електротехника и електроника” на Технически университет – Габрово, проведен на 12.06.2019 г.

Дисертационният труд съдържа 130 страници. Научното съдържание е представено в увод и четири глави, и включва 116 фигури, 7 таблици и 68 математически изрази. Цитирани са 126 литературни източника. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в катедра „Комуникационна техника и технологии” към факултет „Електротехника и електроника” на Технически университет – Габрово и на територията на гр. Габрово.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 16. 09. 2019 г. от 15,30 ч. в Заседателна зала, сграда Ректорат на Технически университет – Габрово.

Материалите по защитата са на разположение за интересуващите се в кабинет 3209, корпус №3 на Технически университет – Габрово.

Номерацията на формулите, фигурите, таблиците и цитираната литература в автореферата, съответства на тази в дисертационния труд.

© Михаил Николаос Маламатудис – автор, 2019

e-mail: malamatoudismichail@yahoo.gr

Заглавие: Моделиране и съвременни методи за подобряване на ефективността на ММО канали в безжични комуникационни системи

Тираж: 15 бр. (Бълг. език)

Място на отпечатване: Университетско издателство „Васил Априлов” при ТУ - Габрово



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Електротехника и електроника ”

маг. инж. Михаил Николаос Маламатудис

МОДЕЛИРАНЕ И СЪВРЕМЕННИ МЕТОДИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА МІМО КАНАЛИ В БЕЗЖИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ СИСТЕМИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3. Комуникационна и
компютърна техника

Докторска програма: Комуникационни мрежи и системи

Научен ръководител: доц. д-р инж. Станимир Михайлов Садинов

Рецензенти: проф. дтн инж. Райчо Тодоров Иларионов

проф. д-р инж. Теодор Божидаров Илиев

Габрово, 2019 г.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Използването и внедряването на ново поколение безжични комуникационни мрежи се базира на използването на МІМО (Multiple-Input Multiple-Output) технологията, при която чрез пространствено кодиране на сигнала се постига увеличаване на честотната лента на пропускане на канала, в който предаването и приемането на данни се осъществява чрез система от няколко антени (многоантенна система). Предавателните и приемните антени се разполагат така, че корелацията между съседните антени да бъде слаба.

Придобиването на информация за състоянието на канала е ключов фактор за търсенето на методи за подобряване на ефективността на каналите в безжичните комуникационни мрежи. Масивните МІМО системи обикновено разчитат на оценка на канала на връзката в права и обратна посока. С огромния брой канали, които се оценяват между приемо-предавателните станции, е необходимо достатъчно дълго време за кохерентност на каналите, за да се позволи ефективна работа. Точността, при която може да се определят оптималните параметри на канала и интервала от време, през който може да се приеме, че състоянието на канала е постоянно, води до множество ограничения при прилагането на методи за подобряване на ефективността на МІМО каналите в безжичните комуникационни мрежи.

Много от алгоритмите, необходими за моделиране и оценка на МІМО каналите намират приложение в безжичните комуникационни системи. Независимо от това съвременните МІМО системи се различават значително от традиционните по това, че броят на компонентите в приемо-предавателните антени и формираните канали става все по-голям, каналите трябва да бъдат обработвани успоредно и това значително влияе върху ефективността на комуникационната система.

МІМО алгоритмите са от съществена важност и за хардуерните платформи, тъй като те пряко влияят върху използваните изчислителни хардуерни ресурси, т.е. върху капацитета и ефективността на комуникационното оборудване. От съществена важност е да се намерят и използват алгоритми, които осигуряват висока комуникационна производителност, която може да бъде ефективно насочена към подходящ хардуер и по този начин да направи МІМО технологията доказана алтернатива за бъдещи комуникационни стандарти.

Независимо, че теорията на масивната МІМО технология е обещаваща, по-нататъшното развитие изисква задълбочен анализ на моделите и подходящо моделиране за оценка и анализ на различни алгоритми. В дисертационния труд се разглеждат съвременни методи, свързани с подобряване на ефективността на моделите на МІМО канали в безжичните комуникационни системи, базирани на IEEE 802.11-стандартите и 4/5G мобилните комуникационни системи.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е да се представят и изследват процесите при реализация на безжично радиопокритие, чрез използване на аналитични изрази и реализация на симулационни модели и провеждане на симулационни и експериментални изследвания, които да доведат до възможности за оценка и търсене на методи за подобряване на ефективността в съвременните многопотребителски широколентови безжични комуникационни мрежи.

За реализирането на формулираната цел е необходимо решаването на следните **основни задачи**:

- 1) Анализ и оценка на аналитичните модели на MIMO канали за връзка и приложението им при оценка на разпространението на радиосигналите.
- 2) Синтезиране на примерен проект за компютърно проектиране на MIMO канал за връзка в безжична мрежа в среда на открито и на закрито.
- 3) Симулационно моделиране и изследване на MIMO канали за връзка в безжични комуникационни мрежи в графична среда на Matlab и WinProp.
- 4) Експериментално изследване на ефективността на MIMO канал в IEEE 802.11n и 4G LTE безжични комуникационни системи.

Методи на изследване

Методите за изследване са обособени основно в отделните глави, като аналитични, симулационни и практически, и обхващат зависимостите на параметрите, характеризиращи реализацията на отделните модели.

Приложимост

Създаден е алгоритъм за реализация на моделиране на MIMO канал с оценка на ефективността.

Разработено е планиране на безжично радиопокрытие чрез използване на MIMO канали връзка и осъществено и изпитано реално такова за: среда на закрито за територията на учебен корпус №2 „Баждар“ на Технически университет – Габрово, и среда на открито за територията на кв. Петкова нива в гр. Габрово.

Апробация на дисертационния труд

Основните резултати от дисертационния труд са докладвани на следните научни форуми:

- IX Национална конференция с международно участие „ELECTRONICA 2018“, София, България, IEEE каталожен номер CFP18P58-POD, с реферирание в Scopus.
- XXVI Международна научна конференция „ELECTRONICS - ET2017“, Созопол, България, IEEE каталожен номер CFP17H39-CDR, с реферирание в Scopus.
- Международна научна конференция UNITECH – Габрово, България: 1 публикация през 2018 г., 2 публикации през 2017 г. и 1 публикация през 2016 г.;
- 55-та годишна конференция на Русенския университет “Интелигентна специализация - иновативна стратегия за регионална икономическа трансформация”, Русе, България, 2016.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа увод, четири глави, заключение с приносите по дисертационния труд и списъци на използваните съкращения и символни означения, списък с публикациите по дисертационния труд и използваната литература, в общ обем от 142 страници. Научното съдържание включва 116 фигури, 7 таблици и 68 математически изрази. Цитирани са 126 литературни източника.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Състояние, проблеми и перспективи на приложението на MIMO технологията в безжични комуникационни системи

В първа глава е направен анализ на :

- Стандартите за безжична комуникация използващи MIMO технология

- Характеристики на MIMO технологията
- Проблеми при моделирането на масивни MIMO канали
- Проблеми при реализацията на комуникация чрез MIMO системи

В заключение на направения анализ на състоянието, проблемите и перспективите на приложението на MIMO технологията в безжични комуникационни системи, може да се обобщят следните по-важни изводи към първа глава:

- 1) Необходимостта от осигуряването на надеждни, сигурни и ефективни безжични комуникации налага все по-големия интерес към разработката на методи за подобряване на ефективността в конвенционалните MIMO системи и развиващите се нови масивни MIMO системи.
- 2) Използваните мрежови стандарти в безжичните мрежи дефинират начина на предаването на сигнали в комуникационните канали за връзка и са ограничени в използването на хардуерни решения поради сложността на съществуващите методи и алгоритми за обработка на сигналите.
- 3) Анализът на методите за прекодиране и детектиране на предаване на сигнали в MIMO канали води до ясната необходимост от компромис между скоростта на предаване на данните и осигуряването на нужното ниво на защитеност на информацията от смущения и интерференция според типа безжична комуникационна мрежа.
- 4) MIMO системите се характеризират с по-висока ъглова разделителна способност, която изисква каналния модел да предостави подробно описание на канала, особено когато потребителският терминал е с повишена степен и скорост на мобилност.
- 5) Тъй като радиоресурсите са ограничени, се налага прилагането на масивни MIMO системи, за които няма достатъчно добре разработени модели и съществуват редица проблеми, свързани с корелационните връзки, синхронизацията, алгоритмите за ефективна обработка на сигналите, агрегирането и обработка на големия обем данни с висока точност.

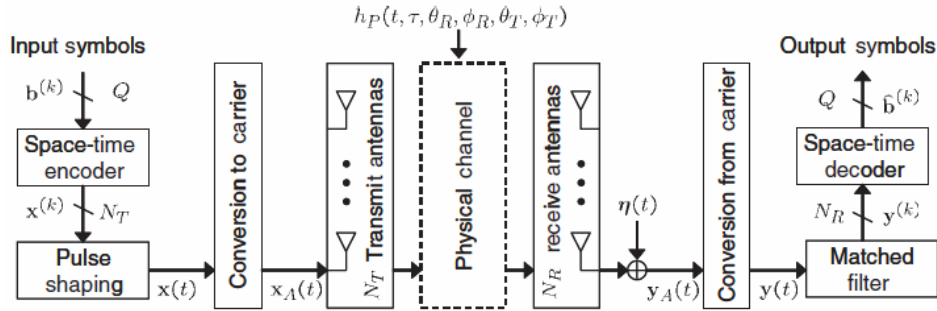
На основата на направения анализ и посочените по-важни изводи са формулирани целта на дисертационната работа и задачите, които трябва да се решат за постигането ѝ.

ГЛАВА 2. Аналитично моделиране на MIMO канали за връзка в безжичните комуникационни системи

2.1. Дефиниране и описание на MIMO системен модел

Фиг. 2.1 показва в обобщен вид MIMO система, която ще служи като отправен модел за дефиниране на комуникационния MIMO канал. Означенията с главни букви представят матрици (матрица H с mn -елемент H_{mn}), а означенията с малки букви - колонни вектори (вектор h с m -елемент h_m).

Входният поток от $Q \times 1$ входни символи $b^{(k)}$, където k е времеви индекс, се подават в пространствено-времеви енкодер, генерирайки поток от $N_T \times 1$ комплексни вектори $x^{(k)}$, където N_T представлява броят на предавателните антени. Филтри за оформяне на импулса трансформират всеки елемент от вектора, за да създадат $N_T \times 1$ времеви сигнални вектори $x(t)$, който се преобразува честотно в по-висока подходяща носеща честота (RF, микровълнова, оптична, акустична и др. честота). Полученият сигнален вектор $x_A(t)$ управлява предавателните преобразуватели устройства (антени, лазери, високоговорители и др.), които на свой ред излъчват енергия в среда за разпространение.



Фиг. 2.1 Обобщен вид на системния модел на ММО комуникационна система

Функцията $h_P(t, \tau, \theta_R, \phi_R, \theta_T, \phi_T)$ представя импулсната характеристика като отношение на излъченото поле от предавателя към големината на полето попаднало върху приемната антена. Времето t предполага че тази импулсна характеристика варира във времето поради динамиката на средата за разпространение на сигналите или динамиката на предавателя и приемника. Променливата τ представя времето закъснение отнесено към времето на възбуждане t . Допуска се крайна импулсна характеристика така, че $h_P(t, \tau, \theta_R, \phi_R, \theta_T, \phi_T) = 0$ за $\tau > \tau_0$. Допуска се също, че $h_P(t, \tau, \theta_R, \phi_R, \theta_T, \phi_T)$ остава постоянна за времеви интервал (т.е. в t) с времетраене τ_0 , така че при единично предаване, физическият канал може да бъде третиран като линейна, инвариантна във времето система.

Да предположим, че входният сигнал $x_A(t)$ създава поле $x_P(t, \theta_T, \phi_T)$, излъчвано от предавателния масив, където (θ_T, ϕ_T) означават ъглите на елевация и азимут, взети спрямо координатната рамка на предавателния масив. В приемния масив, разпределението на полето е $y_P(t, \theta_R, \phi_R)$, където (θ_R, ϕ_R) представляват ъглите, отнесени към координатната рамка на приемния масив и може да бъде изразено като конволюция:

$$y_p(t, \theta_R, \phi_R) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_p(t, \tau, \theta_R, \phi_R, \theta_T, \phi_T) x_p(t - \tau, \theta_T, \phi_T) \sin \theta_T d\tau, d\theta_T, d\phi_T \quad (2.1)$$

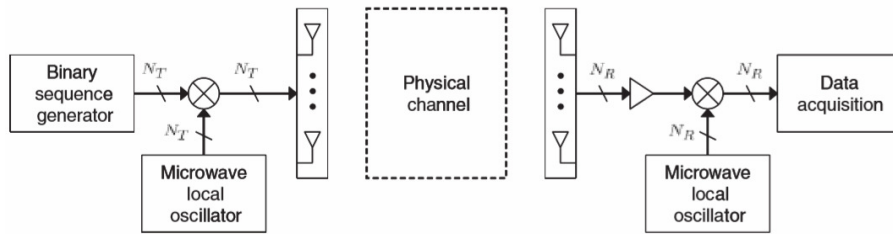
След това N_R -елементният приемен масив, дискретизира полето и генерира $N_R \times 1$ сигналния вектор $y'_A(t)$ в терминалите на масива. Шумът в системата обикновено се генерира във физическия канал за разпространение (интерференция) и електрониката във входните блокове на приемника (топлинен шум). За опростяване, всички адитивни шумове се добавят в една съставка, представен от $N_R \times 1$ вектора $\eta(t)$, който се добавя в терминалите на антената на приемника. Полученият вектор сигнал + шум $y_A(t)$ след това се преобразува честотно на по-ниска честота, за да се получи изходният $N_R \times 1$ вектор $y(t)$ в основната честотна лента. Накрая, $y(t)$ се предава през съгласуващ филтър, чийто изход се отчита/дискретизира веднъж на символ, за да се получи $y^{(k)}$, след което пространствено-времеви декодер изчислява $b^{(k)}$ стойностите на първоначално предадените символи.

2.2. Дефиниране и описание на ММО канал за оценка

Най-непосредственият начин да се разбере безжичният ММО канал е експериментално да се оцени $N_R \times N_T$ матрицата H на канала. Тази оценка включват ефектите на RF подсистемите и антените и следователно резултатите зависят от използваните конфигурации на масива.

2.2.1. Система за оценка на канала

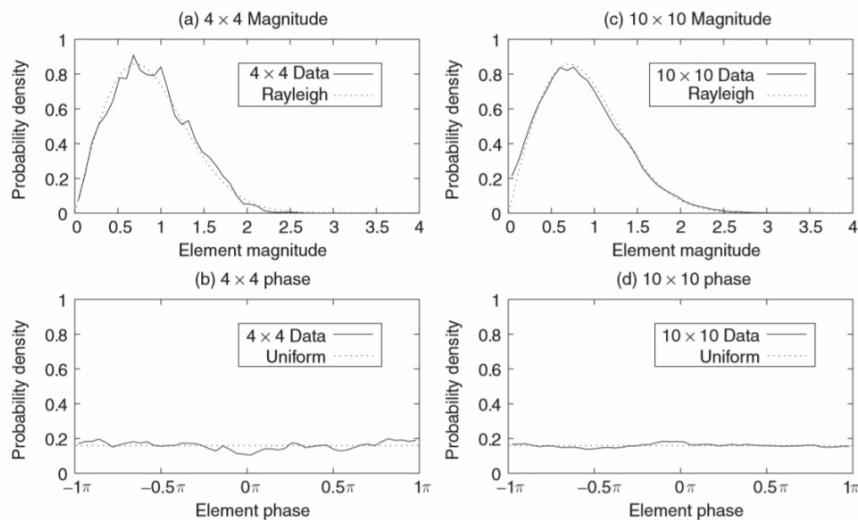
Платформата подробно описана тук, както е показана на фиг. 2.2, използва теснолентова MIMO комуникационна система, работеща при централна честота 2,45 GHz.



Фиг. 2.2. Блокова схема на система за оценка на канала за теснолентова безжична MIMO система

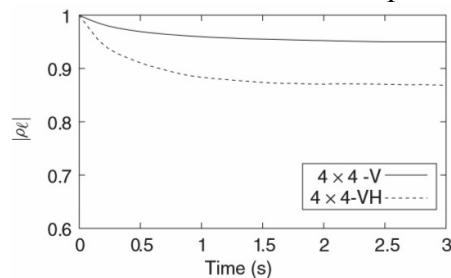
2.2.2. Характеристики на матрицата на канала

Фиг. 2.3 показва емпиричните характеристики на функцията на плътността на вероятностите за комплекти 4×4 -V (подфигури (a) и (b)) и 10×10 -V (подфигури (c) и (d)). Апроксимиращите криви за амплитудата и фазата са Релееви функции на плътността на вероятностите с отклонение от 0.5 и равномерно разпределение по $[-\pi, \pi]$, съответно. Съгласуването между аналитичните и емпиричните характеристики на функцията на плътността на вероятностите е отлично.



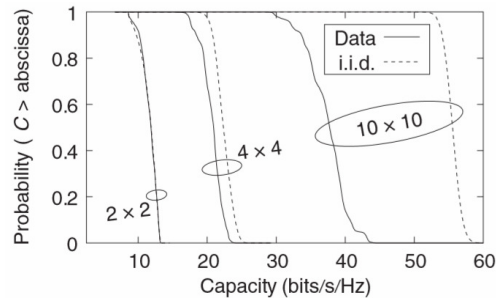
Фиг. 2.3. Емпирични функции на плътността на вероятностите за амплитудата и фазата на а), б) 4×4 и в), г) 10×10 матрични N елемента

Фиг. 2.4 изобразява амплитудата на ρ_t за период от 5 секунди за двата различни 4×4 набора от данни. За всички измервания корелацията остава относително висока, което показва, че каналът остава относително стационарен във времето.



Фиг. 2.4. Коефициент на времевата корелация за интервал от 5 секунди за двата 4×4 комплекта от данни

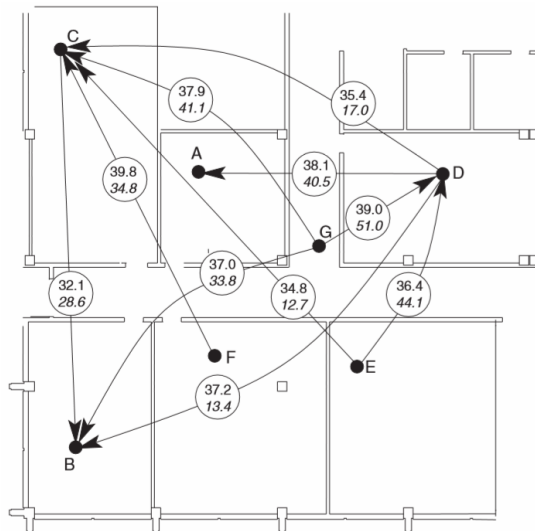
Фиг. 2.6 показва допълнителните кумулативни функции на разпределение (CCDF) на капацитета за тези сценарии. Също така бяха направени симулации на Монте Карло, за да се получи капацитет на CCDFs за канални матрици, чиито елементи са независими, идентично разпределени нулеви средни комплексни Гаусови случайни променливи.



