



Технически Университет – Габрово
Факултет „Електротехника и Електроника“
Катедра „Комуникационна Техника и Технологии“

маг. инж. Росен Иванов Цветков

**“РАДИОЧЕСТОТНО ПЛАНИРАНЕ НА
ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ”**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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”

Докторска програма:

„Комуникационни мрежи и системи”

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Николай Димитров Ташков

Габрово,

2019 г.

Дисертационният труд съдържа 4 глави, изложени на 127 страници, в които са включени 56 формули, 141 фигури и 22 таблици. Списъкът на литературните източници е съставен от 117 заглавия, от които 5 на кирилица, 109 на латиница и 3 Интернет адреса.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширен катедрен съвет на катедра „Комуникационна техника и технологии“, факултет ”Електротехника и електроника” на Технически университет – Габрово, състоял се на 24.04.2019 г.

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

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 19.07.2019 г. от 13 ч. 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.

© Росен Иванов Цветков – автор, 2019

e-mail: rosensoft@abv.bg

Заглавие: Радиочестотно планиране на телекомуникационни мрежи

Тираж: 20бр.

Университетско издателство „Васил Априлов” при ТУ-Габрово

Технически Университет – Габрово
Факултет „Електротехника и Електроника“
Катедра „Комуникационна Техника и Технологии“

маг. инж. Росен Иванов Цветков

**“РАДИОЧЕСТОТНО ПЛАНИРАНЕ НА
ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ”**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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”

Докторска програма:

„Комуникационни мрежи и системи”

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Николай Димитров Ташков

Рецензенти:

проф. д-р инж. Андон Димитров Лазаров
доц. д-р инж. Станимир Михайлов Садинов

Габрово,

2019 г.

Списък на използваните съкращения и обозначения

Списък на използваните съкращения

Съкращение	Английско название	Българско название
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing	Мултиплексиране с честотно разделяне
TDMA	Time Division Multiple Access	Множествен достъп с времеделение
ISM	Industrial Scientific Medical	Индустриална, научна, медицинска
CSMA	Carrier Sense Multiple Access	Множествен достъп
ССК	Code Complementary Keying	Код с допълнителен ключ
PBCC	Packet Binary Convolution Code	Двойчен конволюционен код
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Множество входове множество изходи
SDM	Space-division Multiplexing	Мултиплексиране с пространствено разделяне
MSDU	Mac Service Data Unit	Устройство за данни
MPDU	Message Protocol Data Unit	Единица данни за протокол за съобщения
QAM	Quadrature amplitude modulation	Квадратурна амплитудна модулация
OSI	Open Systems Interconnection	Взаимно свързване на отворени системи
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum	Спектър с директна последователност
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum	Пренастройване на работната честота
NIC	Network Interface Card	Мрежова карта
AP	Access point	Точка за достъп
ISA	Industry Standard Architecture	Слот за периферни карти
PCI	Peripheral Component Interconnect	Слот за периферни карти
IBSS	International base station subsystem	Базова станция с под-система
PAN	Personal Area Network	Персонална мрежа
IBSS	Independent Basic Service Set	Независим набор от услуги
BSS	Basic Service Set	Основен набор от услуги
ESS	Extended Service Set	Разширен набор от услуги
DSSS	Direct-sequence spread spectrum	Метод за разширен спектър
IAPP	Inter-Access Point Protocol	Протокол за достъп
SSID	Service Set Identifier	Ключ за сигурност
PtP	Point to point	Точка до точка
PtMP	Point to multipoint	Точка до много точки
WDS	Wireless distribution system	Безжична разпределена система
MF	Modified-Free-Space Model	Модифицираният модел за разпространение в свободното пространство
MW	Multi-Wall Model	Многостенния модел

DP	Dominant Paths	доминиращите пътища
GTD/UTD	Geometric Theory of Diffraction	Геометрична теория за дифракция
ITU	International telecommunication union	Международен съюз по телекомуникации
DVB-T/T2	Digital video broadcasting terrestrial	Цифрова наземна телевизия
LoS	Line of Sight	Пряка видимост
N_{LoS}	Non Line of Sight	Непряка видимост
STN	Satellite communication network	Сателитна комуникационна мрежа

Списък на използваните символни означения

L_r	Загубите от разпространение на отразени радиосигнали.
d_1	Разстоянието, осигуряващо пряка видимост в m
d_2	Разстоянието в уличния каньон в m
L_d	Дифракционите загуби по трасето
L_{LoS}	Загубите от разпространение на радиосигнала при наличие на пряка видимост
n	Номера на Френеловата зона
h_1	Височината на антената на точката за достъп
h_2	Височината на антената в точката на приемане
λ	Дължината на вълната в m
$R_{ТП}$	Точка на пречупване

А. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В съвременните комуникации за изграждането на надеждни мрежи се преодоляват все по-големи изисквания относно местоположение и достъп на централи и клиенти. Безжичните комуникационни мрежи осигуряват бърз и лесен достъп. За изграждането на такава мрежа от голямо значение е предварителното проектиране и анализ на заобикалящата среда, през която ще се разпространява сигнала на тази мрежа, и стандарта за който ще е предназначена.

Изследването на безжични комуникационни мрежи изисква предварителното проучване на нормите на стандарт IEEE 802.11 (Wi-Fi) и тяхното правилно прилагане. Друг фактор за постигане на успешен краен резултат при проектирането и въвеждането в експлоатация е познаването и ефикасното използване на специализирани софтуерни продукти, например WinProp.

Основен обект на изследване се явяват съвременните безжични комуникационни стандарти (IEEE 802.11) и мрежи (Wi-Fi), като в настоящата разработка се представят методите на планиране, проектиране и диагностика при експлоатация и настройка на параметрите на радиосредата в безжична Wi-Fi мрежа.

Предмет на изследване са различните процеси, свързани с предаване, приемане и синхронизация по въздушната среда, както и зависимостите, касаещи параметрите, определящи разпространението на радиовълните в специфични условия.

Приносите на дисертационния труд имат научно-приложен характер и дават значимост и полезност в планирането, изграждането, настройката и експлоатацията на безжичните мрежи.

Цели и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е създаване на методологии от процедури, свързани с коректни подходи при планиране, изграждане и експлоатация в безжични мрежи, чрез определяне на оптимални диапазони на изменение на конкретни технически параметри и критерии, свързани с подобряване на възможностите на радиоразпространение на сигналите в конкретни среди.

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

1. Оптимално радиочестотно планиране в градска среда и създаване на алгоритъм за избор на решение.
2. Синтезиране на примерен проект на безжична мрежа в сложна архитектурна среда.
3. Симулационно изследване на разпространението на радиосигнала и създаване на алгоритъм за хибридна среда.
4. Разработване на симулационен модел в програмна среда на Matlab и WinProp за изследване затихването на радиосигналите, разпространяващи се през различни строителни материали.

Методи на изследване

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

Практическо приложение

На базата на направените симулационни изследвания в софтуерната среда на продуктите "Matlab", „WinProp”, „WallMan”, „AMan” и др., са представени са примерни проекти на радиопокрытие и разпространение на сигналите в безжична мрежа, демонстриращи взаимната обвързаност на параметрите в тях. Получените резултати могат да послужат до създаване на методологии от процедури, свързани с коректни подходи при планиране, изграждане и експлоатация в безжични мрежи, чрез определяне на оптимални диапазони на изменение на конкретни технически параметри и критерии, свързани с подобряване на възможностите на радиоразпространение на сигналите в конкретни среди.

Апробация на работата

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

- Международна научна конференция UNITECH 2016 -17г., България;
- Международна научна конференция – RU&CY', Научни трудове на Русенски Университет – 2016 и 2017 г.;
- Научно списание с международен редакторски борд – ИЗВЕСТИЯ на Технически университет – Габрово, 2018 г.

Публикуване

Основните резултати от дисертационния труд, са представени в 5 публикации, които са докладвани в международни научни конференции и са публикувани в сборници и международни научни списания. По темата на дисертацията са публикувани четири доклада на международни научни конференции в България и една статия в реферирано международно списание на ТУ - Габрово.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа 4 глави, изложени на 127 страници, в които са включени 56 формули, 141 фигури и 22 таблици. Списъкът на литературните източници е съставен от 117 заглавия, от които 5 на кирилица, 109 на латиница и 3 Интернет адреса.

Б. КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА ПЪРВА - АНАЛИЗ НА СЪВРЕМЕННОТО СЪСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМИ И ПЕРСПЕКТИВИ НА БЕЗЖИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ КАНАЛИ И СТАНДАРТИ

1.1. Обзор и развитие на безжичният стандарт IEEE 802.11

Технологията за радиокомуникация Wi-Fi (Wireless Fidelity), специфицирана във фамилията от стандарти IEEE 802.11, е предназначена за изграждане на Ethernet съвместими локални безжични мрежи. Нейното основно преимущество е възможността да бъдат лесно и икономично реализирани неголеми по мащаб гъвкави мрежови конфигурации, които са в състояние да допълват традиционните кабелни мрежи за достъп. Сравнение на отделните стандарти е показано в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Сравнителна таблица за стандарти 802.11

Протокол	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n		802.11ac
Честота на носещата	5,7 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2.4 GHz / 5 GHz		5 GHz
Обхват (в сграда)	~35 метра	~38 метра	~38 метра	~70 метра		-
Обхват (на открито)	~120 метра	~140 метра	~140 метра	~250 метра		-
Дата на излизане	Септември 1999	Септември 1999	Юни 2003	Октомври 2009		Ноември 2011
Максимална скорост на прехвърляне на данни	54 Mbit/s	11 Mbit/s	54 Mbit/s	72 Mbit/s	150 Mbit/s	От 433 Mbit/s до 6.93 Gbit/s

Модуляция	OFDM	DSSS	OFDM, DSSS	OFDM		OFDM
Ширина на честотния канал	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz	40 MHz	80 MHz ~ 160 MHz
Допустими потоци от данни едновременно	1	1	1	4		8

1.2. Използвани мрежови топологии в безжичните мрежи

Мрежовите топологии в безжичните мрежи дефинират начина на изграждане на конкретната мрежа, както и режима на работа на комуникационното оборудване. Според вида на оборудването, безжичното оборудване се разделя на два основни вида – клиент, ролята, на който обикновено се поема от компютър с инсталирана безжична мрежова интерфейсна платка (Network Interface Card, NIC) и точка за достъп (Access Point, AP).

1.3. Анализ на математични модели, прилагани при симулационни и експериментални изследвания на безжични мрежи и проблеми при разпространение на радиовълни

При създаване на мобилни радиосистеми са необходими математични модели за разпространение на вълните, чрез които да се определят характеристиките на разпространение за каква да е произволна конфигурация. Изискват се проучвания за точно планиране на обхвата, определяне на ефекта от многолъчево разпространение на вълните, както и интерференцията, и изчисляване на клетките. Всичко това е в основата на планирането на мрежи от високо ниво. Явленията, които влияят върху разпространението на радиовълните, може най-общо да се обобщят като четири основни механизма: отражение (reflection), дифракция (diffraction), проникване (penetration) и разсейване (scattering). За практическо използване на моделите на разпространение в реални сценарии, тези механизми трябва да бъдат описани чрез апроксимации. Това изисква процес на многоетапно моделиране, което включва определение на математическото приближение за механизми за/на/ физическо разпространение.

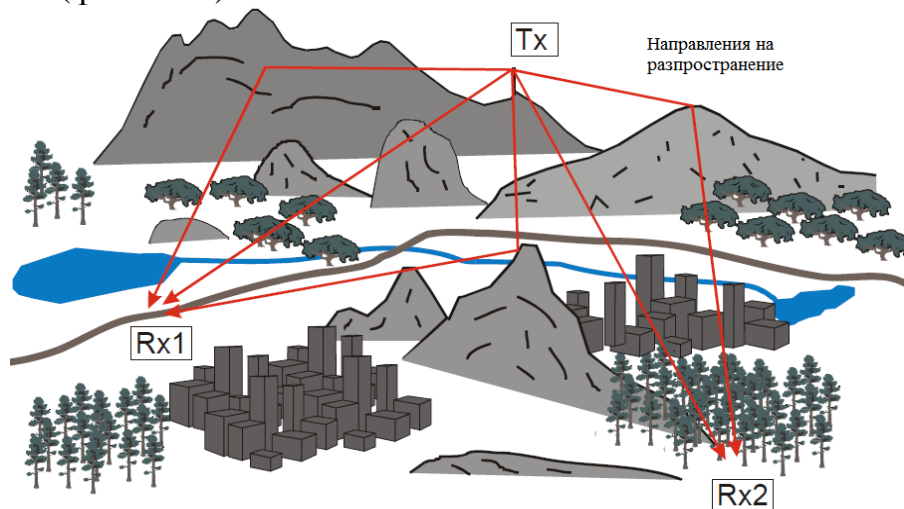
В различни среди се изискват различни модели на разпространение както по отношение на доминантния физичен феномен на разпространение, така и за спецификация на използваната база данни, описваща очакваното развитие. По-долу всички модели, използвани за една среда и вид клетка се разглеждат в отделни точки.