Фиг. 2.6. Допълнителни кумулативни функции на разпределение на капацитета за предавателните/приемни антени масиви с нарастващ брой елементи (дължината на масива е 2.25λ за всички случаи)

Съответствието между измерените и моделираните 2×2 канала е отлично поради много голямото отделяне на антените (2.25λ). Въпреки това, тъй като размерът на масива се увеличава, симулираният капацитет продължава да нараства, докато измереният капацитет на антената намалява поради по-голямата корелация между съседни елементи.

Резултатите от капацитета на фиг. 2.6 показват незначителни разлики в получените SNR сред различните канални измервания, тъй като всяка калибрирана матрична реализация е независимо нормализирана, за да се постигне 20 dB средно SISO SNR. За да се изследва по-внимателно въздействието на този ефект, 10×10 линейни масиви от монополи с разделяне на $\lambda / 4$ елемента бяха разположени в редица различни места. Фиг. 2.7 показва различните местоположения, където всяка стрелка сочи от предаване и получаване на местоположение.



Фиг. 2.7. Примерно изследване, показващо влиянието на включването на ефектите от загубите при разпространение при изчисляване на капацитета

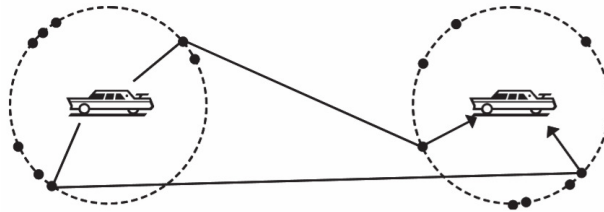
Горното число в кръга на всяка стрелка на фиг. 2.7 представлява капацитета, получен, когато измерената матрица на канала се нормализира независимо, за да се постигне 20 dB SISO SNR ($K = 1$). Второто число (в курсив) представлява капацитета, получен, когато нормализирането се прилага върху всички N матрици, разглеждани в

изследването. Често, когато разделянето между предаване и приемане е голямо (например $E \rightarrow C$), значителното разграждане на капацитета, наблюдавано при включване на загубата на размножаване, е значимо. В други случаи (като $G \rightarrow D$), капацитетът, изчислен с загуба на размножаване, всъщност се увеличава поради високата SNR в резултат на малкия разряд между предаване и приемане.

2.3. Дефиниране и описание на MIMO модели на канала

2.3.1. Геометрични модели с дискретно разсейване

Сценарият е изобразен на Фиг. 2.8. Тези два пръстеновидни модела са много прости за генериране и осигуряват гъвкавост при моделиране на различни среди чрез адаптиране на радиусите на разсейващия пръстен и разпределението на разсейванията по пръстена.



Фиг. 2.8. Геометрия на типичен модел с двойно пръстеновидно дискретно разсейване, показващ някои примерни пътища на разсейване.

2.3.2. Статистически кълъстерни модели

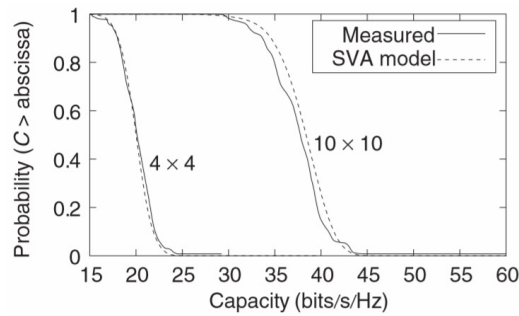
Повечето текущи модели се основават на първоначалната работа на Торин и др., които наблюдават, че многочасовите компоненти могат да бъдат групирани в кълъстери, които се разлагат експоненциално с увеличаване на времето за забавяне. По-късната работа приложи модела върху сценариите на закрито и добави насочваща информация. Статистическите описания на параметрите за многолъчево приемане могат да бъдат получени от измервания или от симулации с проследяване на лъчите. При условие, че основните статистически разпределения са точно определени, тези модели могат да предложат изключително точно представяне на каналите (в статистически смисъл). В резултат на тук се детайлизира едно използване на такъв модел, който разширява добре познатия модел на Saleh-Valenzuela с включване на статистика от ъглите на пристигане (AOA) на сигналите от отделните лъчи AOA допълнение към амплитудите им. Този модел е обозначен тук като модела Saleh-Valenzuela с Angle или просто SVA модел.

2.3.3. Сравнение на емпиричните модели с експериментално получени данни

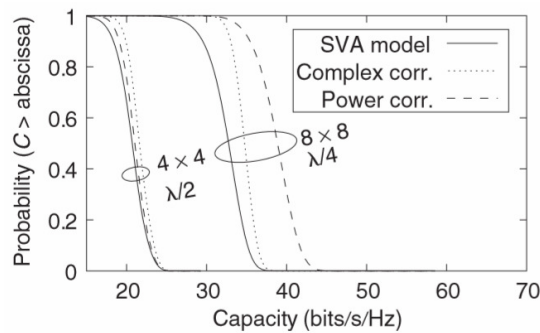
Фиг. 2.9 сравнява комплементарните кумулативни функции на разпределението (CCDFs) на капацитета за каналните матрици, получени чрез измерване, и чрез симулации на Monte Carlo на SVA модела. Съвпадението между измерените и моделираните канали е много добър, което означава, че моделът SVA е в състояние да улови важните механизми, които допринасят за капацитета на канала. Допълнителните работи показаха, че моделът SVA не само улавя поведението на капацитета, но също така точно моделира съвместната статистика по двойки на матрицата за пренос на канали. Тези резултати предполагат, че от статистическа гледна точка, модели като SVA, описани тук, могат точно да представят физическите канали за разпространение.

Фиг. 2.10 показва графичните зависимости на капацитет на CCDFs за матрици на канали, получени от SVA модел с параметри $\Gamma_T = 2$, $\sigma_\varphi = 26^\circ$, и равномерен кълъстер AOA / AOD. Резултатите за матриците, извлечени от MCN с коварианта R, изчислени директно от измерените данни също са показани. И двата комплекта данни използват

линейни масиви от монополи, с конфигурации 4×4 и 8×8 , използващи отстояние между антенните елементи съответно $\lambda / 2$ и $\lambda / 4$.



Фиг. 2.9. Сравнение на CCDFs на капацитета за експериментално снети данни и за симулация на SVA модел за 4×4 и 10×10 MIMO системи

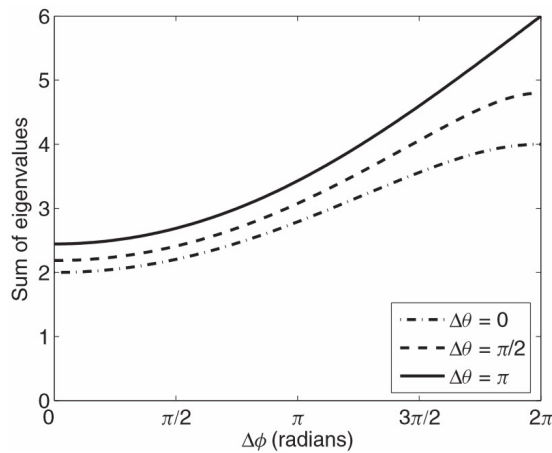


Фиг. 2.10. CCDFs на капацитета за 4×4 канала с $\lambda/2$ разстояние между елементите и 8×8 канала с $\lambda/4$ разстояние между елементите

2.4. Влияние на антените върху ефективността на MIMO канала за връзка

Средата за разпространение играе доминираща роля при определянето на капацитета на MIMO канала. Въпреки това, високата производителност на MIMO зависи и от правилното внедряване на антенната система.

Фиг. 2.11 изобразява графичните зависимости на собствените стойности k на корелационната матрица спрямо параметъра на ъглово разширяване $\Delta\phi$ за три различни стойности на $\Delta\theta$.

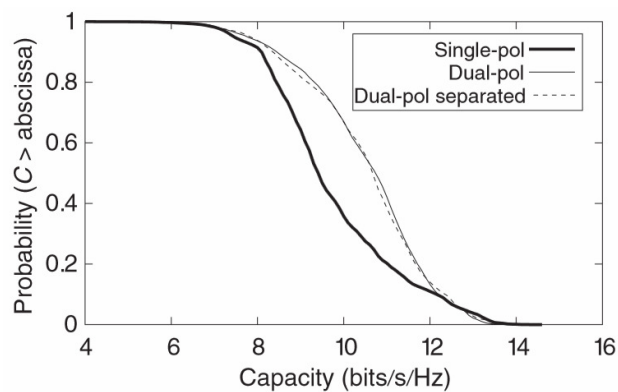


Фиг. 2.11. Нормализирана сума от собствени стойности на корелационната матрица спрямо параметрите на разширение на ъгъла на падащото поле за идеални точкови сензори

Както може да се види, за единичен път на разпространение ($\Delta\theta = \Delta\varphi = 0$) съществуват само два канала, съответстващи на двете възможни поляризации на вълната на инцидентна равнина. С увеличаването на ъгъла, k нараства до максимална стойност от шест, което показва наличието на шест независими режима на комуникация. Ако се вземе предвид пълното азимутно разпространение, корелационната матрица става диагонална, което показва шест независими канала. Тези канали обаче не са еднакво "добри", тъй като мощността, получена от z ориентираните сензори, е два пъти по-голяма от мощността, получена от другите сензори.

От практическа гледна точка изграждането на мултиполяризирана антена, която може да постигне ефективността, предложена във фиг. 2.11, е проблематична.

Фиг. 2.12 изобразява CCDFs, получени в резултат на измерените данни. Комбинирането на пространственото разделяне и поляризацията не увеличава капацитета над това, което е възможно само при поляризацията за този сценарий.



Фиг. 2.12. CCDF за 2×2 канала, използващи различни типове поляризация / пространствено разделяне с реалистична нормализация

2.5. Аналитичен модел за определяне на загубите в свободното пространство

2.5.1. Изчисляване на разстоянието на покритие и загубите в свободното пространство

Определянето на FSPL се извършва по (2.2):

$$FSPL_{dB} = 20\lg(d) + 20\lg(f) + K \quad (2.2)$$

където: d – разстояние; f – честота; K – константа, чиято стойност зависи от мерните единици, използвани за d и f .

Ако d се измерва в километри (km), а f във мегахерци (MHz), то (2.2) ще добие следния вид:

$$FSPL_{dB} = 20\lg(d) + 20\lg(f) + 32,44 \quad (2.3)$$

Ако използваме параметъра FM (Fade Margin – допустима граница на затихването), то FSPL ще добие следния вид:

$$FSPL = P_{TX} - CL_{TX} + AG_{TX} + AG_{RX} - CL_{RX} - S_{RX} - FM \quad (2.4)$$

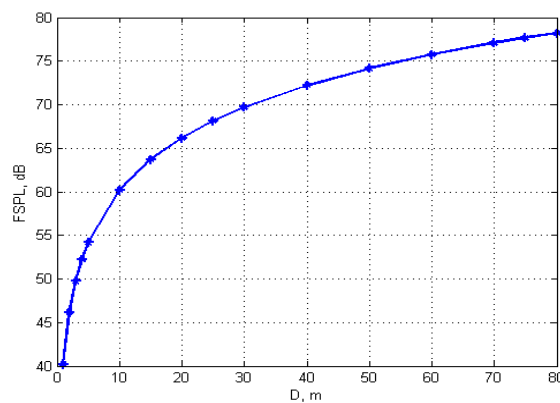
където: P_{TX} – ниво по мощност на предавателя; CL_{TX} – (Cable Loss) – затихване по кабелите, свързващи предавателя с предавателната антена; AG_{TX} – (Antenna Gain) –

коэффициент на предаване на предавателната антена; AG_{RX} – коефициент на предаване на приемната антена; CL_{RX} –затихване по кабелите, свързващи приемната антена с приемника; S_{RX} – (Sensitivity) – чувствителност на приемника; FM – (Fade Margin) – допустима граница на затихването.

Изхождайки от (2.2) може да изведе израз за определяне на разстоянието в km:

$$d_{km} = 10^{\frac{FSPL_{dB} - 20 \lg(f) - 32,44}{20}} \quad (2.5)$$

Приемайки, че максималната дължина на обекта е 80m, то за честота $f = 2,4737\text{GHz}$ (6-ти канал) на базата на (2.3) ще може да се изведе в теоретичен вид кривата на зависимостта на загубите в свободното пространство (FSPL) от разстоянието (d), което е показано на фиг. 2.13.



Фиг. 2.13. Зависимост на загубите в свободното пространство (FSPL) от разстоянието (D) за зоната на покритие

2.5.2. Изчисляване на енергийния бюджет на линията

Енергийният бюджет на линията често се нарича Fade Margin (FM) – допустима граница на затихването или System Operating Margin (SOM) – системи граници на работа. Изразът за определяне на FM е:

$$FM = Signal_{RX} - S_{RX} \quad (2.6)$$

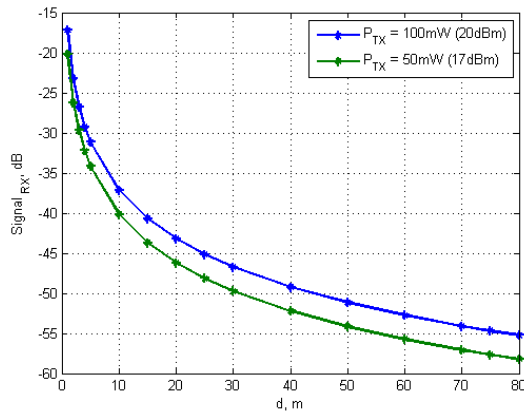
където:

$$Signal_{RX} = P_{TX} - CL_{TX} + AG_{TX} - FSPL + AG_{RX} - CL_{RX} \quad (2.7)$$

а $Signal_{RX}$ е ниво по мощност на приетия сигнал.

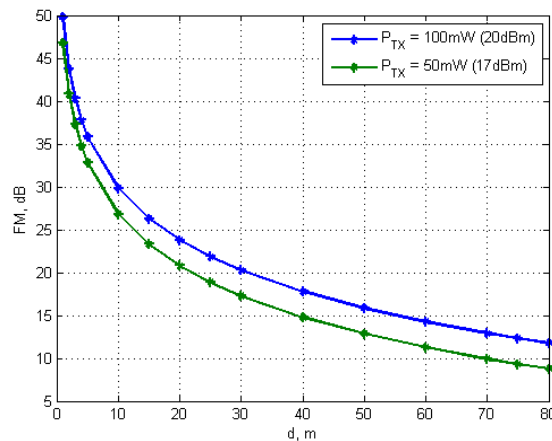
На базата на аналитичен израз (2.6), на фиг. 2.14 е изведена зависимостта на нивото по мощност на приетия сигнал ($Signal_{RX}$) във функция от промяната на разстоянието при следните допускания:

- Две различни стойности на мощността на предавателя: 100mW (20dBm) и 50mW (17dBm);
- Коефициент на предаване на предавателната антена 5dBm;
- Не се използват кабели за свързване между антените и предавателя и приемника;
- Пренебрегва се коефициентът на предаване на приеманата антена;
- Чувствителност на приемника -67dBm .



Фиг. 2.14. Зависимост на нивото по мощност на приетия сигнал ($Signal_{RX}$) във функция от промяната на разстоянието (d)

На базата на същите допускания и използвайки израз (2.6), на фиг. 2.15 е представена зависимостта на Fade Margin (FM) във функция от промяната на разстоянието (d).



Фиг. 2.15. Зависимост на Fade Margin (FM) във функция от промяната на разстоянието (d)

Както се вижда от фиг. 2.15 затихването на сигнала е над минимално допустимите -67dBm за осъществяване на надеждна безжична връзка. Фиг. 2.15 показва, че добра стойност на $FM > 20\text{dB}$ се получава за разстояния между предавателя и приемника по малки от 25m .

2.5.3. Оценка на параметрите на антената

За да се определи коефициента на предаване на предавателната антена AG_{TX} (при допускане, че е налична информация за коефициента на предаване на приемната антена AG_{RX}):

$$AG_{TX} = FM - P_{TX} + CL_{TX} + CL_{RX} + S_{RX} + 32,44 + 20\lg(f) + 20\lg(d) - AG_{RX} \quad (2.8)$$

За да се определи коефициента на предаване на приемната антена AG_{RX} (при допускане, че е налична информация за коефициента на предаване на предавателната антена AG_{TX}):

$$AG_{RX} = FM - P_{TX} + CL_{TX} + CL_{RX} + S_{RX} + 32,44 + 20\lg(f) + 20\lg(d) - AG_{TX} \quad (2.9)$$

2.6. Изводи към втора глава

В тази глава е представено аналитично моделиране на MIMO системния модел, модели на MIMO каналът за оценка, моделиране на влиянието на приемо-предавателните антени върху ефективността на MIMO канала и моделиране на загубите в свободното пространство:

- 1) Реализиран е анализ на MIMO системен модел с аналитично описание на разпределението на полето. Моделът позволява да се извърши оценка на относителните вариации в силата на приемания сигнал чрез използване на аналитични изрази и чрез компютърни симулации.
- 2) Най-непосредственият начин да се анализира безжичният MIMO канал е аналитично да се оцени $N_R \times N_T$ матрицата H на канала. Тази оценка включват ефектите на RF подсистемите и антените и следователно резултатите зависят от използваните конфигурации на масива.
- 3) Времето на вариация на канала е важно, тъй като това показва честотата, с която трябва да се извърши оценка на канала, за да се поддържа надеждна комуникация.
- 4) Между емпиричните и аналитично получените функции на плътността на вероятностите за амплитудата и фазата на MIMO система с 4×4 матрични H елемента е постигната висока степен на съвпадение.
- 5) От графичните зависимости на фиг. 2.6 се вижда, че при увеличаване на размера на масива от MIMO антени, аналитично определения капацитет на антените нараства, докато емпирично определения капацитет на антената намалява поради по-голямата корелация между съседните h елементи в масива.
- 6) От фиг. 2.9 се вижда, че от статистическа гледна точка SVA моделът може точно да представи физическите канали на разпространение в MIMO система, тъй като той отчита всички механизми, които допринасят за капацитета на MIMO канала.

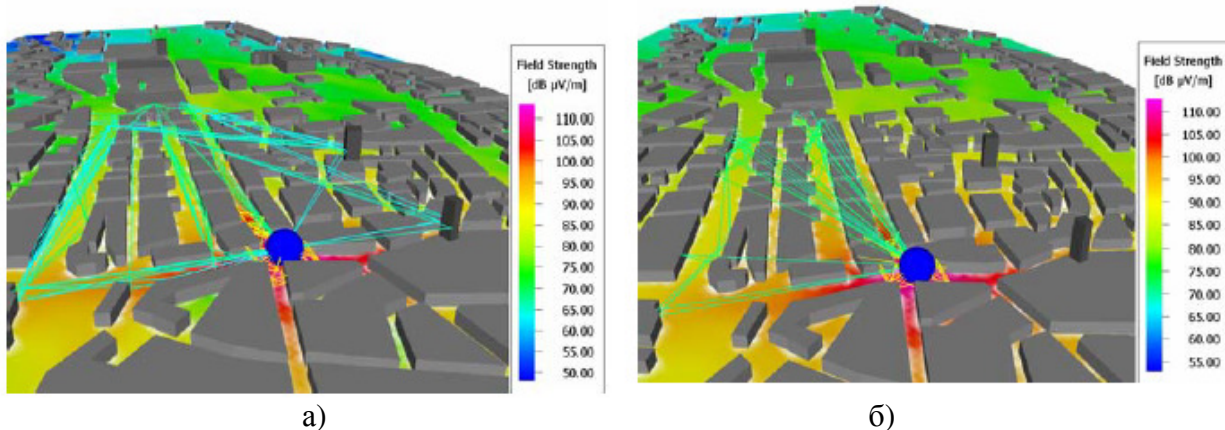
ГЛАВА 3. Симуляционно моделиране и изследване на ефективността на MIMO канали за връзка в безжичните комуникации

3.1. Симуляционно моделиране за определяне на капацитета на MIMO канал за връзка

3.1.1. Симуляционно моделиране на разпространението на радиовълните в MIMO канали

Използван е инструментът WinProp за планиране на радиомрежата, който включва лъчево-оптични модели на разпространение на вълни, които обработват 3D векторни данни на сгради, за да определят мобилния радиоканал в различни среди (извънградски, градски и на закрито).