1.3.1. Модели за външно разпространение

При макроклетъчния модел на прогнозиране обикновено се използва праволинейно разпространение, включващо множество отклонения по местността и сградите. Разпространението и отразяването от хълмове, планини и сгради може като цяло да не се взема под внимание, тъй като базовата станция е разположена над заобикалящите препятствия с цел да

покрие по-голяма площ. Възможно приложение е, например, предаватели или базови станции, разположени в много рядко населени местности.

Прогнозите се основават върху познаването на топографията, използването на земята и в някои модели се дава допълнителна информация за височината на сградите. Тази част описва различните подходи към модела на разпространение според различните видове местности – (фиг. 1.11).



Фиг. 1.11. Ситуация на разпространение на радиовълните във външна среда

За прогнозата са необходими топографски бази данни (цифров елевационен модел, DEM). Те се състоят от двоично съхранявана информация в пиксели с произволна резолюция, например 50м x 50м. Във всеки случай, резолюцията в базата данни трябва да остане постоянна.

Освен това, структурните данни могат да бъдат разглеждани посредством стойностите, получени с цел подобряване точността на модела. Тези данни също се съхраняват като двоични. Различните структурни характеристики са кодирани, например: град, предградия, гора, вода, поле.

1.3.2. Модел на Хата-Окумура

Моделът Хата-Окумура е емпиричен подход за прогнозиране при макроклетъчни местности, основан на оценката на интензивни измервания при честота между 200 MHz и 2 GHz с вертикална поляризация. Уравненията, получени от данните на измерванията, изискват единствено следните четири параметъра: честота, разстояние между предавателя и приемника, височина на антената на предавателя, височина на антената на приемника. Този модел използва много кратко време за изчисление.

С цел подобряване точността на този емпиричен модел може да бъде използвана ефективна височина на антената. Профилът на местността между предавателя и приемника не оказва влияние.

Основната загуба при предаване в градска местност се изчислява според следните формули [17,33,40]. Съществува уравнение за основните

загуби и различни условия за корекция според различните среди на разпространение (гъсто населена градска местност, предградия и открити площи):

$$L = 69.55 + 26.16 \cdot \lg\left(\frac{f}{\text{MHz}}\right) - 13.82 \cdot \lg\left(\frac{h_{\text{eff}}}{m}\right) - \frac{c(h_r)}{\text{dB}} + \left(44.9 - 6.55 \cdot \lg\left(\frac{h_{\text{eff}}}{m}\right)\right) \cdot \lg\left(\frac{d}{\text{km}}\right) \quad (1.1)$$

Освен формулите за градския случай, има и няколко модификации за селски и открити територии. Това изисква следните уравнения:

$$L_{\text{rural}} = \frac{L}{\text{dB}} - 2 \left[\lg\left(\frac{f/28}{\text{MHz}}\right) \right]^2 - 5.4 \quad (1.5)$$

$$L_{\text{open}} = \frac{L}{\text{dB}} - 4.78 \left[\lg\left(\frac{f}{\text{MHz}}\right) \right]^2 + 18.33 \cdot \lg\left(\frac{f}{\text{MHz}}\right) - 40.94 \quad (1.6)$$

Тези формули представят разпространението на радиовълната като стабилен процес, понеже профилът на терена между предавателя и приемника не се взема предвид, т.е. в случай, че има хълм между предавателя и приемника резултатите не се повлияват. Освен това, някои локални фактори, като отразяване или сянка в близост до приемника, също са пренебрегнати.

COST 231 разширява модела Хата-Окумура до честотния диапазон между 1500 MHz и 2000 MHz чрез анализ на графичните зависимости на разпространение на Окумура в горния честотен диапазон. Тази комбинация се нарича модел на COST-Хата [15,18]:

$$L = 46.3 + 33.9 \cdot \lg\left(\frac{f}{\text{MHz}}\right) - 13.82 \cdot \lg\left(\frac{h_{\text{eff}}}{m}\right) - \frac{c(h_r)}{\text{dB}} + \left(44.9 - 6.55 \cdot \lg\left(\frac{h_{\text{eff}}}{m}\right)\right) \cdot \lg\left(\frac{d}{\text{km}}\right) + \frac{C_m}{\text{dB}} \quad (1.7)$$

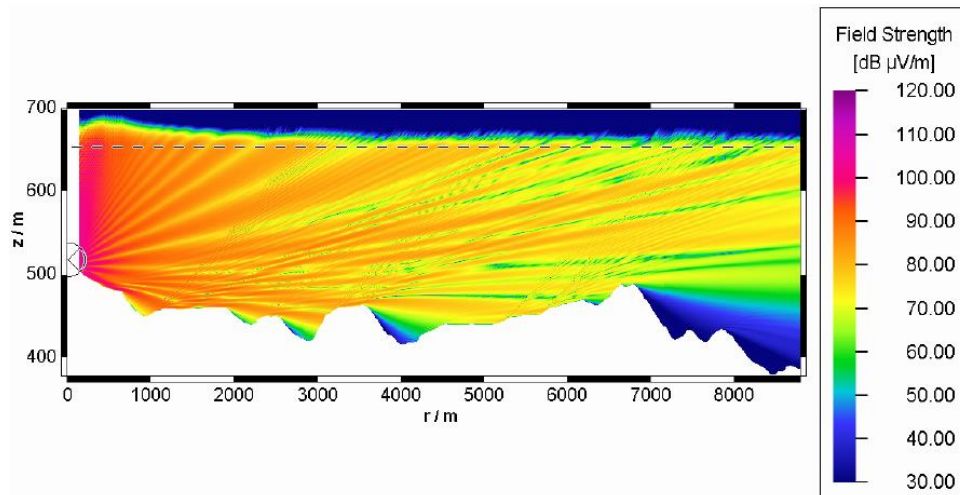
Формулата на Хата и неговата модификация не следва да се използват за микроклетки [26,29].

1.3.3. Метод на параболичното уравнение

Поради ограничената точност на емпиричните модели, съществува необходимост от методи, описващи пречупването и процесите на праволинейно разпространение при нееднороден терен, т.е. ефектът на местността при широк мащаб. С тази цел се използва методът на параболичното уравнение като една ефективна възможност.

Този метод използва приблизително изчисление на параболичното уравнение (ПУ) с цел да се изчисли нивото на сигнала на местността, покрита от макро клетката, според данните за терена. Тъй като различните механизми на разпространение (свободно разпространение, отразяване и пречупване) се подразбират, този модел на разпространение е много точен. Заради по-сложния алгоритъм, времето за изчисление е доста дълго в сравнение с емпиричните модели.

Прогнозният участък на фиг. 1.14 показва интензитета на полето в изкуствената поглъщаща среда над пунктираната линия.