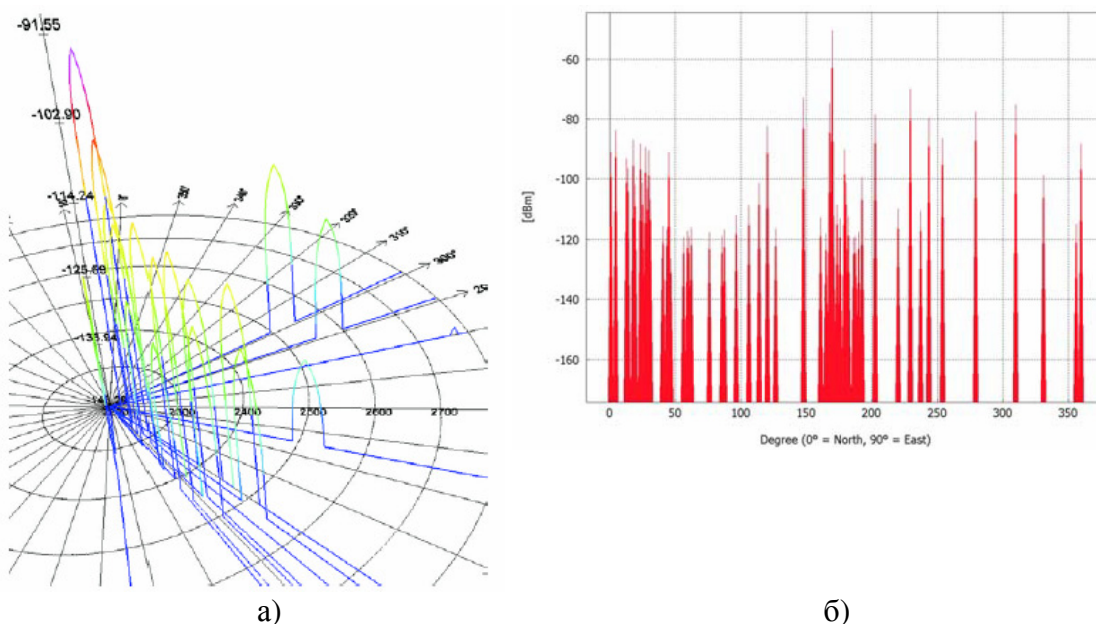
Моделите на лъчево-оптично разпространение осигуряват точна, специфична за сайта и лесно възпроизводима информация и се справят с ефекти като засенчване зад стени, вълноводни ефекти в уличните каньони (фиг. 3.2), предлагат отлична точност и са в състояние да осигурят допълнителни параметри, като затихване с малък мащаб, настройка на ъглите на излъчване (AoD - angle of departure), както и ъглите на попадане (AoA - angles of arrival), които са от значение за анализа на MIMO канала.



Фиг. 3.2. Моделиране на разпространението на радиосигнала чрез проследяване на лъчите: а) под нивото на покривите, б) над нивото на покривите

За антените на базовите станция, монтирани под покрива, се появяват вълноводни ефекти в градските улични каньони, които могат да намалят ъгловото разпръскване на приемните мобилни станции и следователно капацитета на MIMO канала.

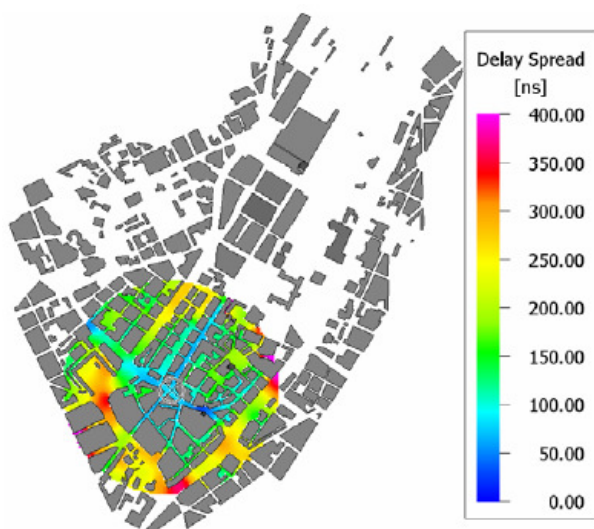
В среди с много разсейвания се появява значително разпространение на сигнала по множество пътища, които могат да бъдат показани от WinProp във времевата и в пространствената област (фиг. 3.3).



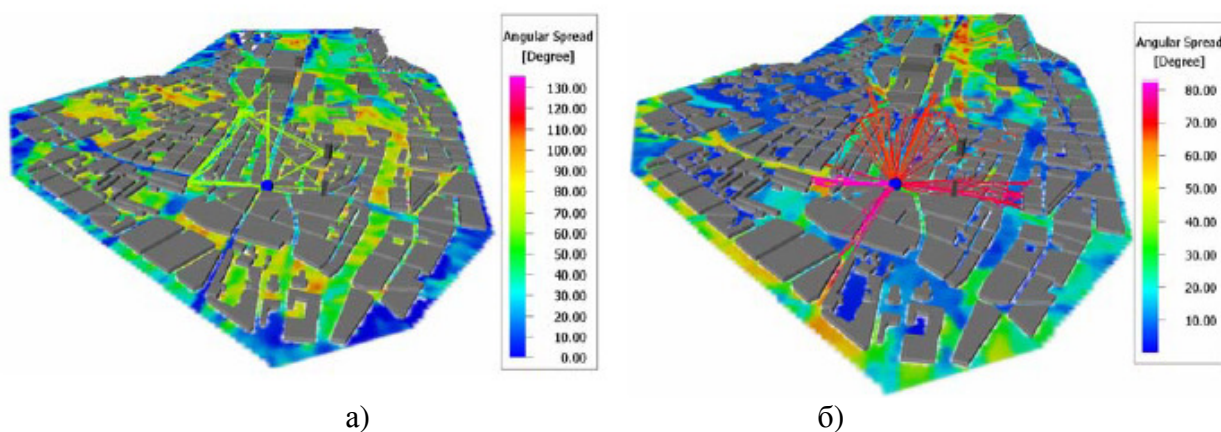
Фиг. 3.3. Импулсна характеристика на канала: а) пространствена ИХ, б) 2D ИХ на канала

Проследяването на лъчи в WinProp позволява да се изчисли закъснението и ъгловото разпределение, въз основа на наличните лъчеви данни, за да се получи цялата информация за канала, необходима за пълното описание на MIMO каналите (фиг. 3.4 и фиг. 3.5).

Разпространението на сигнала във времеви домейн се визуализира чрез закъснението при разпространение. Този параметър е важен за преценка за наличието на междусимволна интерференция.



Фиг. 3.4. Закъснение при разпространението на сигнала



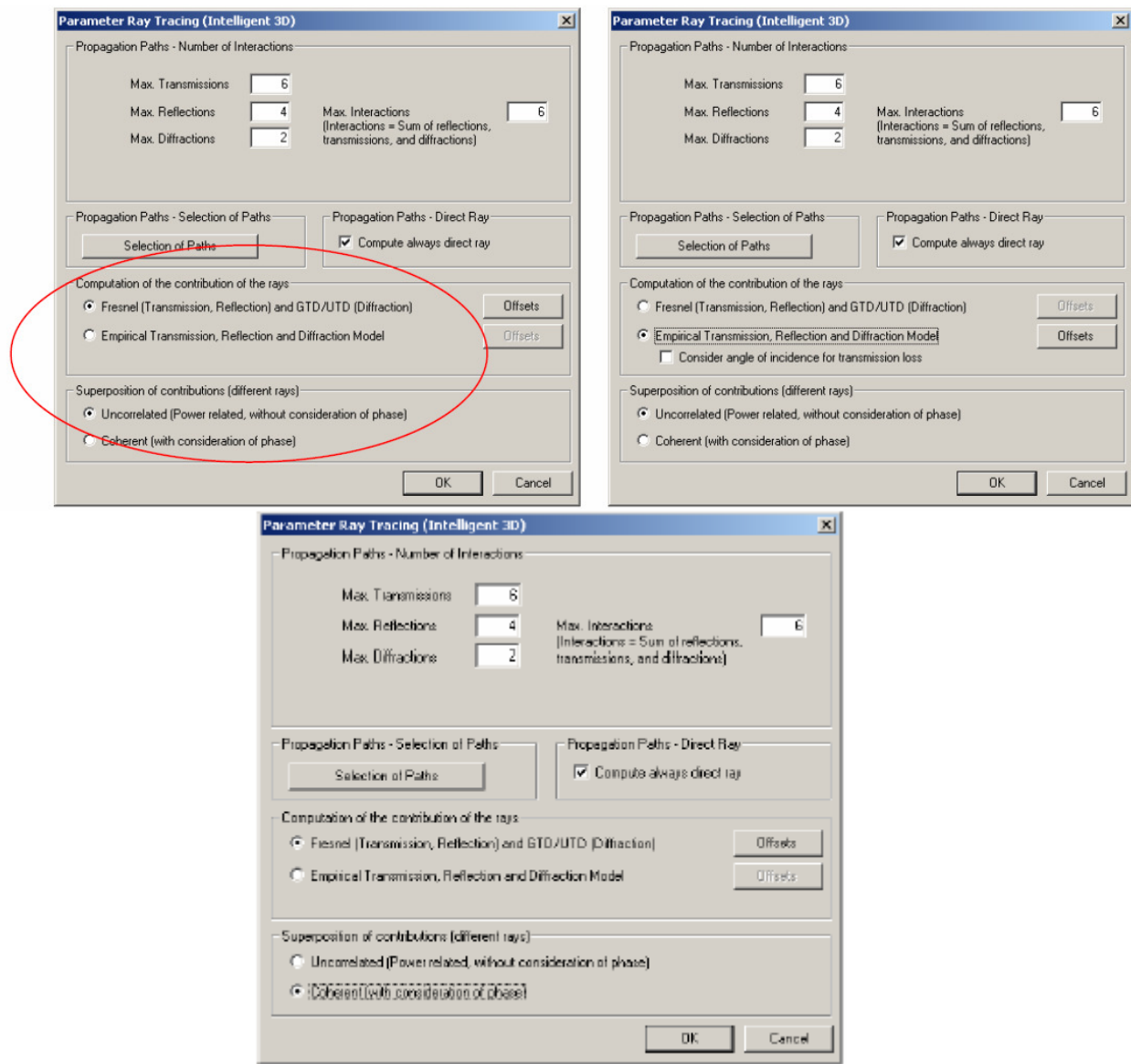
Фиг. 3.5. Ъглово разпределение при разпространение на сигнала при а) мобилната станция, б) базовата станция

Както вече бе споменато, капацитетът на MIMO канала нараства линейно с двойките антени, стига в околната среда да има голямо количество разпръснати сигнали. Това означава, че големите капацитети на канала могат да бъдат получени в райони с голямо многолъчево разпространение на сигнала. Многолъчевото разпространение може да бъде изразено като ъглово разпръскване в предавателния масив, както и в приемащата MIMO антенна решетка.

WinProp е в състояние да покаже тези индикатори за области със силно многолъчево разпространение в 2D и 3D карти, както и в таблични ASCII файлове, което предлага възможност за по-нататъшна обработка на данните с други софтуерни инструменти. Ъгловото разпространение според очевидно се различава за всеки отделен пиксел от планираното покритие, тъй като има различни пътища за предаване за всяка конфигурация на предавателя и приемника. Следователно, тези стойности също са дадени под формата на карта за цялата зона на симулация.

3.1.2. Оценка на влиянието и суперпозицията на радиолъчите

Съществуват различни изчислителни режими за оценка на влиянието и суперпозицията на отделните лъчи, определени с алгоритъма за проследяване на лъча. Тези режими могат да бъдат зададени на страницата за изчисления на менюто с настройки в ProMan – фиг. 3.6.



Фиг. 3.6. Параметри за настройка при симулационно моделиране чрез проследяване на лъчите

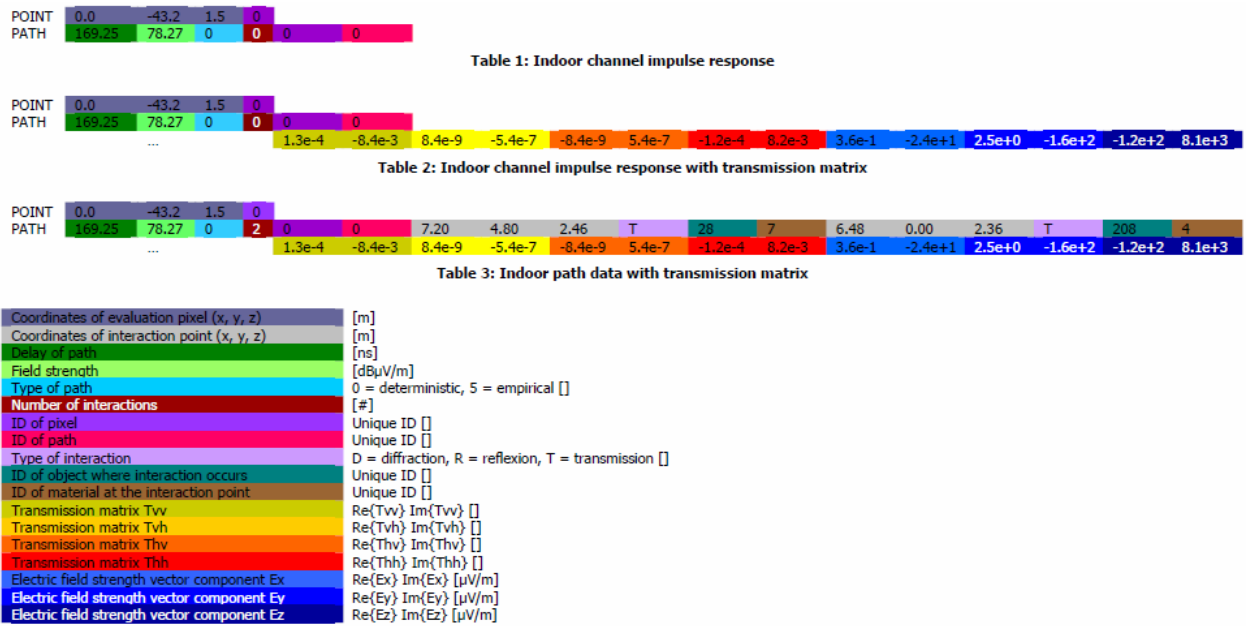
3.1.3. Обработка на информацията от отделните радиолъчи

За целите на последващата обработка, инструментът за разпространение на WinProp ProMan предлага възможността да се запишат данните, съответстващи на изчислените пътища на разпространение, в ASCII (*.str) или двоичен (*.ray) файл.

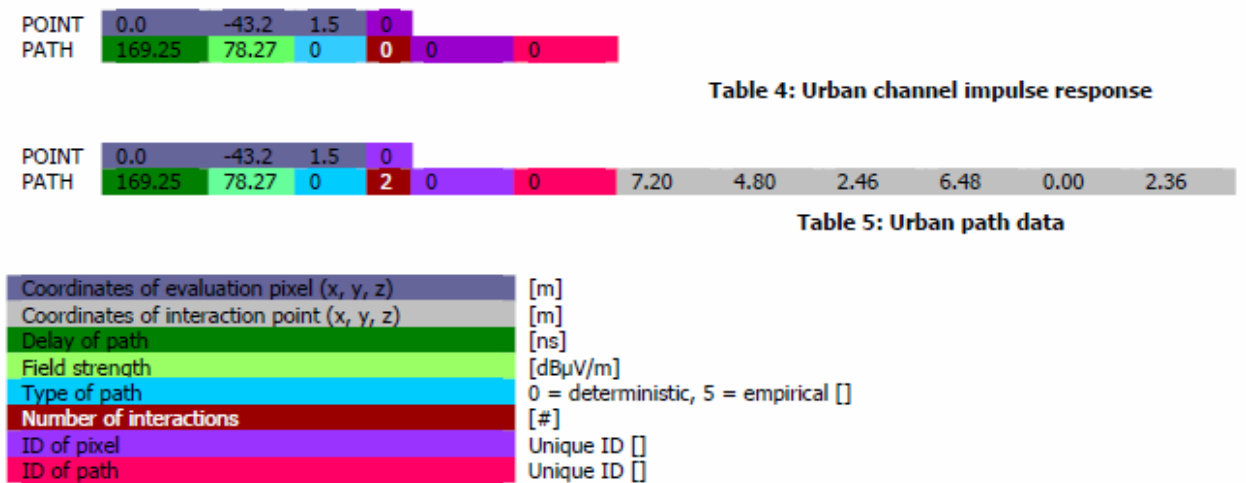
Файлт ASCII.ray, генериран от ProMan, съдържа заглавна част с обща информация за оценявания сценарий, като разделителната способност на зоната за планиране и зададените параметри на предавателя. След заглавния раздел започва секцията с данните за лъча за всяка планирана точка. Координатите на планираните точки са обозначени с ключовата дума POINT. Следват данните за лъчите, принадлежащи на тази точка, последвани от ключовата дума PATH за всеки наличен път на разпространение.

Съдържанието на ASCII.ray файлът, съдържащ резултатите от проведеното примерно изследване чрез използване на метода с проследяване на лъчите за сценарий на закрито, е показан на фиг. 3.9. Файлт, съдържащ резултатите от проведеното

примерно изследване чрез използване на метода с проследяване на лъчите за сценарий на открито в градска среда, е показан съответно на фиг. 3.10.