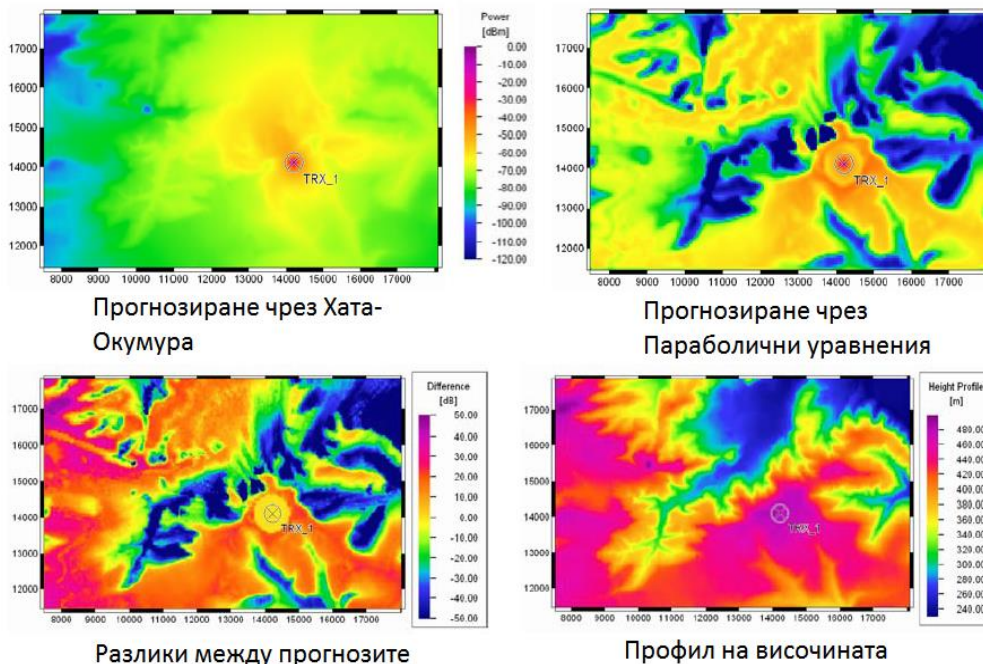


Фиг. 1.14. Примерна прогноза (945 MHz, вертикален изглед на терена)

1.3.4. Сравнение между двата модела

Фиг. 1.17 показва два прогнозни резултата (модела на Хата-Окумура и модела на параболичното уравнение), а също и височинния профил и разликата между тях.

При разглеждане на разликите и като се има предвид височинния профил, методът на параболичното уравнение отчита доста по-добре ефекта на сянката при наличието ѝ в ниските точки. От друга страна, моделът Хата-Окумура е твърде песимистичен в случаите, когато и предавателят, и приемникът са разположени на хълмове.



Фиг. 1.17. Сравнение на два различни макроклетъчни прогнозни модела

Съществуват и последващи подходи за прогнозиране силата на полето в широки терени, основани на топографска база данни. За тази цел профилът на терена трябва да бъде представен чрез прости геометрични обекти. Приближение на профила на терена се получава чрез заместване на

препятствията по терена с поглъщащи цилиндри, призми или остриета, в зависимост от оценката на кривата. Това води до т.нар. техника на „заместващите препятствия”. Тук разпространението се описва като феномен на многократното пречупване, където отражението не се взема предвид.

Математични модели за разпространение в градска среда

Проектирането и употребата на персоналните системи за комуникация изискват прогноза за разпространение на вълната, свързана с изчислението на сигнал/шум и сигнал/интерференция в клетъчната система. Водещата характеристика на тези модели е отражението, пречупването, засенчването от определени препятствия и насочването на вълната в уличните стеснения. За вземане на тези ефекти под внимание при модела на разпространение, е необходимо да се придобие познание върху всички траектории на разпространение. Те зависят основно от височината на антената на базовата станция с оглед на височината на околните сгради.

С цел опростяване на модела на разпространение са разработени няколко двуизмерни емпирични модела, определящи разпространението над покривите като основен механизъм на разпространение. Моделът на Уолфиш-Икегами, който със съдействието за изследване от европейска страна на COST 231 е подобен аналитичен подход с емпирични уравнения и корекционни фактори.

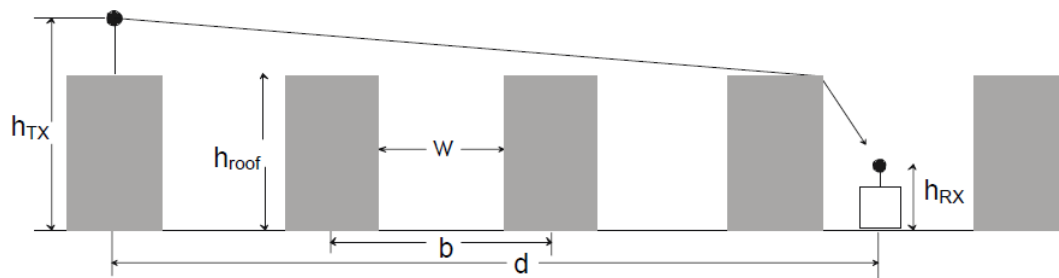
Втората група микроклетъчни прогнозни модели е детерминистична и използва лъчево-оптични методи. Те представят триизмерна загуба по трасето, съобразена с характера на местността и прогноза за разпространение на сигнала, включваща импулсна характеристика за базова станция, намираща се както над, така и под покривното ниво. Описаните модели като цяло са приложими само за градски терен, което означава, че стандартното отклонение на височината на терена е малко, в сравнение със стандартното отклонение на височината на сградите в разглежданата местност. В случай, че не е така, трябва да се вземе предвид влиянието на терена с адекватно приложение на гореспоменатите методи.

1.3.5. Емпиричен модел на COST-Уолфиш-Икегами

Така наречените емпирични модели (например моделът на Уолфиш-Икегами) разглеждат единствено разпространението във вертикална проекция, те съдържат предавател и приемник. За прогноза на силата на полето основните параметри се извличат от вертикалната част (напр. височина на сградата).