Фиг. 3.9. Резултати от проведено симулационно изследване чрез използване на метода с проследяване на лъчите за сценарий на закрито



Фиг. 3.10. Резултати от проведено симулационно изследване чрез използване на метода с проследяване на лъчите за сценарий на открито в градска среда

3.1.4. Дефиниране на допълнителни специфични за MIMO канала параметри

Съществува сложна импулсна реакция на канал с единичен вход -единичен изход (SISO) с дължина $L + 1$ между всяка предавателна антена m и всяка приемна антена n на MIMO системата:

$$h_{n,m} = [h_{n,m}(0), \dots, h_{n,m}(L)] \quad (3.8)$$

Приемайки същия канален ред L за всички канали, честотно-селективният MIMO канал може да бъде описан с $L + 1$ комплексни матрици $H(k)$, $k = 0, \dots, L$ с размер $N_R \times N_T$:

$$H(k) = \begin{pmatrix} h_{1,1}(k) & \dots & h_{1,N_T}(k) \\ \dots & \dots & \dots \\ h_{N_R,1}(k) & \dots & h_{N_R,N_T}(k) \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

$$h_{n,m}(k) = \text{Re}\{h_{n,m}(k)\} + j \text{Im}\{h_{n,m}(k)\} \quad (3.10)$$

Матрицата на MIMO канала се определя чрез предварителна обработка на резултатите от симулацията с лъчевия модел на ProMan WinProp инструмента за планиране чрез просто изчисляване на фазовите разлики между единичните антенни елементи на MIMO антенните решетки в базовата станция и в мобилната станция.

3.1.5. Определяне на капацитета на MIMO канала

Капацитетът на канала на честотен не-селективен MIMO канал може да бъде записан като

$$C = \log_2 \left(\det \left[I_{N_R} + \frac{P}{N_T \cdot \sigma_n^2} \cdot H(0) \cdot H(0)^H \right] \right) [\text{bit/s/Hz}], \quad (3.13)$$

с матрица на съответствието I , обща предадена мощност P и шумова мощност σ_n^2 .

За честотно-селективни MIMO канали, капацитетът на канала може да бъде получен чрез интегриране по честотно не-селективните подканални. За дискретен случай, матриците на каналите трябва да бъдат определени чрез N_F точково FFT. Средното съотношение сигнал/шум (SNR) може да се изрази чрез $\rho = P/\sigma_n^2$. Резултатният капацитет на MIMO канала за честотно селективен случай може да бъде записан, както следва:

$$C = \frac{1}{N_F} \sum_{l=0}^{N_F-1} \log_2 \left(\det \left[I_{N_R} + \frac{\rho}{N_T} \cdot H_F(l) \cdot H_F(l)^H \right] \right) [\text{bit/s/Hz}] \quad (3.14)$$

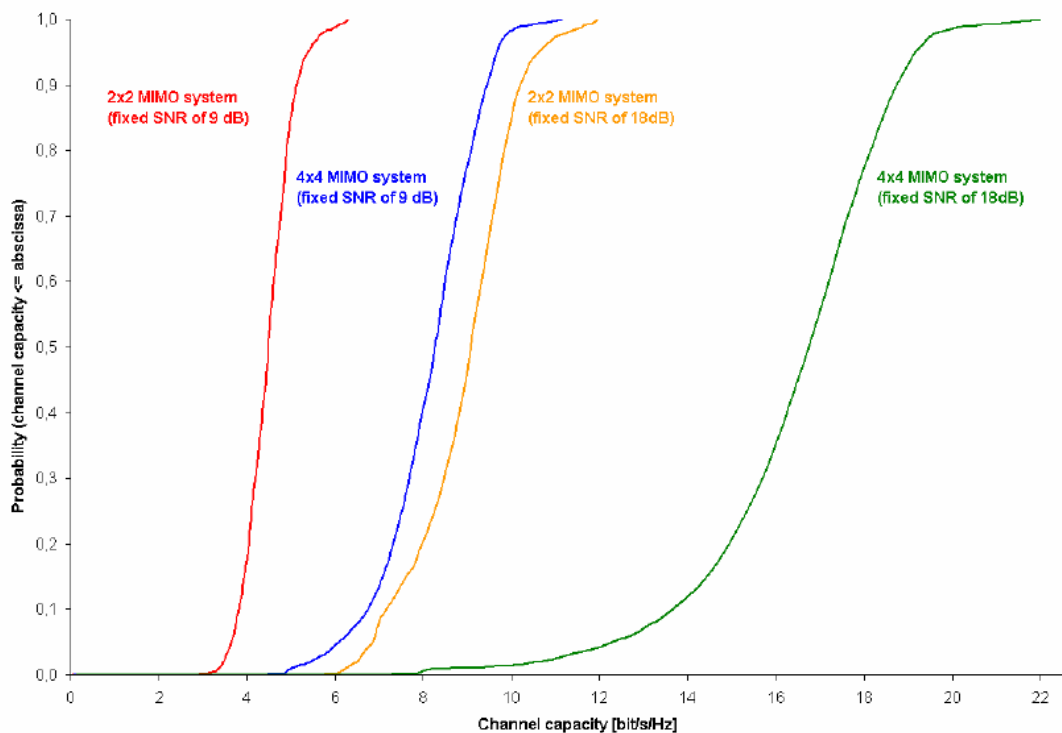
За сравнение на различни MIMO канали, базирани на едно и също SNR, системата трябва да се нормализира, за да изпълни следното условие:

$$\sum_{m=1}^{N_T} \sum_{n=1}^{N_R} \sum_{l=0}^{N_F-1} |H_{n,m}(l)|^2 = N_T \cdot N_R \cdot N_F \quad (3.15)$$

Ако трябва да се сравнят различни MIMO канали въз основа на една и съща стойност на загубите от разпространение, системата трябва да се нормализира, за да изпълни следното условие:

$$\sum_{i=1}^{N_M} \sum_{m=1}^{N_T} \sum_{n=1}^{N_R} \sum_{l=0}^{N_F-1} |H_{n,m}(l,i)|^2 = N_M \cdot N_T \cdot N_R \cdot N_F \quad (3.16)$$

Може да се покаже, че капацитетът на MIMO канала нараства с увеличаването на двойките антени и съотношението сигнал/шум.



Фиг. 3.13. Сравнителен анализ на капацитета на MIMO канал при различен формат на антенните решетки

3.2. Симуляционно моделиране и изследване на ефективността на MIMO канал за връзка в Wi-Fi мрежа на закрито

Разглежда се симуляционно моделиране и изследване на ефективността на MIMO канал за връзка в безжична комуникационна мрежа по стандарт IEEE 802.11n. Симуляционното изследване е реализирано за обект – етаж 2 на учебен корпус №2 „Баждар“ на ТУ – Габрово. Симуляционното моделиране се извършва чрез използване на методът за проследяване на лъчите поради ефективността на моделиране

За целите на изследването тук ще се използват 2 различни модела, базирани на проследяването на лъча:

- Първият модел за проследяване на лъчи е директно приложение на проследяването на лъчи в моделирането на MIMO канал.
- Вторият модел е основан на вероятностния принцип.

3.2.1. Детерминистичен и статистически модел при изследване на MIMO канал в среда на закрито

- Детерминистичен модел

Предавателят е оборудван с t -елементна антенна решетка, а приемникът е

оборудван r -елементна антенна решетка. MIMO каналът може да се дефинира под

формата на матрица, както следва:

$$CH = \begin{bmatrix} CH_{1,1} & \dots & CH_{1,r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ CH_{t,1} & \dots & CH_{t,r} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Елементите на матрицата $CH_{m,n}$ характеризират каналът между елемента n в предавателната антена и елемента m в приемната антена.

Допуска се, че ММО каналът е теснолентов. В съответствие с многолъчевото разпространение на сигнала, матрицата на теснолентовия ММО канал може да се запише както следва:

$$CH_{m,n} = (x, y, z, \omega) = \sum_{\alpha=1}^q G_{\alpha}(x, y, z) e^{-j\omega_0 \tau_{\alpha}(x, y, z)} \quad (3.18)$$

където G_{α} е амплитудата на α -тия лъч, q е общият брой лъчи, τ е

времезакъснението, τ_{α} е времезакъснението на α -тия лъч, а ω_0 е носещата честота.

- **Статистически модел**

В този случай елементът от матрицата на ММО канала от (3.17) се моделира като случайна стойност с Рициево разпределение:

$$CH_{m,n} \approx Rice(\nu, \sigma) \quad (3.19)$$

където ν и σ са параметри за определяне на Рициевото разпределение.

К-коэффициентът K може да бъде оценен като:

$$K = \frac{\sqrt{1-g}}{1-\sqrt{1-g}} \quad (3.20)$$

Променливата g в (3.20) се дава с $g = V[G^2]/(E[G^2])^2$, където $V[G^2]$ е вариацията на G^2 (G е амплитудата на полето от лъчи), а $E[G^2]$ е планираната стойност на G^2 .

След като се получи стойността на коефициента K , параметрите на Рициевото

разпределение ν и σ може лесно да се изчислят:

$$v^2 = \frac{K \cdot \Omega}{1 + K} \quad (3.21)$$

$$\sigma^2 = \frac{\Omega}{2(1 + K)} \quad (3.22)$$

където $\Omega = E[G^2]$.

По този начин се получават едновременно и двата параметъра v и σ .

Най-накрая може да се замести в (3.17) за да се определи матрицата на MIMO канала:

$$CH = \begin{bmatrix} CH_{1,1} \sim \text{Rice}(v_{1,1}\sigma_{1,1}^2) & \dots & CH_{1,r} \sim \text{Rice}(v_{1,r}\sigma_{1,r}^2) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ CH_{t,1} \sim \text{Rice}(v_{t,1}\sigma_{t,1}^2) & \dots & CH_{t,r} \sim \text{Rice}(v_{t,r}\sigma_{t,r}^2) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

(3.23) може да бъде допълнително опростен чрез използване на v и σ параметрите,

изчислени чрез използване на лъчите между предавателя и центъра на решетката на приемника.

3.2.2. Резултати от симулационното изследване с детерминистичен и статистически модел на MIMO канал в среда на закрито

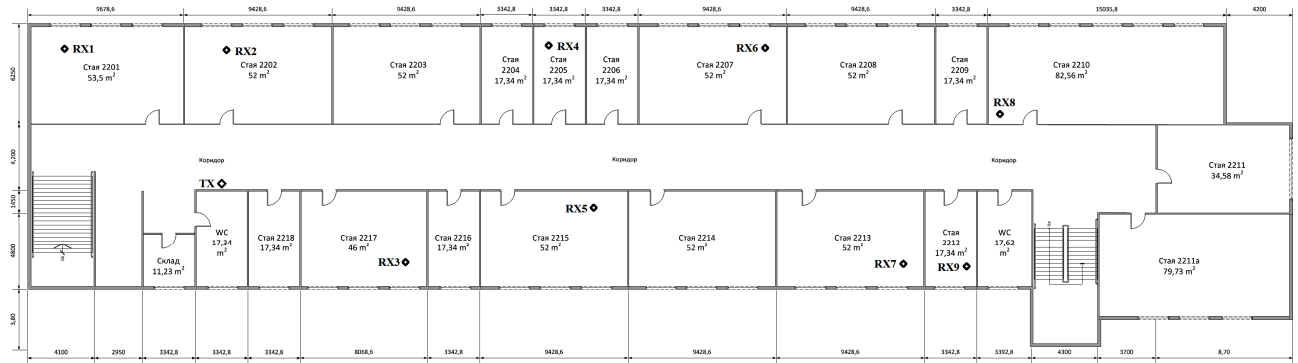
Ще бъдат представени резултати от симулацията с измервания в сценарий на закрито с 2×2 MIMO система в съответствие със системния модел показан на фиг. 2.1.

Нека Q е потокът от символи на входния вектор, N_T – е броят на елементите в решетката на предавателната антена, N_R – е броят на елементите в решетката на приемната антена и H – матричен елемент, който характеризира канала между предавателя и приемника.

MIMO каналът за връзката в права посока и в обратна нагоре се симулира и измерва в условията на среда на закрито. На фиг. 3.16 е показана карта на изследвания обект (етаж 2 на учебен корпус №2 „Баждар“ на ТУ – Габрово) и точките за изследване при сценарий за връзка в права и обратна посока и нагоре.

Използва се сценарий на радиопокрытие за безжична мрежа. Предавателят е оборудван с антена с два елемента (Ubiquiti Nanostation NSM 2 в конфигурация 2×2 MIMO и максимално ниво на усилване 11.2 dBi, комбинирано с конфигурирано устройство MikroTik hAP RB962UiGS. Честотата на измерване на канала е 2,4 GHz. Мощността на предавателя е 100mW.

Симулацията и измерването в правия и обратния MIMO канал са извършени при разполагане на предавателя на фиксирано място TX и използване на приемник, разположен на няколко различни места - от RX 1 до RX 9 (фиг. 3.16).



Фиг. 3.16. Архитектурен план на обекта на изследване в среда на закрито с локацията на TX и RX точките

Симулацията на канала се основава на моделите за проследяване на лъчи, разработени в средата на Matlab. Моделите включват информация за конструкциите и материалите на околната среда, които се внасят през архитектурния план на сградата (стени, врати, прозорци и др.).

Получената мощност в дадена точка може да се изчисли като:

$$P(x, y, z) = \left| \sum_{\alpha=1}^q G_{\alpha}(x, y, z) e^{-j\omega_0 \tau_{\alpha}(x, y, z)} \right|^2 \quad (3.24)$$

Използвайки симулиран канал $H'_{m,n}$ и канал с въдени резултати от практически измервани $H_{m,n}$, може се изчисли средно квадратичната грешка на симулационния модел:

$$RMS_{Error\ i,j} = \frac{1}{rt} \sum_{m,n=1}^{m=r,n=t} \sqrt{H_{m,n}^2 - H'(i, j)_{m,n}^2} \quad (3.25)$$

Получените от симулацията резултати и въведените експериментални резултати са обобщени в таблици 3.1 и 3.2 и на фиг. 3.17.

Фиг. 3.17а) по казва сравнение между средната стойност на приетата мощност при симулацията и реалния експеримент при изследване на канала в права посока. Фиг. 3.17б) показва същото сравнение, но при изследване на канала в обратна посока. От фиг. 3.17 може да се види доброто съвпадение между резултатите.

Резултатите в таблица 3.1 и 3.2 показват, че средно квадратичната грешка (RMS) от симулационното изследване и експерименталните данни е сравнително малка. Това означава, че точността на двата разгледани модела (детерминистичен и статистически) на MIMO канал при малък брой на каналите е относително достатъчна при планиране на безжично радиопокрытие и за целите на неговата оптимизация

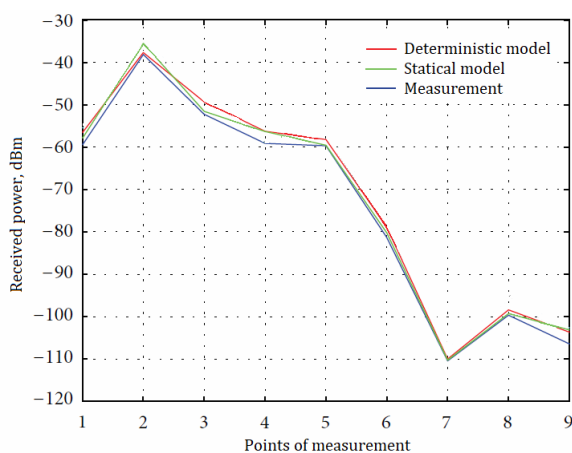
Таблица 3.1. Приета мощност на сигнала средно-квадратична грешка (RMS) при предаване по канала в права посока

		Контролни точки:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ниво на приетия сигнал dBm	Детерминистичен модел		-56	-37,5	-49,5	-56,5	-57,5	-78,5	-109,5	-98	-102,5
	Статистически модел		-58	-35	-51,5	-56,5	-59,5	-80	-110	-99	-103
	Измерване		-59	-38	-52,5	-58,5	-59,5	-81,5	-110,5	-99,5	-106,5

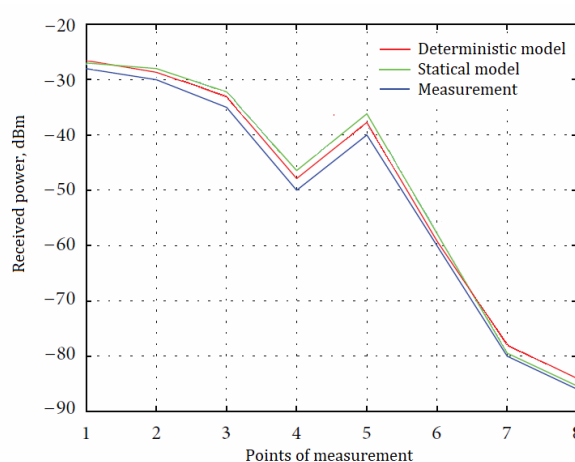
RMS грешка, dB	Детерминистичен модел	2,68	2,17	2,52	2,68	2,70	3,16	3,71	3,51	3,61
	Статистически модел	2,70	2,14	2,55	2,68	2,73	3,18	3,71	3,52	3,62

Таблица 3.2. Приета мощност на сигнала средно-квадратична грешка (RMS) при предаване по канала в обратна посока

Контролни точки::		1	2	3	4	5	6	7	8
Ниво на приетия сигнал dBm	Детерминистичен модел	-26	-28	-33,5	-47,5	-37,5	-58,5	-77,5	-84
	Статистически модел	-26,5	-27	-32,5	-45,5	-35,5	-57,5	-79	-86
	Измерване	-28	-30	-35	-50	-40	-60	-80	-86,5
RMS грешка, dB	Детерминистичен модел	1,84	1,90	2,07	2,47	2,20	2,72	3,14	3,26
	Статистически модел	1,85	1,89	2,05	2,44	2,17	2,71	3,15	3,28



а)



б)

Фиг. 3.17. Средно ниво на приетата мощност за точките на измерване в а) правия канал и б) обратния канал

3.3. Симуляционно планиране и изследване на качеството и ефективността на радиопокритието в среда на закрито за безжично мрежа по стандарт IEEE 802.11n и MIMO канали

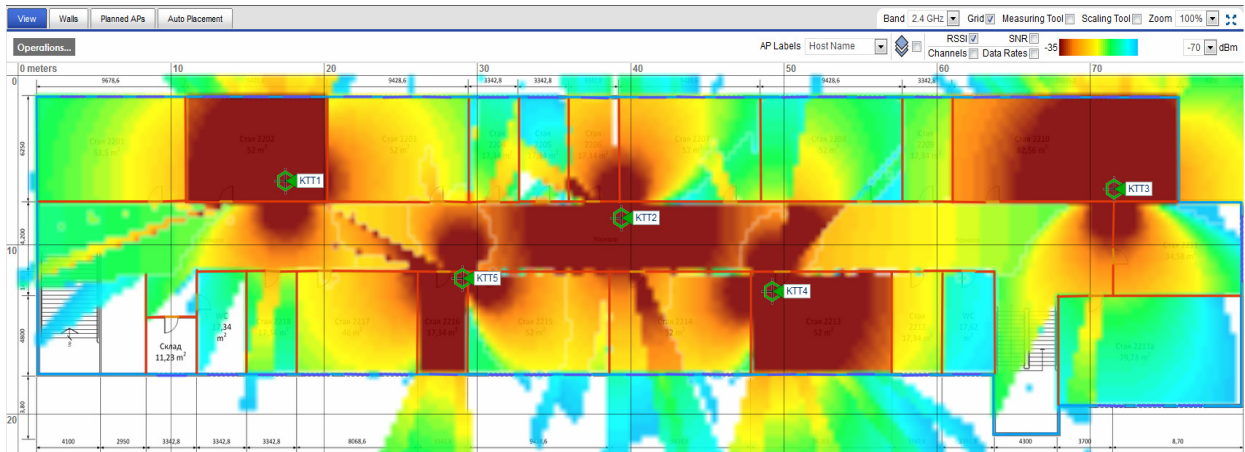
Планирането на безжичното покритие по стандарт IEEE 802.11n с използване на 2x2 MIMO канали за връзка се реализира за 2-ри етаж на Учебен корпус 2 ("Баждар") на ТУ-Габрово. Архитектурният план е аналогичен на показания на фиг. 3.16. Общата площ в представения архитектурен план е приблизително 1360 m².

Симуляционното планиране на радиопокритието ще бъде реализирано чрез продукта Aerohive Free Wi-Fi Planning Tool – това е модул за планиране на безжично покритие по стандарт IEEE 802.11, част от софтуерния пакет AeroHive Networks.

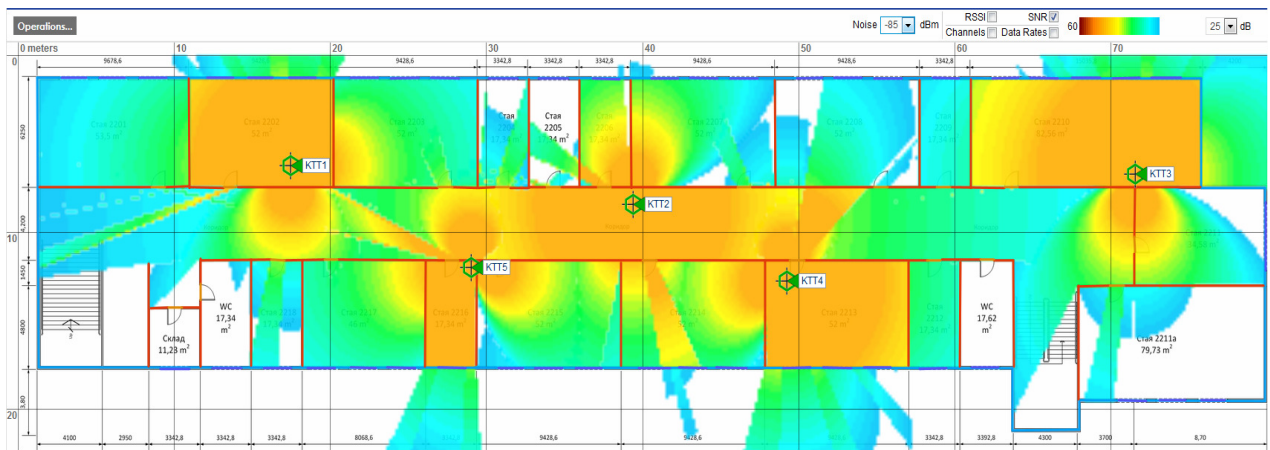
Стъпките на планиране включват следното:

- Съставяне на архитектурен план;
- Съставяне на план на обекта, съдържащ информация за материалите на стените и пространствата;
- Стартиране на съветника за избор и разполагане на MIMO безжичните точки за достъп;

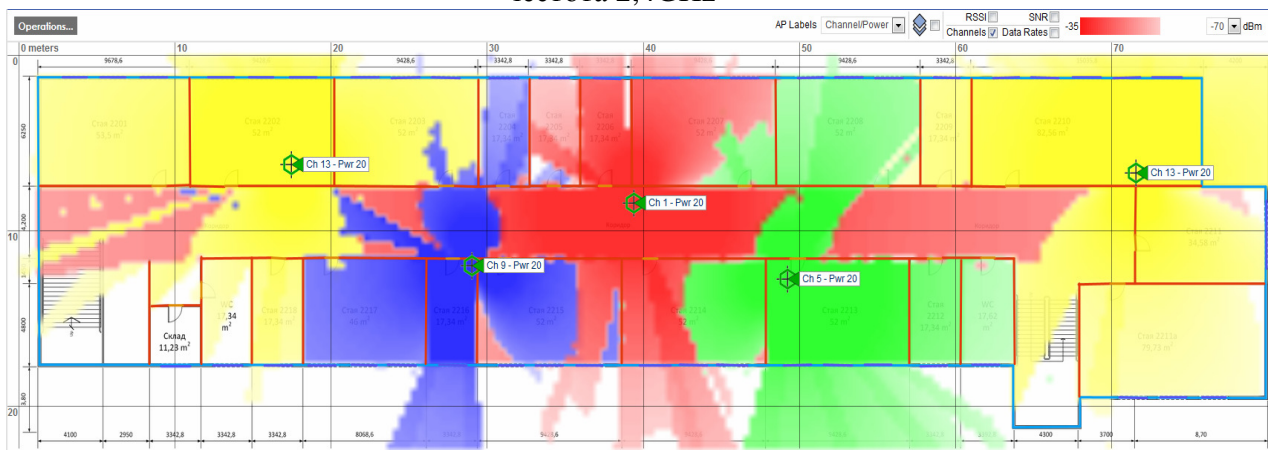
– Анализ и оптимизация на безжичното покритие.
Резултатите от оптимизацията на покритието са дадени на фиг. 3.22 до фиг. 3.23.



Фиг. 3.22. Оптимизация на планираното покритие чрез използване на пет точки за достъп РТХ = 100mW и честота 2,4GHz



Фиг. 3.23. Съотношение сигнал/шум (SNR) в зоната на планираното покритие при честота 2,4GHz



Фиг. 3.24. Работни канали на 5-те точки за достъп (КТТ1 до КТТ5) в зоната на планираното покритие при честота 2,4GHz

Както се вижда от фиг. 3.22, планираното покритие отговаря на поставените изисквания, като единствените зони, в които покритието е с по-ниско ниво са

стълбищата и тоалетните помещения, в които по изискване не е необходимо да се осигури покритие.

На фиг. 3.23 е представено измереното съотношение сигнал/шум (SNR) на 5-те работещи точки за достъп като то варира между 60dB (кафяв цвят) и 25dB в син цвят, а на фиг. 3.24 – различните работни канали на 5-те точки за достъп.

3.4. Симуляционно планиране и изследване на качеството и ефективността на радиопокритието в среда на открито за безжично мрежа по стандарт IEEE 802.11n с MIMO канали

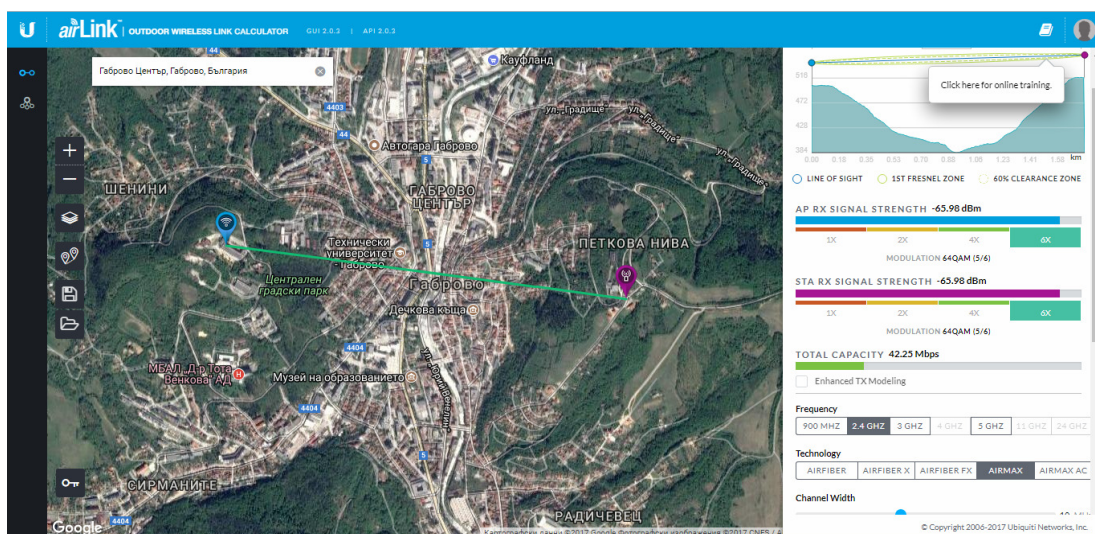
Примерното софтуерно планиране на безжичното покритие по стандарт IEEE 802.11n с използване на 2 x 2 MIMO система се реализира за кв. Петкова нива на територията на гр. Габрово.

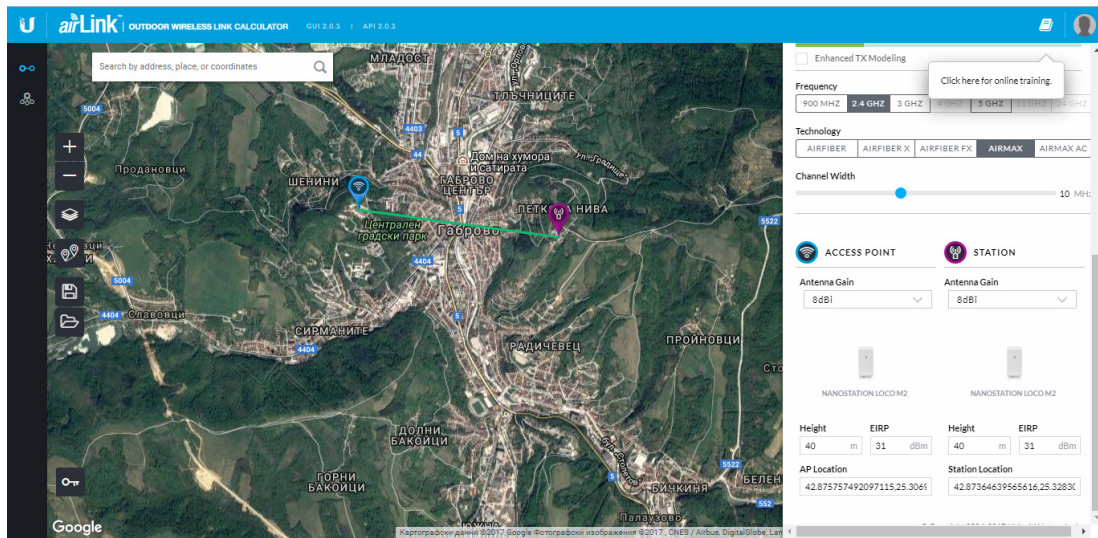
Точката за достъп (Access Point – AP) с 2 x 2 MIMO система е планирано да бъде разположена в лаб. 1403 на 4-ти етаж на УК №1 „Интеграла“ на ТУ-Габрово. Надморската височина в тази част на града е 538 m като УК №1 е разположен на около 100 m над широката градска част на гр. Габрово (за зоната на ЦАГ-Габрово надморската височина е 438 m). Основната част от зоната на кв. Петкова нива, за която по задание е планирано да се изгради радиопокритие е разположена във височина (519 m) срещуположна на местоположението на УК №1 „Интеграла“ на ТУ-Габрово, което предполага много добра пряка видимост към точката за достъп (нано станцията).

Стъпките на планиране включват следното:

- Описание на спецификата на релефа за обекта за планиране на радиопокритието;
- Симуляционно планиране на покритието чрез използването на AirLink Outdoor Wireless Link Calculator;
- Тестване на варианти за анализ и оптимизация на симуляционно планираното безжичното радиочестотно покритие в среда на открито.

Използвайки функционалните възможности на AirLink Outdoor Wireless Link Calculator на фиг. 3.33 е показан общият вид на създаден примерен проект за радиовръзка от типа „от точка до точка“ за територията на гр. Габрово и в частност за радиовръзка между точка за достъп в УК №1 „Интеграла“ на ТУ - Габрово и приемна точка до Национална астрономическа обсерватория и планетариум – гр. Габрово, която се намира в кв. Петкова нива. Фигурата е разделена на две части поради голямата дължината на работното поле в дясно за въвеждане и извеждане на параметри.





Фиг. 3.33. Софтуерно планиране на радиовръзка „от точка до точка“ УК №1 „Интеграла“ на ТУ - Габрово – Национална астрономическа обсерватория и планетариум, гр. Габрово

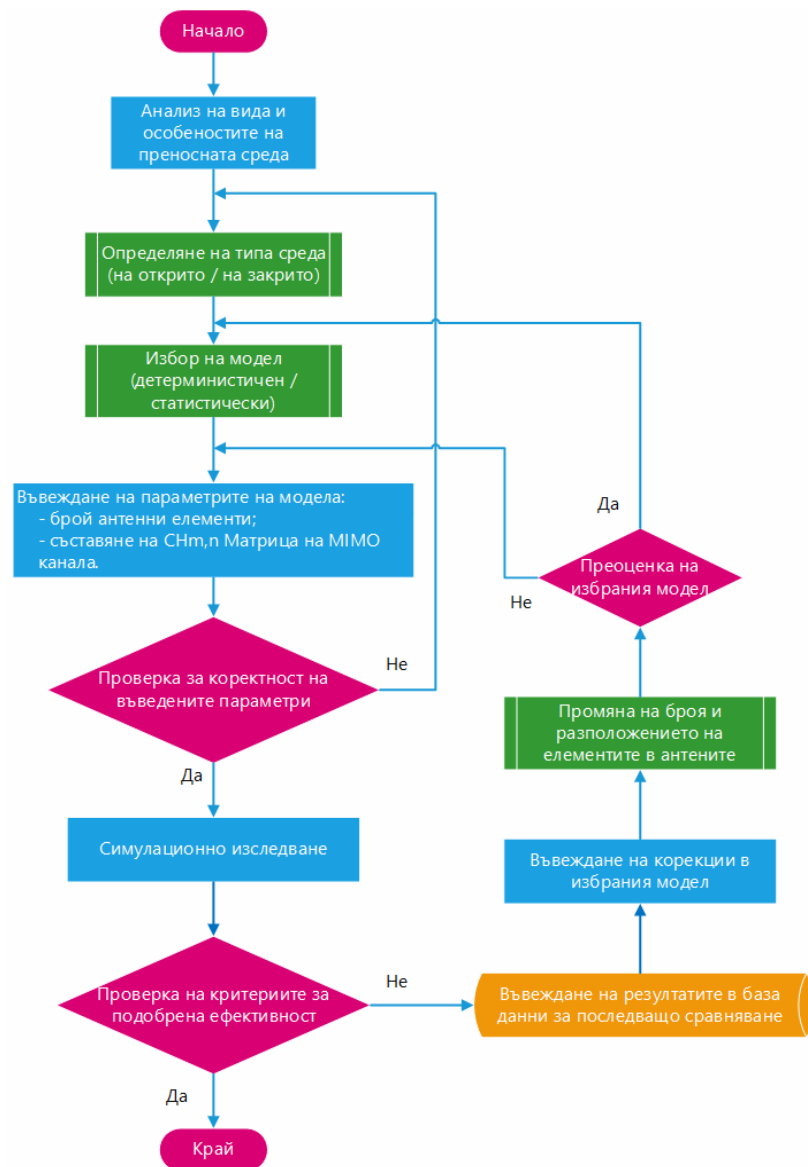
Резултатите от направеното планиране, показано на фиг. 3.33, са за работен честотен диапазон 2,4 GHz и са следните:

- очакваното ниво на сигнала при двупосочна комуникация между точката за достъп (AP RX) и приемната точка (STA RX): $-65,98\text{dBm}$;
- използван формат на модулация: 64-QAM (5/6);
- обща пропускателна способност 42,25Mbps;
- широчина на канала 10MHz;
- коефициент на усилване на приемо-предавателната антена решетка на точката за достъп 8dBi;
- коефициент на усилване на приемо-предавателната антенна решетка на приемната точка 8dBi;
- височина на приемната и предавателна антена спрямо надморската височина в дадените точки 40 m;
- стойност на EIRP 31dBm.

Това са софтуерно планирани стойности, които са при приемане на идеални условия и съответно ще бъдат различни от реално измерените.

3.5. Синтез на алгоритъм за моделиране на MIMO канал с оценка на ефективността

На фиг. 3.34. е представен алгоритъм за реализация на моделиране на MIMO канал с оценка на ефективността.



Фиг. 3.34. Алгоритъм за реализация на моделиране на MIMO канал с оценка на ефективността

В началото на алгоритъма се извършва анализ на вида и особеностите на преносната среда и се взема решение за вида външна среда / среда на закрито на разпространение. Вследствие на това се избира съответният математичен модел за моделиране на MIMO канала според вида на безжичната комуникационна система. След избора на математичния модел се извършва въвеждане на параметрите на модела – брой елементи в приемо-предавателните антени, разположение на антените, параметри на излъчване, както и се съставят необходимите матрици на MIMO канала. Следва проверка за коректността на въведените параметри.

След осъществяване на симуляционното изследване се извършва проверка по критериите за подобрена ефективност на MIMO канала. При не удовлетворяване на тези критерии, данните се записват в база данни за последващо сравняване и се извършват корекции в параметрите на предаване на сигналите в MIMO канала.

Така предложения алгоритъм систематизира работата при моделирането и симуляционното изследване на MIMO канали за връзка.

Отделните етапи могат да се разширят и разгледат по-подробно на стъпки за дефиниране на всички необходими параметри на приемо-предавателната система и на

средата, изчисляване, планиране и симулационно тестване за конкретни случаи на разпространение на открито и на закрито.

3.6. Анализ и изводи към трета глава

- 1) Изследвани са резултатите от симулационно моделиране за определяне на капацитета и изследване на ефективността на MIMO канал за връзка в безжична комуникационна мрежа по стандарт IEEE 802.11n. По реален архитектурен план (за среда на закрито) и по реален релеф (за среда на открито) в софтуерните среди на Matlab, WinProp, Aerohive Planning Tool и AirLink Outdoor Wireless Link Calculator. Представени са резултатите в табличен и графичен вид на радиочестотното планиране, което позволява изследване на поведението на математичните модели на MIMO канали в сграда и на открито, отчитайки влиянието на материалите, от които е изградена сградата или спецификата на естествените и изкуствени препятствия и релефа. Чрез това се постига необходимата висока точност на разполагане на точките за достъп, осигуряващи необходимите параметри и ефективност на радиопокритието спрямо потребителите на безжичната комуникационна мрежа.
- 2) При използването на детерминистичния и на статистическия модел при изследване на 2 x 2 MIMO система в среда на закрито се вижда добро съвпадение между симулационно получените резултати и експериментално въведените такива, като средно-квадратичната грешка се движи в границите от 1,84 до 3,28. Най-висока стойност на средно-квадратичната грешка се получава и при двата модела за контролни точки без достатъчно покритие в сградата (нивото на приетия сигнал пада под -69 dBm). Получените резултати за приетата мощност и средно-квадратичната грешка на MIMO каналите за връзка и при двата модела слабо се влияят от посоката на предаване (в права и обратна посока), което осигурява симетричност в пропусканата честотна лента и п-добро качество на предоставяната услуга.
- 3) Направено е симулационно изследване на разпространението на радиосигнали в MIMO канал за връзка в сложна градска среда при наличието на пряка видимост в сложна архитектурна среда.
- 4) В резултат на проведените симулационни изследвания на разпространението на радиосигнали и планирането на радиочестотното покритие за 2 x 2 MIMO системи при използване на аналитични модели за среда на закрито и на открито, се вижда че поведението на изследваните модели е идентично, но те използват различни началните входни параметри и условия и сложност, при които се изчислява канала. Моделите отчитат броят на елементите в приемните и предавателните антени решетки и броят на връзките между тях, но при използване на статистическия канален модел се отличава с по-голяма ефективност при сложен физически модел на безжичния канал. Сравнението между представените модели дава представа за това при какви условия е подходящо да се използва всеки от тях и каква е ефикасността от прилагането им. Използването на тези модели позволява лесното адаптиране на съществуващите симулационни модели за радиочестотно планиране на нови безжични мрежи, напр. 5G, IEEE 802.11ad/af/ah и др.
- 5) Създаден е алгоритъм за систематизирано моделиране на MIMO канал с оценка на ефективността.