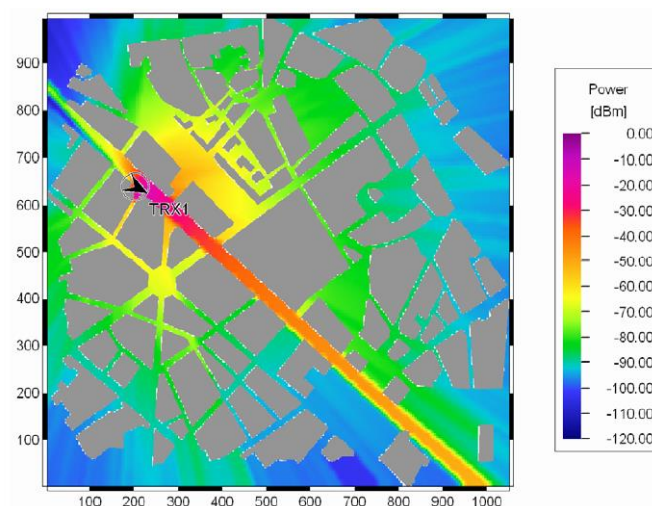
Емпиричният модел е разработен по време на европейския проект COST 231 като комбинация от моделите на Уолфиш и Икегами. Моделът позволява по-добра оценка на загубите по трасето, като се разглеждат повече данни, описващи характера на градската среда и по-конкретно: височина на предавателя; височина на приемника; средна стойност на височината на сградите; средна стойност на широчината на пътищата;

средна стойност на разстоянието между сградите; ориентация на пътя по отношение на директната радиотраектория. Фиг. 1.21 показва геометричните параметри, използвани за изчислението с модела COST 231.



Фиг.1.21. Типичен случай на разпространение в градски части и определение за параметрите, използвани при модела COST-Уолфиш-Икегами

Този модел остава статистичен, а не детерминистичен, т.е. само стойностите на характеристиките му се вземат предвид при прогнозата. Моделът разграничава базова станция и мобилна антена в уличните стеснения – прилага се проста формула за изчисляване на загубата при разпространение, която се различава от загубата в пространството.



Фиг. 1.22. Прогноза по метода COST-Уолфиш-Икегами в градска местност

С този емпиричен подход не е възможно да се прогнозира широките характеристики на мобилния радиоканал, напр., забавянето в разпространението на импулсната реакция [23,24,27].

Отчитане на топографията

Имайки предвид влиянието на информацията от базата данни върху точността на прогнозата, профилът на терена трябва да бъде отчетен за моделирането на разпространението, в случай, че разглежданата градска част не е равна. С този подход формите на сградите остават постоянни, докато подредбата на сградите една срещу друга се променя. При използване на интелигентното проследяване на лъча, трябва да се отчете топографията с цел определяне на връзките на видимост между елементите в базата данни за сградите. Следователно, засенчването от хълмове трябва

да бъде отчетено за всички връзки на видимост. Допълнителните пътища на лъча, получени от топографията (например, дифракция в земната повърхност) не се отчитат, тъй като тяхното влияние може да бъде пренебрегнато в градски условия.

За прогнозата отново трябва да бъдат използвани разместени сгради с цел определяне на елементите (плочи, сегменти и приемни точки), които имат директна линия към предавателя. Заради топографията е възможно площта със загуба на сигнала от предавателя да бъде значително променена [35,41,49].

1.3.6. Основи на лъчевите оптични модели

Мобилният радиоканал в градска среда се характеризира от силно разнопосочно разпространение. Водещите механизми на разпространение в тези случаи са отражението, дифракцията, засенчването от различни препятствия и насочването на вълната в уличните стеснения. Лъчевият оптичен подход позволява разглеждането на тези ефекти в модела на разпространение.

Основните проблеми са свързани със следните общоизвестни фактори:

-Отражение

-Дифракция

-Многократна дифракция

-Разсейване

-Проникване и поглъщане

-Проследяване на лъча/пускане на лъча

Моделите за лъчево-оптично разпространение често се използват за прогнозиране силата на електромагнитното поле в градска среда. Те са много точни, т.к. отчитат ефектите от насочването на вълната в уличните стеснения и включват дифракцията на клинове. Съществуват два различни подхода, определящи пътя на лъчево-оптичното разпространение между предавателя и приемника: проследяване на лъча и пускане на лъча.

Видове пътища - Съществуват различни видове лъчи (директни, отразени, пречупени), особено когато разглеждаме комбинацията от отражение и многократна дифракция. Загубата по трасето, получаваща се при тези лъчи, зависи от броя и вида на взаимодействието. Затова различните видове лъчи се подреждат в групи според очакваната загуба по трасето. При прогнозирането видът лъчи, който трябва да бъде взет под внимание, се определя чрез т.нар. видове пътища.

Изчисляване на ролята на всеки лъч - При изчисляване на лъчите трябва да се вземе под внимание не само загубата в свободното пространство, но и загубата, причинена от отразяване и (многократно) пречупване.

Това се извършва или чрез физически детерминистичен модел, или чрез емпиричен модел.

Детерминистичният модел използва Френелови уравнения за определяне загубата при отразяване и предаване и геометричната/общата теория на дифракцията за определяне на загубите при пречупване. Този модел има малко по-дълго време за изчисляване и използва три физични параметъра - диелектрична проницаемост, магнитна проницаемост и специфична проводимост.

Емпиричният модел използва пет физични параметъра (минимална загуба на падащия лъч, максимална загуба на падащия лъч, загуба на пречупения лъч, загуба при отразяване, загуба при предаване). За корекция или адаптация към измерването може да бъде зададена някаква противотежест.

По този начин емпиричният модел има предимства, които необходимите физически характеристики могат по-лесно да се получат, в сравнение с физичните параметри, необходими за детерминистичния модел. Освен това, свойствата на емпиричния модел могат по-лесно да бъдат измерени. Следователно, по-лесно е да се постигне висока точност чрез емпиричния модел.

1.3.7. Описание на вътрешните модели

Покритието на сградите отвътре е много важно за планирането на мобилните радио мрежи. За това са разработени модели за оценяване на вътрешното покритие. Тези модели позволяват да се изчисли вътрешното покритие от широкомащабна градска прогноза.

Използваме термина „оценяване”, защото прогнозата се изчислява без отчитане на вътрешната структура на сградите. Това по принцип намалява точността на прогнозата.

Два различни модела

Съществуват два модела. И двата се основават на загубата при проникване (която е равна на материалния параметър загуба при пренос).

Първият модел, който е емпиричен модел, изчислява напрегнатостта на полето във вътрешността на сградата чрез усредняване на прогнозните стойности според пикселите около сградата и изваждане на загубата при пренос.

Вторият модел, който е полу-детерминистичен, отчита ъгъла на падащите лъчи. Ако емпиричният модел на COST-Уолфиш-Икегами се използва, информацията за ъгъла не е налична и се смята за 90° . Освен това, за интелигентното проследяване на лъча няма информация за ъгъла, което води до постоянна загуба при проникване.

Емпиричен модел

При емпиричния модел трябва да се уточни допълнителната загуба от пода l_s (в dB/m). Силата на полето при височина h_2 се изчислява от първоначално изчислената сила на полето при височина h_1 , което е същата височина като тази при предварителна обработка в градски условия:

$$E(h_2) = E(h_1) + (h_2 - h_1) \cdot L_s \quad (1.35)$$

Допустимите стойности за загубата от пода са между 0,5 и 1,5 dB/m.