ГЛАВА 4. Експериментално изследване на ефективността на MIMO канал в безжични комуникационни системи

4.1. Експериментално изследване на качеството и ефективността на MIMO канал в безжична мрежа по стандарт IEEE802.11n в среда на закрито

4.1.1. Оборудване и софтуер за практическото изследване и анализ на безжичното покритие

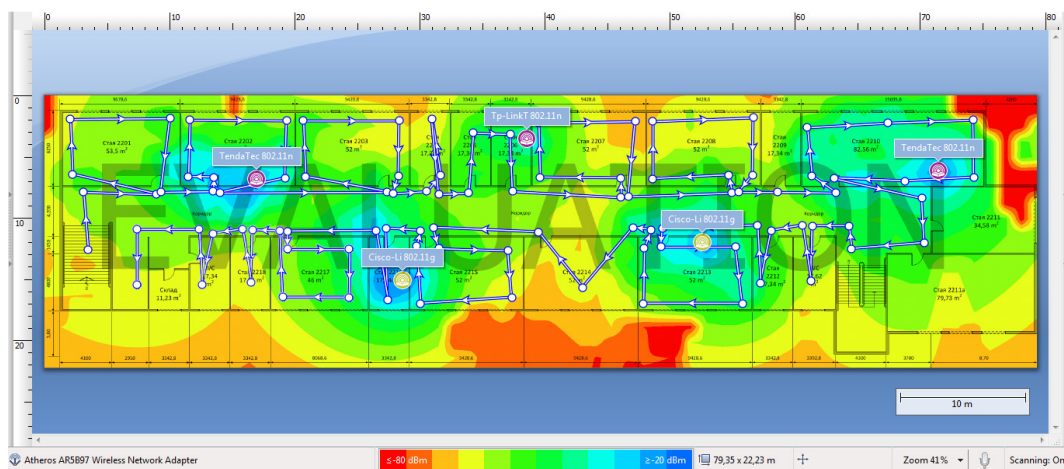
За изследване и анализ на безжичното покритие във 2-ри етаж на Учебен корпус 2 ("Баждар") на ТУ-Габрово, са използвани следните хардуерни и софтуерни компоненти:

Таблица 4.1. Оборудване и софтуер за изследване и анализ на безжичното покритие в среда на закрито

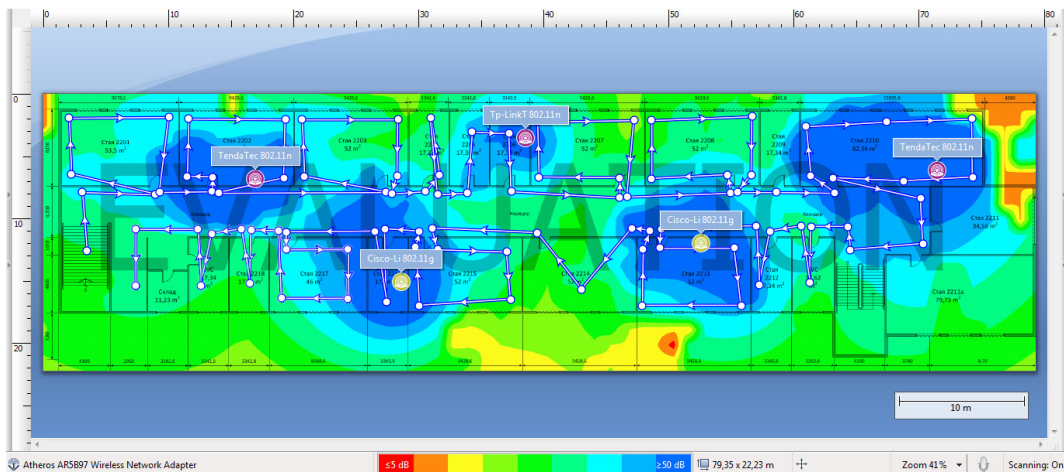
Вид	Описание
Измервателна станция	Мобилен компютър ACER Aspire 5755G
TamoGraph Site Survey	Разработчик: TamoSoft, безплатна версия за ОС Windows 10
Точка за достъп КТТ 1 до 5	MkroTik hAP RB962UiGS, IEEE802.11n/ac, ширина на канала 20MHz / 40MHz, коефициент на предаване на антената 2dBi

4.1.2. Експериментално изследване на зоната на безжично покритие от точките за достъп

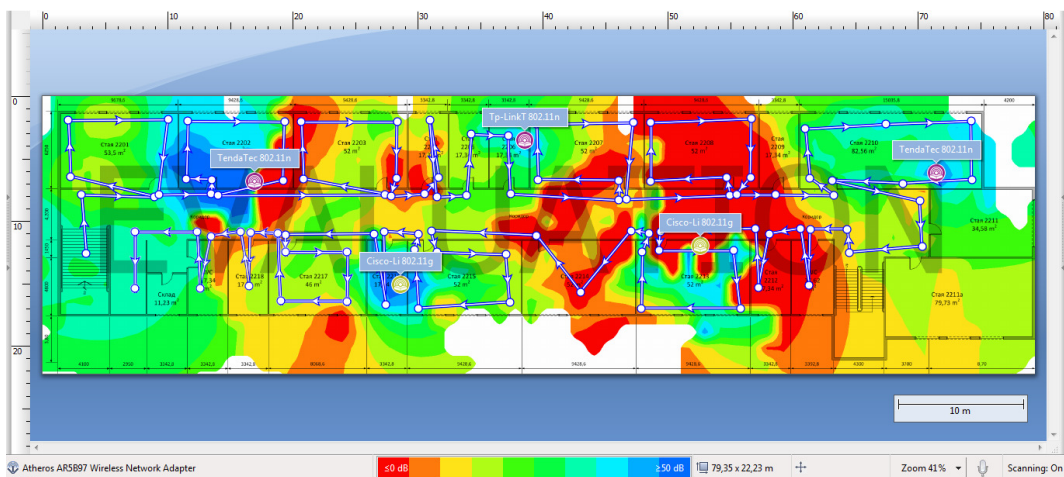
По-надолу са показани получените графични резултати от изследването на безжичното радиопокритието при използване на MIMO канали за връзка за 2-ри етаж на Учебен корпус 2 ("Баждар") на ТУ-Габрово чрез анализ с TamoGraph Site Survey.



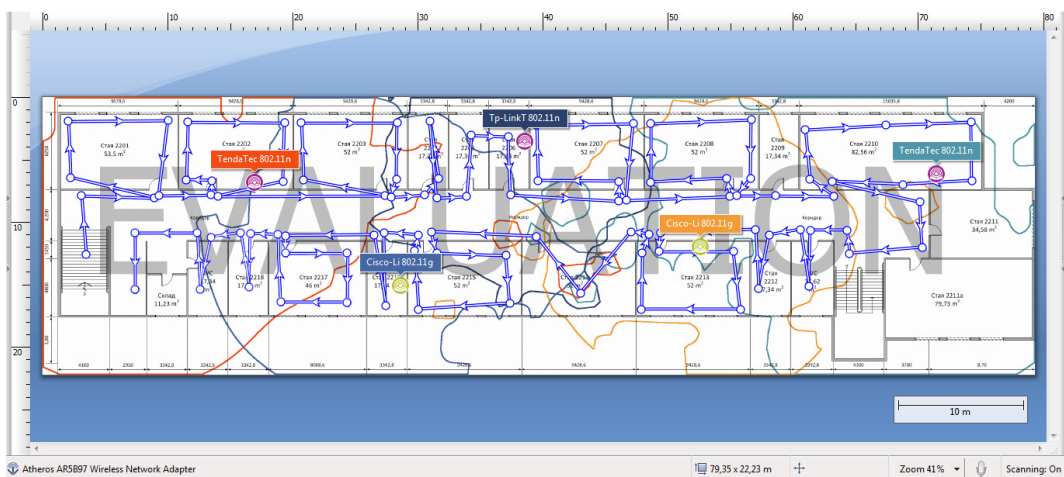
Фиг. 4.2. Ниво на сигнала от 5-те точки за достъп (Signal Level) при изследване на безжичното радиопокритие на етаж 2 в УК 2 на ТУ-Габрово



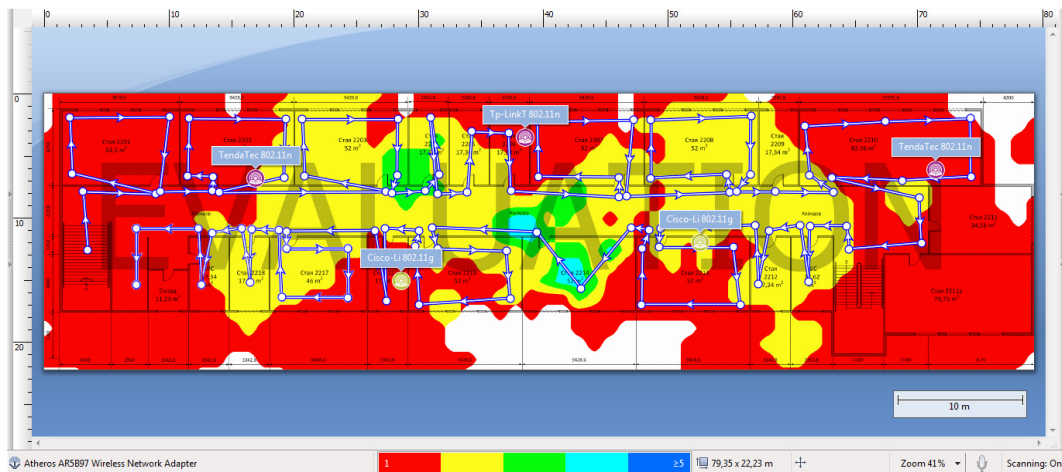
Фиг. 4.3. Съотношение сигнал/шум (Signal to Noise Ratio) при изследване на безжичното радиопокрытие на етаж 2 в УК 2 на ТУ-Габрово



Фиг. 4.4. Съотношение на сигнал/интерференция (Signal to Interference Ratio) при изследване на безжичното радиопокрытие на етаж 2 в УК 2 на ТУ-Габрово



Фиг. 4.5. Зони на покритие на точките за достъп (AP Coverage Areas) при изследване на безжичното радиопокрытие на етаж 2 в УК 2 на ТУ-Габрово



Фиг. 4.6. Визуализация на зоните покрити от повече от 1 точка за достъп при изследване на безжичното радиопокрытие на етаж 2 в УК 2 на ТУ-Габрово

Както може да се види от резултатът на фиг. 3.17 и фиг. 3.25, получени при симулационното планиране и резултатите от фиг. 4.2, получени при реалното изследване на безжичното покритие, в основната зона, където е необходимо да се осигури покритие, резултатите са добри и при сравнение приблизително съвпадат. Покритието на сигнала е равномерно по протежението на етажa, което показва, че разположението на безжичните точки за достъп е избрано подходящо. Разликите в резултатите между симулационното планиране и симулационно изследване и реалното експериментално изследване се дължи на множество фактори като:

- физическите особености на реалните материали (стени, врати и прозорци) от които е изграден обекта,
- параметрите и характеристиките на реалните точки за безжичен достъп,
- местоположението по височина на реалните точки за достъп.

На фиг. 3.26 и фиг. 4.2 е показано полученото съотношение сигнал/шум (SNR), а на фиг. 4.4 е показано полученото съотношение сигнал/интерференция (SIR). От резултатите се вижда, че съотношението сигнал/шум при използване на 2 x2 MIMO канал за връзка се запазва добро и по периферията на обекта, а също и че имаме най-голямо ниво на интерференция там където покритията на точките за достъп се припокриват (КТТ4). Възможните варианти за намаляване на този ефект е смяната на каналите на излъчване на точката за достъп, намаляване броя на точките за достъп чрез използването на такива с по-голям коефициент на усилване на антените и по подходящи характеристики на насочено действие. Другата причина за наличието на интерференция, това е наличието и на други точки за безжичен достъп, които са част от изградената мрежа на етаж 1 и етаж 3 на учебния корпус.

На фиг. 4.5 са показани отделните зони на покритие на всяка точка за достъп, дадени в различни цветове за всяка, като се вижда, че точките за достъп покриват около 30m радиус на закрито, което показва, че е спазено изискването за покритие по стандарт IEEE 802.11n.

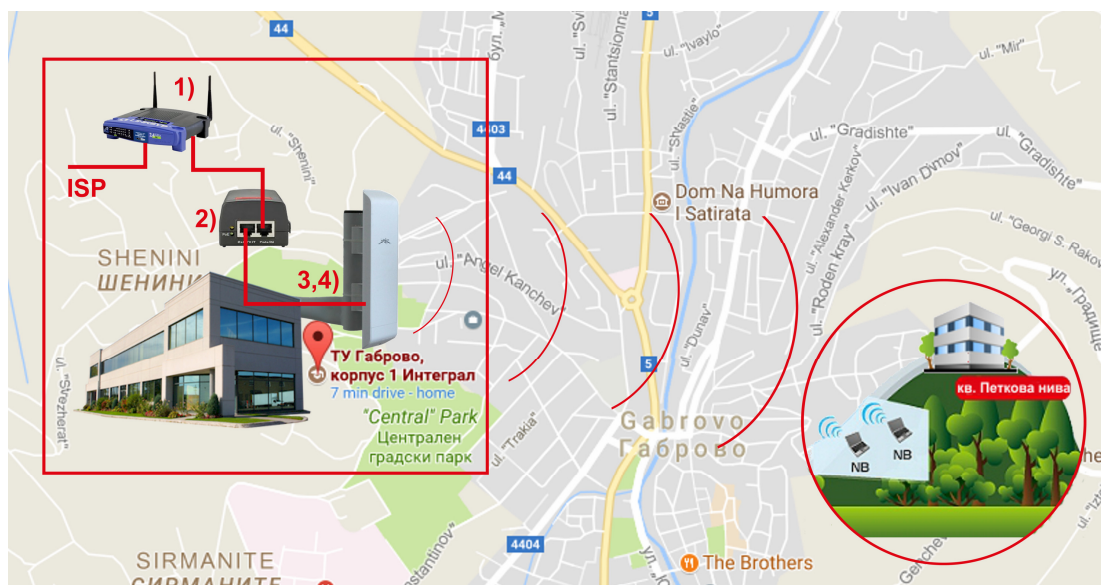
На фиг. 4.6 са показани зоните, в които има покритие от повече от една точка за достъп. Това допринася за по-устойчиво покритие от една страна, но от друга страна увеличава възможността от възникването на интерференция.

4.2. Експериментално изследване на качеството и ефективността на MIMO канал в безжична мрежа по стандарт IEEE802.11n в градска среда

4.2.1. Схема на опитната постановка

За изграждане и изследване на безжичното радиопокритие УК №1 „Интеграла“ – кв. Петкова нива е използвано оборудване и приложен софтуер, представени в обобщен вид в Таблица 4.2. Схемата на опитната постановка, по която са проведени експерименталните изследвания на качеството на радиопокритието, е показана на фиг. 4.7 и включва следните елементи:

- 1) Маршрутизатор за достъп до интернет (ISP – Internet Service Provider - доставчик на интернет достъп) MikroTik hAP RB962UiGS, IEEE802.11n/ac;
- 2) POE инжектор за захранване на нано станцията;
- 3) Нано станция Ubiquiti Nano Station M2 с приемо предавателна антена и 2 x 2 MIMO система;
- 4) Стойка за захващане и насочване на нано станцията;
- 5) NB – мобилни терминали 1 и 2 (виж таблица 4.2).



Фиг. 4.7. Схема на опитната постановка при експериментално изследване на качеството и ефективността на 2 x 2 MIMO канал в безжична мрежа по стандарт IEEE802.11n в градска среда

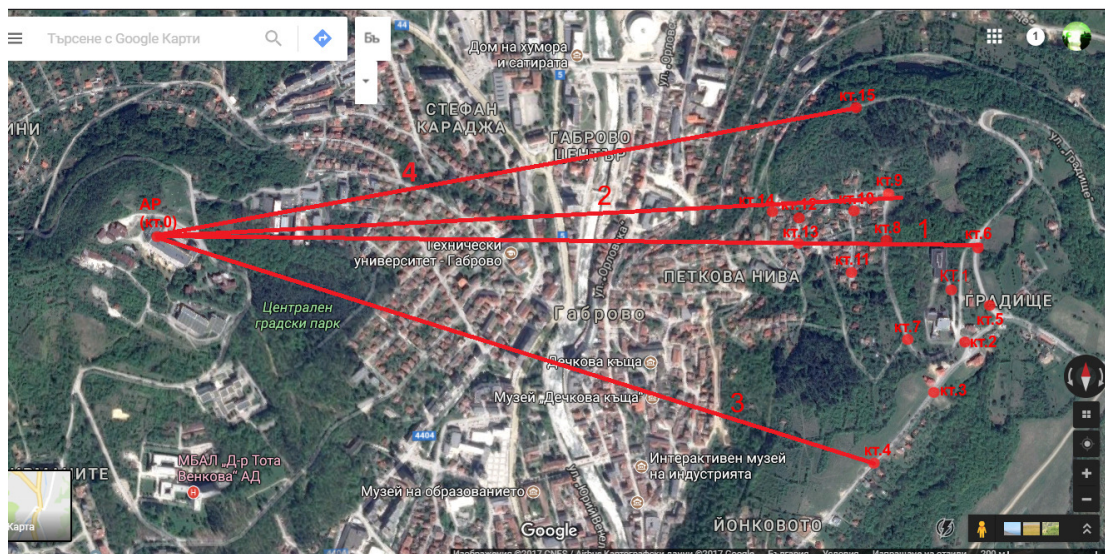
Таблица 4.2. Оборудване и софтуер за експериментално изследване и анализ на безжичното покритие в среда на открито

Вид	Описание
Мобилен терминал 1 (MT1)	Мобилен компютър ASUS X55V Предназначение: тестово устройство №1 за изследване нивото на сигнала, устойчивостта на сигнала във времето и наличието на функционална връзка
Мобилен терминал 2 (MT2)	Мобилен терминал с 2 x 2 MIMO антенна система Предназначение: тестово устройство №2 за изследване нивото на сигнала и наличието на функционална връзка
Софтуер Acrylic Wi-Fi Home	Разработчик: Tarlogic, безплатна версия. Приложение: за изследване параметрите на радиосигнала и устойчивостта му във времето чрез MT1.
Софтуер Network Analyzer	Разработчик: Jiri Techet, безплатна версия. Приложение: за изследване ни нивото на радиосигнала и устойчивостта му във времето чрез MT2.

4.2.2. Експериментално изследване на зоната на безжично покритие от точката за достъп

На базата на спецификата на релефа за целите на експерименталното изследване са дефинирани 16 контролни точки: КТ0 до КТ15, които са показани на фиг. 4.12. Контролна точка 0 (КТ0) съответства на местоположението на точката за достъп в УК №1 „Интеграла“.

При анализа на изменението на нивото на безжичния радиосигнал са дефинирани и 4 направления, показани също на фиг. 4.12. Тези направления съответстват на централната област от радиопокритието (Направления 1 и 2) и двете крайни зони на покритието (Направления 3 и 4). Началото на посочените направления е в КТ0 (УК №1 „Интеграла“).



Фиг. 4.12. Контролни точки и направления за изследване на безжично радиопокритие в градска среда за района на кв. Петкова нива

По-подробна информация за местоположението на избраните контролни точки е представена в таблица 4.3.

Таблица 4.3. Контролни точки за изследване и анализ на безжичното покритие в градска среда

Контролни точки	Местоположение
КТ0	УК №1 „Интеграла“
КТ1	Национална обсерватория и планетариум – гр. Габрово, ул. „Петкова нива“ 5
КТ2	Кръстовището на къща за гости Милкана – ул. „Стефана Богдан Генчева“ 58
КТ3	ул. „Стефана Богданова Генчева“ 54
КТ4	ул. „Стефана Богданова Генчева“ 48
КТ5	ул. „Градище“, преди кръстовището за Зоологическа градина – гр. Габрово.
КТ6	ул. „Градище“, след кръстовището с ул. „Петкова Нива“.
КТ7	в края на ул. Петкова нива и преди началото на ул. „Разцветна“
КТ8	ул. „Разцветна“ 16
КТ9	между ул. „Разцветна“ 2 и ул. „Кръгозор“ 18
КТ10	ул. "Народна воля" 4
КТ11	ул. "Народна воля" 8
КТ12	ул. „Кръгозор“ 11
КТ13	кръстовището на улица „Кръгозор“ и ул. „Орлово гнездо“
КТ14	ул. „Турист“ 10
КТ15	РТПС „Бумеранг ФМ“ – Петкова нива

Местоположението на контролните точки е така подбрано, че да обхване максимално обитаемата територия на зоната на покритие, т.е. местата където са съсредоточени възможните потребители на реализираното радиопокритие.

Контролни точки 2, 8 и 13 са подложени на по-подробни изследвания, тъй като те условно разделят зоната на покритие на три подзони спрямо диаграмата на насоченост на приемо-предавателната антена на нано станцията и разпределението по надморска височина на кв. Петкова нива (най-висока подзона – КТ2, средна подзона – КТ8, най-ниска подзона – КТ13 от общото радиопокритие).

За така дефинираните контролни точки, използвайки избраните тестови устройства (МТ1 и МТ2) с инсталирани на тях софтуерни продукти Acrylic Wi-Fi Home и Network Analyzer са проведени измервания на нивото по мощност на радиосигнала. Резултатите от измерването са обобщени в таблица 4.4.

Таблица 4.4. Експериментално измерени нива на радиосигналите в избраните контролни точки при изследване на безжичното покритие в градска среда

КТ №	Измерено ниво, dBm		Разстояние, km
	Мобилен терминал 1	Мобилен терминал 2	
0	-30	-30	0
1	-84	-82	1,73
2	-79	-74	-
3	-86	-84	-
4	-85	-85	1,63
5	-80	-75	-
6	-82	-78	1,77
7	-85	-83	-
8	-77	-79	1,58
9	-81	-80	1,58
10	-78	75	-
11	-76	-75	-
12	-76	-77	1,47
13	-82	-78	1,41
14	-80	-79	1,35
15	-84	-74	1,54

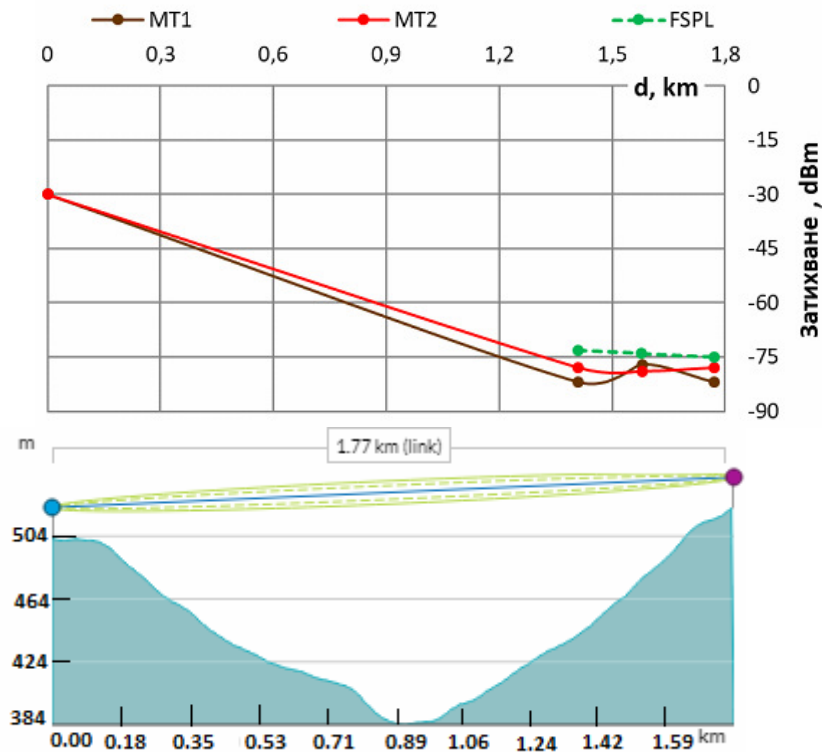
Използвайки информацията за измерените нива на сигналите в таблица 4.4 и с помощта на приложния софтуер AirLink Outdoor Wireless Link Calculator, разгледан при симулационното планиране в глава 3, тук ще бъдат представени диаграми на изменението на нивата на сигналите в зависимост от релефа по данни от контролните точки за Направления 1, 2, 3 и 4 (виж фиг. 4.12). Както бе споменато началото на посочените направления е в КТ0 (УК №1 „Интеграла“), а направленията съответстват на централната област от радиопокритието (Направления 1 и 2) и двете крайни зони на покритието (Направления 3 и 4).

При анализа на получените резултати са изведени и теоретичните загуби в свободното пространство (FSPL – Free Space Path Loss), които са изчислени със следната аналитична зависимост:

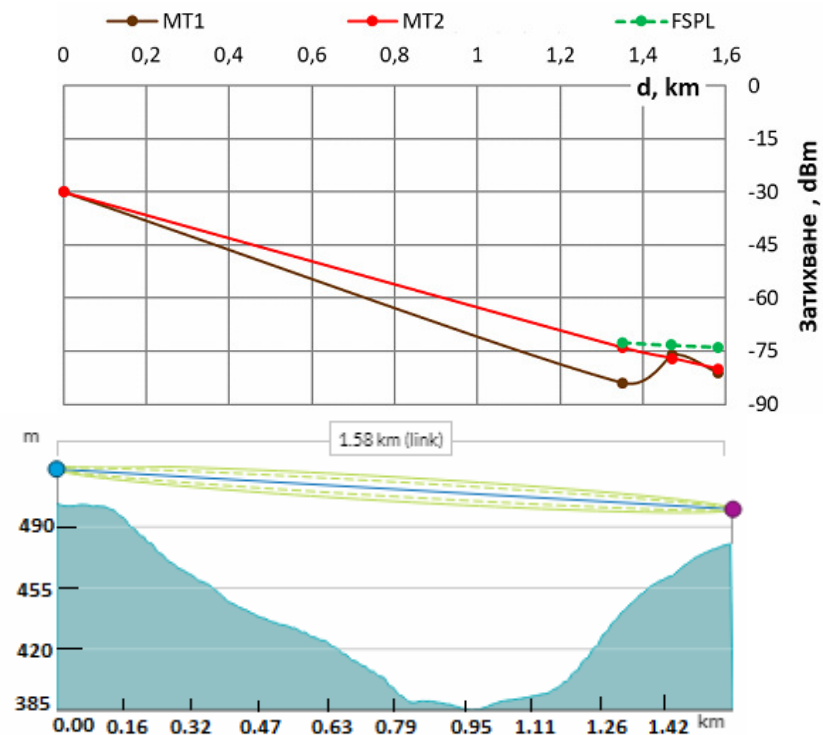
$$FSPL_{dB} = 20 \lg(d) + 20 \lg(f) + 32,44 \quad (4.1)$$

където: d – е разстоянието от точката за достъп в km, а f е работната честота в MHz (т.е. 2400 MHz).

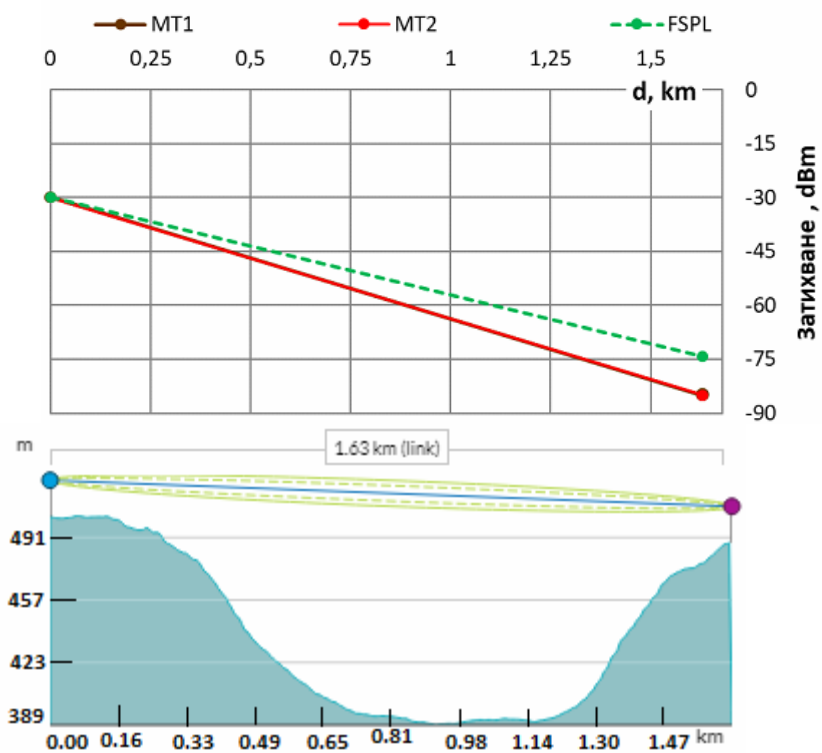
Определянето на теоретичните загуби в свободното пространство за целите на анализа са на база изходно ниво на сигнала в КТО (т.е. непосредствено до точката за достъп) равно на -30dBm .



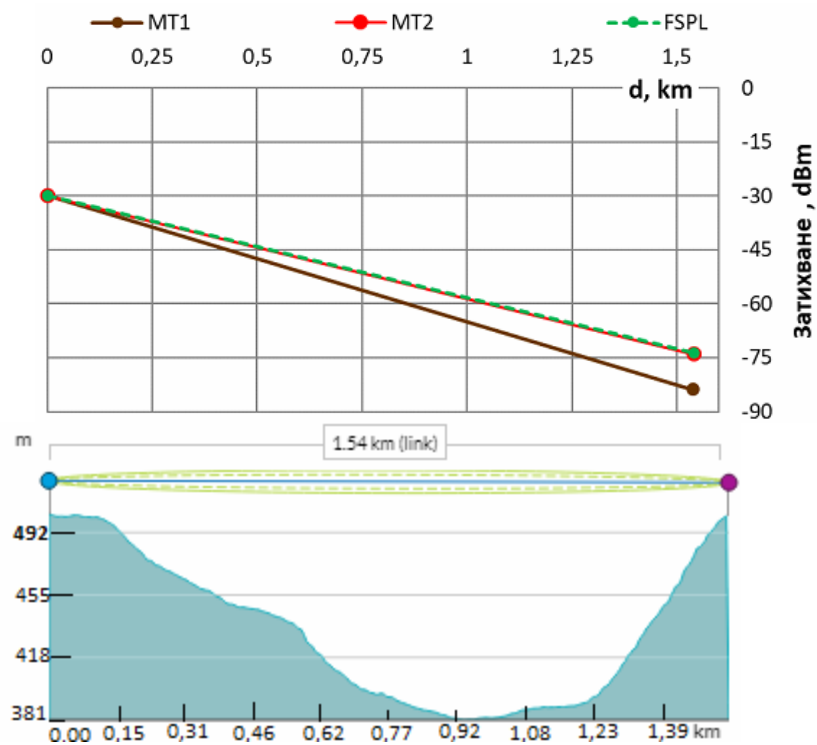
Фиг. 4.16. Изменение на нивото на радиосигнала по Направление 1



Фиг. 4.17. Изменение на нивото на радиосигнала по Направление 2



Фиг. 4.18. Изменение на нивото на радиосигнала по Направление 3



Фиг. 4.19. Изменение на нивото на радиосигнала по Направление 4

Както се вижда от фиг. 4.16 до фиг. 4.18 реалното затихване на сигнала е по-голямо от теоретичните загуби в свободното пространство, но резултатите са сравнително близки по стойност, което се дължи на наличието на пряка видимост между точката за достъп и контролните точки в зоната на покритие в кв. Петкова нива.

Измереното по-високото ниво на затихването на сигнала се дължи от една страна на влиянието на релефа на покриваната зона независимо от пряката видимост, а от друга страна зависи и от чувствителността и размера на 2 x 2 MIMO антените на използваните за измерване мобилни терминали MT1 и MT2.

Пряко сравнение в качеството на приемане между двата мобилни терминала е трудно да се направи предвид на малкия брой контролни точки по дадено направление (обусловен от размера на самата зона на покритие), както и предвид на конструктивните разлики и начина на ползване на терминалите (т.е. тяхната мобилност в начина на захващане и насочване). Независимо от това, резултатите се разминават със стойност от порядъка максимум до 5dBm (за KT2 и KT5).

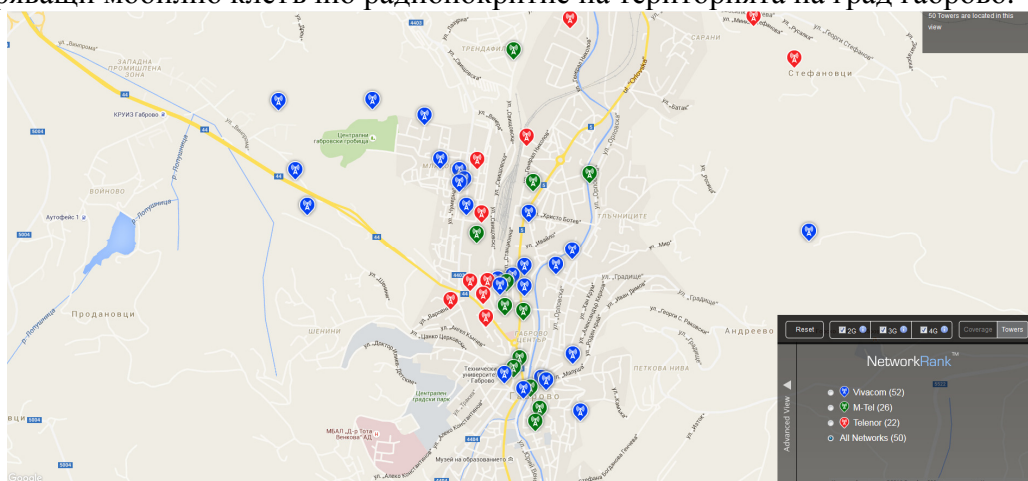
Направените измервания позволяват да се обобщят следните по-важни изводи за разработения проект:

- Осъществяването на връзка на открито чрез използване на мобилни терминали (лаптопи и смартфони) в по-голямата част от изследваната зона е възможно без нуждата от допълнително антенно оборудване или усилване на сигнала;
- В част от изследваната зона са налични двуетажни сгради и горски пояси, които водят до засенчване на сигнала. Измерванията показваха, че за кв. Петкова нива това най-често се получава в зони, където физически не е удобно да се използват мобилен телефон или лаптоп, т.е. засенчването на сигнала не е от практическа значимост.
- Съществен проблем е достъпа до създадената безжична мрежа на закрито, тъй като затихванията на сигналите нарастват значително. Това налага за осигуряване на свързаност в отделните жилищни сгради да се използва допълнително антенно оборудване. За тази цел като добър вариант може да се предложи използването на мачта и същия модел нано станция за локално приемане, усилване и осигуряване на стабилни параметри и надеждност на сигнала (т.е. реализацията на връзка от типа „Точка-до-точка“ между точката за достъп и съответната приемна антена).

4.3. Експериментално изследване на качеството и ефективността на MIMO канал в 4G LTE обилни мрежи в градска среда

4.3.1. Описание и анализ на състоянието на обекта на изследване

На фиг. 4.20. е показана за територията на гр. Габрово с наличната информация за местоположението и броя на базовите станции на 3-те основни мобилни оператора, осигуряващи мобилно клетъчно радиопокрытие на територията на град Габрово.

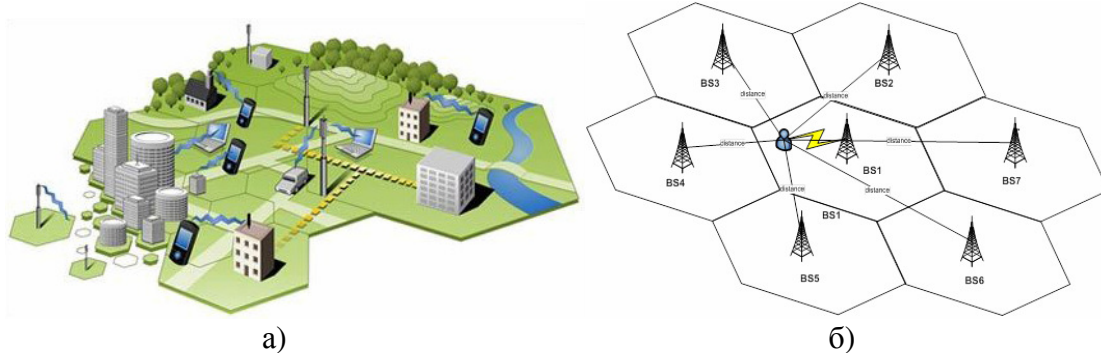


Фиг. 4.20. Разположение на базовите станции над гр. Габрово от 3-те основни мобилни оператора

За целта е използван свободен достъп до отворената база данни на веб-базираната информационна услуга OpenSignal. OpenSignal е водещ източник при мониторинга на покритието и ефективността на мобилните оператори по целия свят. Данните получени от OpenSignal са в резултат на постоянен мониторинг на обхвата и ефективността на мобилната връзка.

4.3.2. Схема на опитната постановка при изследване на радиопокритието в мобилна клетъчна мрежа

На фиг. 4.21 е представена схемата на опитната постановка, използвана при осъществяването на мониторинга и изследването на параметрите на сигналите и покритието в мобилна клетъчна мрежа.