Това естествено води до по-високи стойности при по-високите етажи. Включва се ограничение в силата на полето, изчислено извън сградите.

Вътрешни модели на разпространение

Определянето на характеристиките на разпространение между две антени вътре в сграда е важно, особено при проектиране на безжични мрежи за телефония и безжични локални мрежи (WLAN – Wireless Local Area Networks). Използване на модели за разпространение в закрити площи се налага и при инсталиране на клетъчни системи с разположение на базовите станции на закрито.

Разгледаните модели на разпространение може да се разделят на три групи:

- Емпирични теснолентови модели;
- Емпирични широколентови модели;
- Детерминистични модели.

Емпиричните теснолентови модели се изразяват под формата на прости математически уравнения, които дават загубите по пътя на разпространение като изходен резултат. Изразите са получени чрез нагаждане на модела към резултати от реални измервания. Емпиричните широколентови модели (Доминиращи пътища) от своя страна позволяват да се определят широколентовите характеристики на канала (напр. закъснението от разпространение). Детерминистичните модели са метод за изчисляване, който физически симулира разпространението на радиовълните. Чрез тези методи се добива едновременно теснолентова и широколентова информация за мобилния радио канал в сградата.

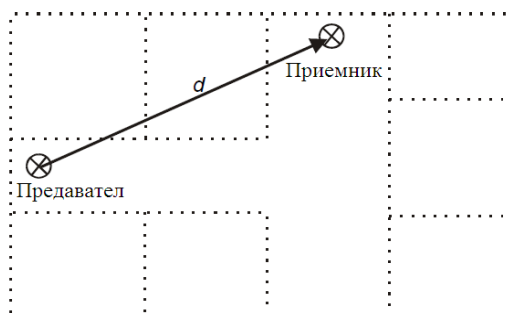
1.3.8. Модифициран модел за разпространение в свободното пространство

Модифицираният модел за разпространение в свободното пространство (MF – Modified-Free-Space Model) анализира разпространението на вълните в сградата вземайки под внимание разстоянията между стените и загубите от проникване на стените, но не разглежда индивидуалното разположение на стените и свойствата на материала, от който са направени (фиг. 1.30). Поради това този модел изчислява загубите от разпространение по начин, подобен на загубите в свободното пространство, но с коригиращ коефициент и отместване. Тук се предполага, че допълнителните загуби от разпространение са линейно зависими от разстоянието, като връзката се дава със определен коефициент на затихване n :

$$l_{MF} = n \cdot 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) + l_c \quad (1.36)$$

Модифицираният модел за разпространение в свободното пространство не разглежда стените на сградата, следователно той не

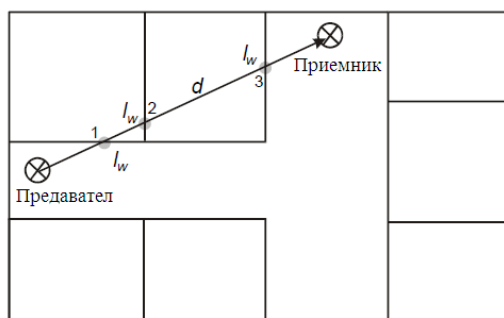
изисква тази база от данни. Използвайки константни стойности за n и l_C при определяне на интензитета на полето може да се види, че интензитетът в околностите на предавателя постепенно ще намалява с отдалечаване от него по концентрични окръжности.



Фиг. 1.30. Принцип на модифицирания модел за разпространение в свободното пространство

1.3.9. Модел на Моутли-Кийнън

Моделът съгласно Моутли и Кийнън изчислява загубите по пътя на базата на директен лъч между предавателя и приемника. Противоположно на модифицирания модел за разпространение в свободното пространство, този модел разглежда и взема под внимание точното разположение на стените, подовите и таваните на сградата. Като допълнителни фактори за поглъщането на директно разпространяващия се лъч от стените се разглеждат и т.нар ефекти на засенчване.



Фиг. 1.31. Принцип на модела на Моутли – Кийнън

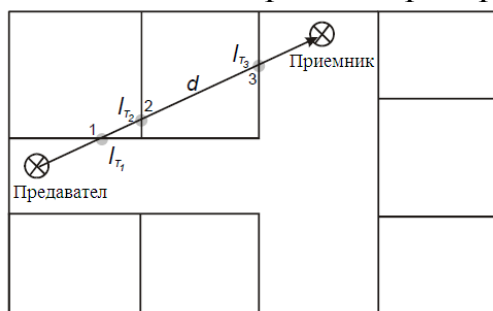
$$l_{MK} = l_{FS} + l_C + k_w l_w \quad (1.37)$$

Както е показано на фиг. 1.31 параметъра k_w описва броя стени, които се пресичат от директния лъч на разпространение между предавателя и приемника. За изчисленията се използват загубите от равномерно разпространение (проникване) l_w през всички стени, т.е. материалните свойства на отделните стени не се вземат под внимание.

1.3.10. COST-многостенен модел

Многостенния модел (Multi-Wall Model – MW) дава загубите от разпространение по следния начин: загубите в свободното пространство се сумират със загубите от проникване на директния лъч през стените и

подовете при разпространение между предавателя и приемника (фиг. 1.32). Установено е, че общите загуби през подовете са функция на броя подовете, през които прониква лъча. Тази характеристика се взема под внимание чрез въвеждане на допълнителен емпиричен коригиращ коефициент.



Фиг. 1.32. Принцип на многостенния модел

Загубите от проникване за отделните стени (зависещи от свойствата на материала от който са изградени), се използват за определяне на загубите от разпространение.

От друга страна, този модел има ниска зависимост към точността на базата данни и поради простия си подход – много малко време за изчисления. Следователно при изчисления не се налага предварителна обработка на данните за сградата и не се налага да се адаптират настройки за този модел.

Една от основните идеи за този подход на моделиране е бързото определяне на доминиращите пътища. Докато принципно е възможно да се определят всички лъчи с алгоритъм за трасиране на лъчите, а след това комбиниране на различните групи от лъчи по доминиращи пътища, новия и много бърз алгоритъм е разработен именно за определяне на доминиращите пътища. Този алгоритъм е бърз колкото моделирането с емпирични модели [14,29,31,39].

1.4. Анализи и изводи към първа глава:

1. Динамичното развитието на стандартите за безжична комуникация IEEE 802.11 (Wi - Fi) в последните години увеличи съществено скоростите на трансфер, обхвата на външно и вътрешно разпространение на сигналите и използвания честотен спектър. Всичко това е от съществено значение при проектирането, симулирането и правилното конфигуриране на безжичната мрежа.