Фиг. 4.21. Схема на опитната постановка за (а) мониторинг и (б) изследване на параметрите на сигналите и покритието в мобилна клетъчна мрежа

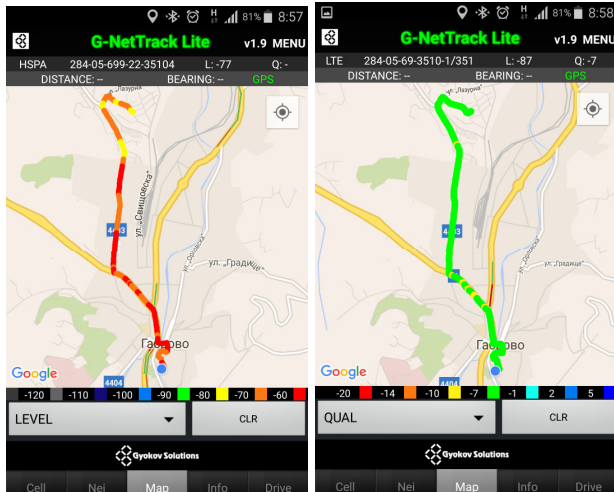
Мониторингът на покритието се осъществява чрез подходящо тестово мобилно устройство, на което е инсталирано избрано Android-базирано специализирано приложение. Мобилното устройство трябва да бъде с активиран GPS за локализация на местоположението в анализирания район, както и с активиран интерфейс за пренос на данни. Анализът на покритието се осъществява чрез обхождане на дадения район по предварително избран маршрут, като целта е да се събират едновременно данни за местоположението и за параметрите на радиосигнала.

В комбинация с параметрите на сигнала от текущата клетка, мобилното устройство приема сигнали и от съседни клетки, което позволява да се събере информация и за параметрите на сигналите като цяло. Извеждат се като резултати различни карти на покритие, отчитат се параметри като SNR, ниво на сигнала, оценка на различните трафични и логически канали, както и информация за съседните клетки и извършването на хендоувър.

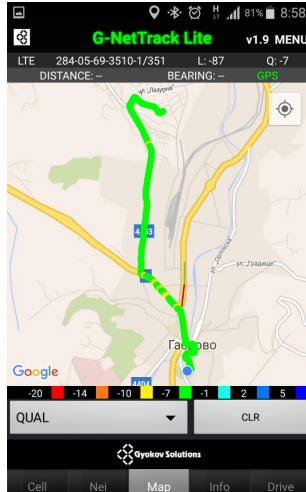
В процеса на мониторинг и измерване на параметрите на радиопокритието се избира типа мрежа – 2G (в режим SISO) или 3G и 4G/LTE (чрез използване на възможностите за комуникация по MIMO канал).

4.3.3. Резултати от изследването на радиопокритието в мобилна клетъчна мрежа

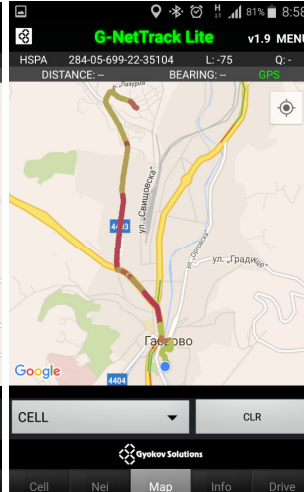
Резултатите от направените експериментални измервания в режим 3G - UMTS (при използване на MIMO режим на комуникация) са показани на фиг. 4.33 - фиг. 4.40.



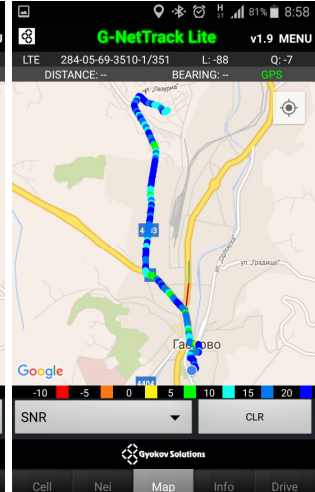
Фиг.4.33. Ниво на сигнала – LEVEL (3G)



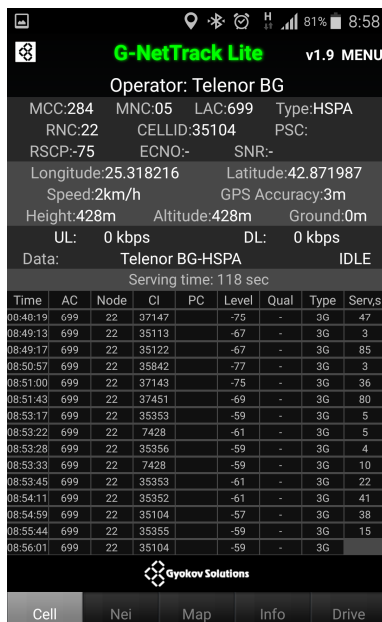
Фиг.4.34. Качество на сигнала в мрежата (3G)



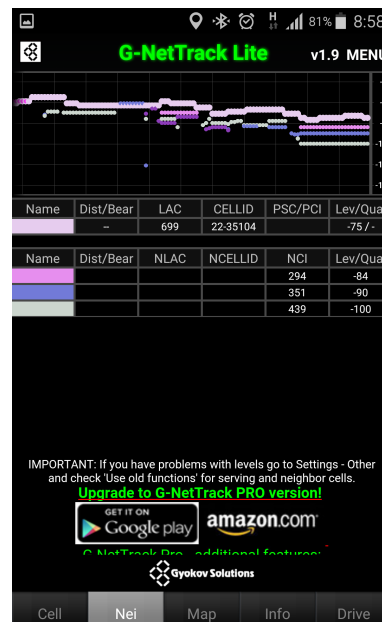
Фиг.4.35. Данни за наличие на handover – CELL (3G)



Фиг.4.36. Съотношение сигнал/шум – SNR (3G)



Фиг.4.39. Данни за мрежата и географското положение (3G)



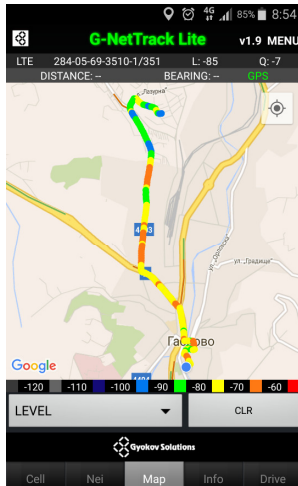
Фиг.4.40. Данни за текущо свързаната и съседни БС (3G)

От проведеното изследване в режим 3G – UMTS и използване на MIMO канали на комуникация може да се направят следните по-важни изводи:

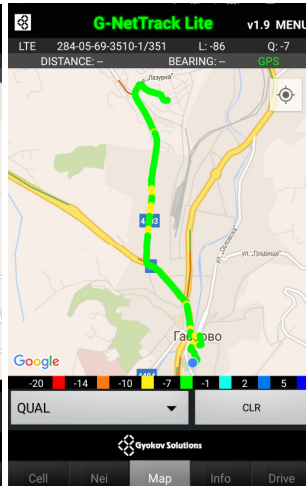
- 1) Нивото на сигнала за обходения маршрут в по-голямата му част е високо: – 60dB/–70dB. Едва в няколко участъка на квартал Трендафил 1 се забелязва влошаване на нивото и спадове до –70dB/–80dB, по причини вече споменати и при анализа на 2G.
- 2) Качеството на сигнала може да се оцени като добро, което като показател от приложението е отразено със стойност –7.
- 3) Съотношението SNR се движи в границите 15 ÷ 20 dB, което е предпоставка за добро качество на сигнала.

- 4) При обхождането на маршрута са засечени 12 клетки. Основното пребиваване на мобилното устройство е било в 5 от тях като е отчетен равномерен и плавен хендоувър между тях без да се наблюдават значителни спадове в нивото на сигнала и липса на покритие. Отражено е и времето на обслужване във всяка една от тях.

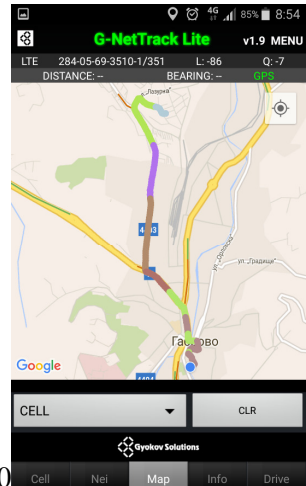
Резултатите от направените експериментални измервания в режим 4G - LTE (при използване на MIMO режим на комуникация) са показани на фиг. 4.41 - фиг. 4.48.



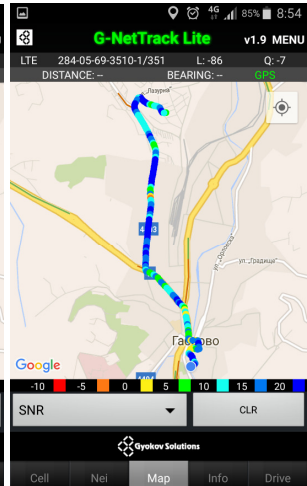
Фиг. 4.41. Ниво на сигнала – LEVEL (4G)



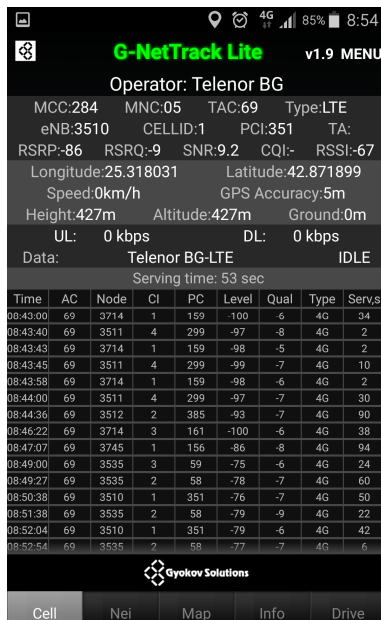
Фиг. 4.42. Качество на сигнала в мрежата (4G)



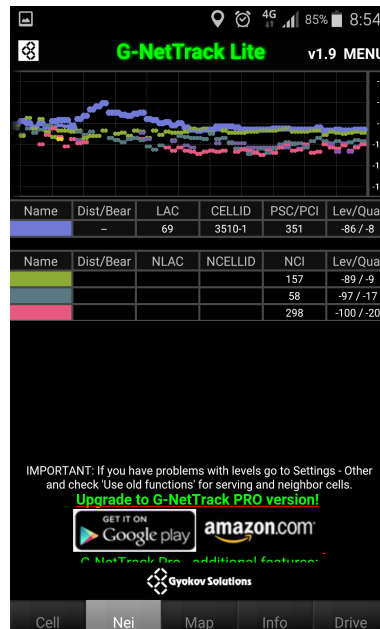
Фиг. 4.43. Данни за наличие на handover – CELL (4G)



Фиг. 4.44. Съотношение сигнал/шум – SNR (4G)



Фиг. 4.47. Данни за мрежата и географското положение (4G)



Фиг. 4.48. Данни за текущо свързаната и съседни БС (4G)

От проведеното изследване в режим 4G – LTE и използване на MIMO канали на комуникация може да се направят следните по-важни изводи:

- 1) Нивото на сигнала за обходения маршрут варира значително в границите: – 70dB/–100dB, като най-ниските стойности отново са в участъка на квартал

Трендафил 1, но тук се наблюдават и по-ниски стойности в централната градска част.

- 2) Качеството на сигнала може да се оцени като добро, което като показател от приложението е отразено със стойност -7 .
- 3) Съотношението SNR се движи в границите $10 \div 15$ dB, което е предпоставка за добро качество на сигнала.
- 4) При обхождането на маршрута са засечени 6 клетки. Отражено е времето на пребиваване на мобилното устройство във всяка от тях като е отчетен равномерен и плавен хендоувър между тях без да се наблюдават значителни спадове в нивото на сигнала и липса на покритие.

4.4. Анализ и изводи към четвърта глава

В тази глава е извършено експериментално изследване на радиопокритие в безжични комуникационни мрежи по стандарти IEEE802.11n и 4G LTE за среда на закрито и градска среда. За целта са проведени множество измервания на параметрите на радиосигналите предавани по MIMO каналите за връзка, които могат да доведат до следните заключения:

- 1) Разработените и реализирани експериментални опитни постановки показват предимствата от въвеждането на многоантенните системи в безжичните комуникационни мрежи. Налични са възможности за избиране на различни комбинации на елементите в антенната решетка, което позволява подобряване на ефективността чрез агрегиране на трафика по отделните канали, формирането на лъчи за по-качествено обслужване на потребителите при висока степен на мобилност, качествено и надеждно разделяне на потоците от отделните потребители без увеличаване на интерференцията.
- 2) Направените изследвания потвърждават необходимостта от търсенето на решения за съвременни методи за подобряване на ефективността в безжичните канали за връзка. Най-слабото звено от мрежата е преносната среда тъй като в нея въздействие оказват редица фактори: шумове и смущения, интерференция, многолъчево разпространение на сигналите и др.
- 3) От проведените експерименти се наблюдава, че при въвеждане на MIMO каналите за връзка в мобилните клетъчни мрежи по стандарт 4G LTE ефективността на пренос на данните, респективно пропускателната способност на мрежата нараства от 30 до 70 пъти.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В резултат на изследването в рамките на дисертационния труд са постигнати следните научно-приложни приноси със значимост и полезност в планирането, симулационното и експериментално изследване и експлоатацията на MIMO канали в безжичните комуникационни мрежи:

- 1) Предложени са методи за оптимален избор на модел за подобряване на ефективността при реализацията на MIMO канали в безжичните комуникационни мрежи.
- 2) Анализирани са аналитични модели на MIMO системния модел и MIMO канала за оценка. Направени за изследвания с цел сравнителен анализ на емпиричните модели с експериментално получени данни при различни конфигурации и брой на елементите в MIMO системата.
- 3) Създадени са симулационни модели във виртуална среда и са направени изследвания с три различни математически модели за моделиране и

изследване на ефективността на MIMO канал за връзка в безжична мрежа по стандарт IEEE802.11n/ac на закрито. Направен е сравнителен анализ на параметрите и се предлагат решения за използването на специфични модели в конкретна среда на разпространение.

- 4) Анализирани са симулационни модели свързани с планиране на безжично радиопокрытие с MIMO канали за връзка за среда на закрито и в сложна градска среда и са изчислени затихването на радиосигнала, съотношението сигнал/шум, нивото на интерференция и зоните на покритие при липса на пряка видимост, като се отчита влиянието многолъчевото разпространение на сигналите и многоканалните връзки с потребителите. Направено е симулационно изследване с програмни продукти Matlab, WinProp, Aerohive Planning Tool и airLink Outdoor Wireless Link Calculator.
- 5) Направено е изследване на параметрите на разпространение на радиосигнали на вътрешно и външно разположение при различни модели, чрез виртуална среда и са представени графични зависимости даващи информация за търсене на оптимални решения за разположение на многоантенно оборудване и неговата ефективна настройка.
- 6) Създадени са симулационни и експериментални модели за изследване на радиопокрытие сграда – учебен корпус №2 на Технически Университет Габрово и са извършени симулационни и експериментални изследвания на вътрешно и външно разпространения на сигналите при използване на MIMO канали за връзка
- 7) Вследствие направените симулационни изследвания и получени резултати е предложен алгоритъм за проектиране на MIMO безжични платформи с висока ефективност за съвременните и развиващите се безжични комуникационни мрежи.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [A1] **Malamatoudis M.**, Approach for MIMO Wireless Channel Modelling and System Characterization, International Scientific Conference UNITECH 2018, 16-17 November 2018, Gabrovo, ISSN 1313-230X, Vol. 2, pp. II-28-32.
- [A2] Angelov K., S. Sadinov, P. Kogias and **M. Malamatoudis**, Simulation Study and Analysis of High Speed Single Channel Transmission in Optical Communication Line, Proc. IX National Conference with International Participation Conference "Electronica 2018", Sofia, Bulgaria, IEEE Catalog Number CFP18P58-POD, ISBN (online) 978-1-5386-5801-7, pp. 162-165. (**Scopus**).
- [A3] Sadinov S., K. Angelov, P. Kogias and **M. Malamatoudis**, Iterative Estimation and Simulation Analysis of the Amplifying Sections in Optical Communication Network, Proc. XXVI International Scientific Conference Electronics - ET2017, September 13-15, 2017, Sozopol, Bulgaria, ISBN 978-1-5386-1752-6, IEEE Catalog Number CFP17H39-CDR, pp.300-303 (**Scopus**).
- [A4] **Маламатудис М.**, П. Когиас, Н. Манчев, С. Садинов, Проектиране, изграждане и анализ на радиопокрытие с наностанция, Международна конференция – UNITECH 2017, Габрово, ISSN 1313-230X, Том 2, стр. II-99-103.
- [A5] Ангелов К., С. Садинов, П. Когиас, **М. Маламатудис**, Моделиране и изследване на широколентова оптична комуникационна система базирана на пасивна оптична мрежа, Международна конференция – UNITECH 2017, Габрово, ISSN 1313-230X, Том 2, стр. II-104-107.
- [A6] Садинов С., **М. Маламатудис**, П. Когиас, К. Ангелов, Симулационно изследване на модел за предаване на цифров телевизионен сигнал по стандарт DVB-S/S2, 55-та годишна конференция на Русенския университет “Интелигентна специализация - иновативна стратегия за регионална икономическа трансформация”, Научни трудове на Русенски Университет, 2016, ISSN 1311-3321, SAT-2G.302-1-CSNT-01, Том 55, Серия 3.2, стр. 25-34.
- [A7] Ангелов К., П. Когиас, **М. Маламатудис**, С. Садинов, Експериментално изследване на параметрите и характеристиките на сигнали в системите за сателитна цифрова телевизия, Международна конференция - UNITECH 2016, Габрово, ISSN 1313-230X, сборник доклади - Том 2, стр.134-139.

MODELLING AND ADVANCED METHODS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF MIMO CHANNELS IN WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

Author: Michail Nikolaos Malamatoudis

ABSTRACT:

The use and deployment of a new generation of wireless communication networks is based on the use of MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) technology, in which the spatial encoding of the signal increases the bandwidth of the channel. The transmission and reception of data in the channel is implemented using a multi antenna system (multi-antenna system).

The acquisition of channel state information is a key factor in the search for methods to improve the performance of channels in wireless communication networks. Massive MIMO systems usually rely on channel estimation of the forward and reverse link. With the huge number of channels estimated between transceivers, it takes a long enough time for channel coherence to allow for efficient operation. The accuracy in which optimal channel parameters can be determined and the time slot, during which the channel state can be assumed to be constant, leads to numerous limitations in applying methods to improve the performance of MIMO channels in wireless communication networks.

Although the theory of MIMO technology is promising, further development requires an in-depth analysis of models and appropriate modeling for evaluation and analysis of different algorithms. The dissertation examines modern methods related to improving the efficiency of MIMO channel models in wireless communication systems based on the extension of IEEE 802.11 standards and 4/5G mobile communication systems.

The main objective of the dissertation thesis is to present and study the processes of realization of wireless radio coverage by synthesizing analytical and simulation models and conducting simulation and experimental studies that will lead to possibilities for evaluation and search of efficiency improvement methods in modern multi-user broadband wireless communication networks. For this purpose, the chapters present the approaches for analytical modeling of MIMO channels (Chapter 2), simulation modeling and study of the efficiency of MIMO channels (Chapter 3) and experimental study of the efficiency of the MIMO channel (Chapter 4).

Keywords:

MIMO channel model, wireless communication, radio coverage, radio planning