2. Използваните мрежови топологии в безжичните мрежи дефинират начина на изграждане на конкретната мрежа и са от съществено значение за режима на работа на комуникационното оборудване.

3. Анализа на математическите модели на разпространение води до ясна представа за решение в конкретен случай на спецификата на средата на външно, вътрешно и хибридно разпространение, свързани със силата на полето и лъчите на радиоразпространение, както и проблемите на дифракция, отражение и пречупване.

4. При планирането на покритието основната задача е да се намери компромис между големината на обхвата на радиопокрытие на предавателите и спецификата на средата.

5. Тъй като радиоспектърът е ограничен ресурс, се налага отделните радиоканали да бъдат правилно честотно планирани и да се избегнат проблемите на интерференцията.

6. Височината на антената и нейното правилно позициониране силно влияе върху границите на покритие от една зона, а следователно и върху максималното използване на честотите (т.е. върху капацитета).

ГЛАВА ВТОРА - МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО НА РАДИОСИГНАЛИТЕ В ГРАДСКА СРЕДА

В тази глава са представени математични модели, чрез които може да се извършат изследвания на параметрите за разпространение на радиосигналите в градска среда. Това дава възможност за определяне на оптималните стойности на сигнала, достигнал до всеки краен потребител в сложна градска среда. За целта е използвана кадастрална карта на реален град, като са отразени точно височините на сградите (от 4m до 45m), улиците и прилежащата инфраструктура. Това дава възможност да се направи сравнителна оценка на възможностите на различните модели за разпространение на сигналите в градска среда.

Реализирано е симулационно изследване с помощта на софтуерния продукт WinProp на фирмата AWE Communications. Използвани са различни математични модели за разпространение на радиосигнала, които отчитат не само загубите от разпространение на директния лъч, но и от отразените и дифрактирални лъчи.

2.1. Математическо моделиране на разпространение на радиосигналите в градска среда

Моделите на загубите при разпространение на радиосигналите позволяват да се определи нивото на приетия сигнал във функция от разстоянието, а от там да се прогнозира отношението сигнал/шум на входа на приемниците. Повечето известни модели на разпространение на електромагнитната вълна са определени, използвайки аналитични и емпирични зависимости. Емпиричните зависимости се получават при определени условия, след апроксимация на множество измерени данни.

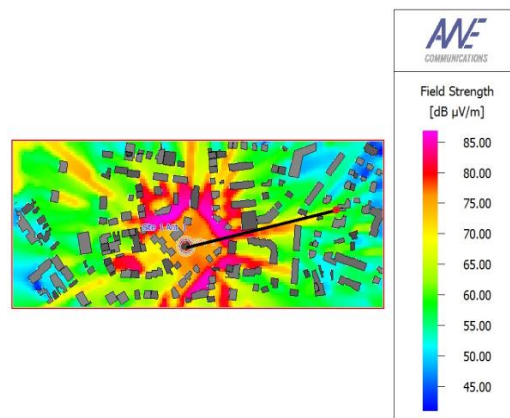
2.2. Изследване на разпространение на радиосигнали чрез използване на виртуална среда

Проектиране на виртуална основа

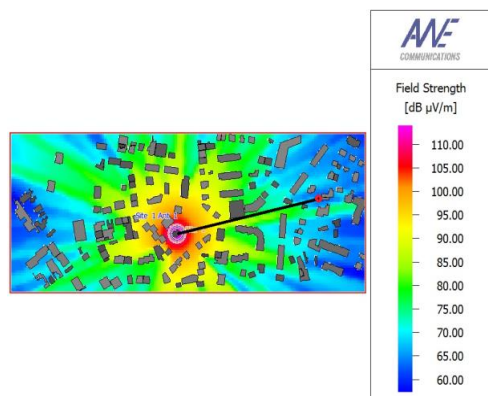
Виртуалната основа е база данни, чрез която се създава виртуална среда за разпространение на радиосигнали и изчисляване на покритието на определени външни зони чрез математични модели за разпространение.

Симуляционното изследване сравнява данните, получени при използването на три от математичните модели за разпространение на радиосигнали в градски условия. Изследването е реализирано с ненасочена (omni directional antenna) при честота 2000 MHz и максимална еквивалентна изотропно излъчена мощност 1 W. Използвайки подходящи математични модели за външно разпространение, изследването започва с разполагането на една базова станция върху покрив на сграда с височина 40 m и антенна мачта с височина 5 m [85,88].

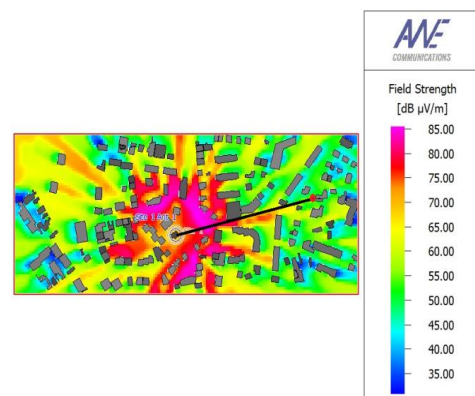
Направени са симуляционни изследвания с три различни математични модели на разпространение на радиосигналите. При първият случай е използван модел с доминантен лъч, при втория е използван емпиричен модел, базиран на стандарта COST 231 разширен модел на Walfisch-Ikegami, при третия емпиричен модел е с отчитане на дифракцията (Knife Edge Diffraction). На фиг. 2.6, фиг. 2.7 и фиг. 2.8 в двуизмерен вид са визуализирани резултатите от трите изследвания, като са показани стойностите на параметрите на интензитета на електричното поле в (dB μ V/m).



Фиг. 2.6. Интензитет на електричното поле при модел на разпространение с доминантен лъч

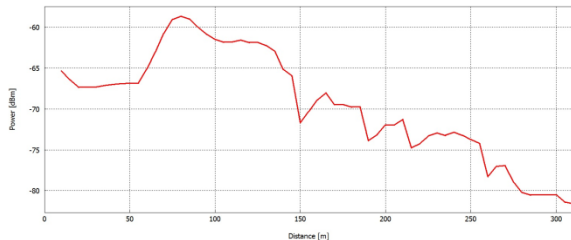


Фиг. 2.7. Интензитет на електричното поле при емпиричен модел базиран на стандарта COST 231 разширен модел на (Walfisch-Ikegami)

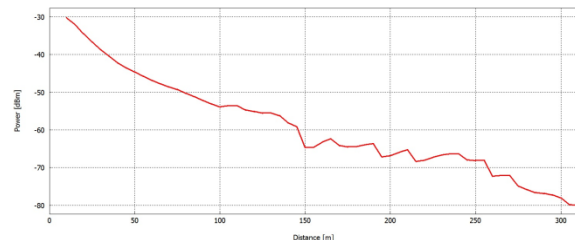


Фиг. 2.8. Интензитет на електричното поле при емпиричен модел с дифракция (Knife Edge Diffraction)

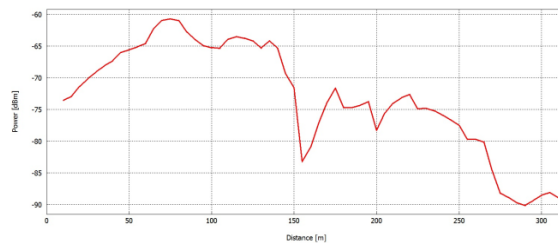
Направен е сравнителен анализ на параметрите: интензитет на електричното поле ($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$), мощност на радиосигнала (dBm) и загубите от затихване на сигналите вследствие разпространението (dB). Получени са графични зависимости, използвайки и трите математични модела на разпространение, като графиките дават връзката между мощността и загубите от затихване на сигналите във функция от разстоянието до базовата станция. На фиг. 2.9, фиг. 2.10 и фиг. 2.11 са показани графики на мощността на сигнала във функция от разстоянието.



Фиг. 2.9. Графичната зависимост на мощността във функция от разстоянието при използване на модел с доминантен лъч

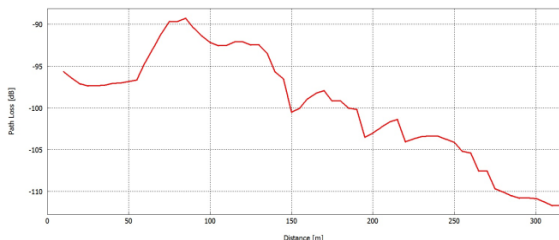


Фиг. 2.10. Графичната зависимост дава връзката на мощността и разстоянието при симулация с емпиричен модел базиран на стандарта COST 231

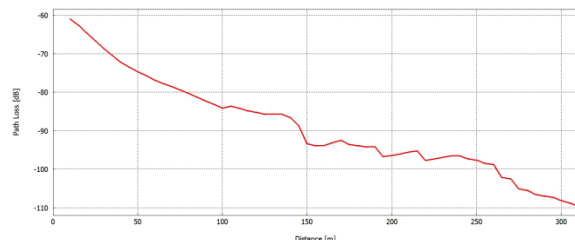


Фиг. 2.11. Графичната зависимост на мощността във функция от разстоянието при симулация с емпиричен модел с дифракция

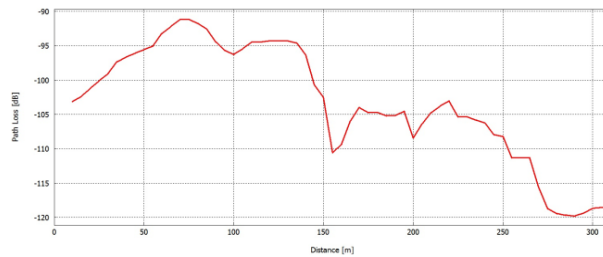
На фиг. 2.12, фиг. 2.13 и фиг. 2.14 са показани графични зависимости на затихване на сигналите вследствие на разпространението във функция от разстоянието. Приемната точка и направлението, по което са снети графичните зависимости се виждат на фиг. 2.6, фиг. 2.7 и фиг. 2.8.



Фиг. 2.12. Графичната зависимост на загубите от разпространение във функция от разстоянието при симулация с използване на модел с доминантен лъч



Фиг. 2.13. Графичната зависимост на загубите от разпространение при симулация с емпиричен модел, базиран на стандарта COST 231



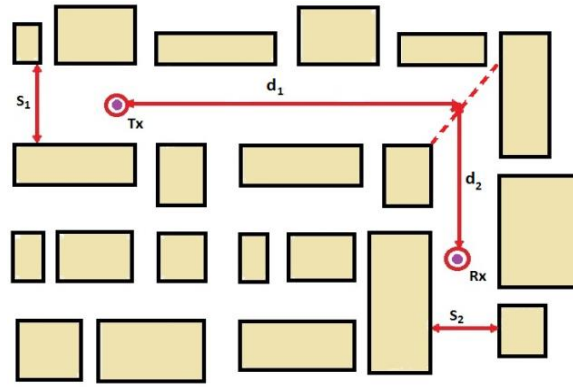
Фиг. 2.14. Графичната зависимост на загубите от разпространение във функция от разстоянието при симулация с емпиричен модел с дифракция (Knife Edge Diffraction)

От анализа на тези резултати се вижда, че използването на емпиричен модел с дифракция (Knife Edge Diffraction) е най – оптимално за гъсто населени градски райони. При използване на модела с доминантен лъч се вижда, че остават не добре покрити зони около сградата, където е поставена базовата станция. При използване на модела базиран на стандарта COST 231 разширен модел на (Walfisch-Ikegami) се наблюдават големи не добре покрити зони в градския район.

2.3. Изчисление на загубите при разпространение в среда със сложна архитектура и зададен честотен обхват

Тук разглеждам изследването на разпространението на радиовълните в сложна градска среда при липса на пряка видимост. Това би дало възможност за точно определяне местоположението на антените в уличните каньони при наличие на засенчване. Симулационното проектиране може да се използва за основа при изграждането на различни мрежи в гъсто застроена среда. Използвана е кадастрална карта на жилищен район, като са отразени точно височините на сградите (от 4 m до 50 m), улиците са с ширина от 8 m до 20 m. Това дава възможност да се направи сравнителна оценка между теоретично и симулационно получени данни за затихване на радиосигнала.

Анализирани са три случая на разположение на предавателната антена по централния булевард на града и е изчислено затихването на радиосигнала в странична улица при липса на пряка видимост. Отчита се влиянието на отразени и пречупени радиолъчи от сградите, включително и от техните ъгли. Симулационното изследване е направено с програмен продукт WinProp [17, 115], като са използвани едни и същи входни данни за различните математични модели. Изчисляване на загубите при разпространение на радиосигнала при липса на пряка видимост (N_{LoS}) за честоти от 800 до 2000 MHz, като на фиг. 2.15 е дадена изследваната ситуация в градска среда.



Фиг. 2.15. Ситуация в градска среда

Изчисляване на загубите при разпространение на радиосигнала при липса на пряка видимост (N_{LoS}) за честоти от 2 до 16 GHz

Моделът на разпространение при N_{LoS} ситуации с ъгли на улиците $\alpha = \pi/2 \text{ rad}$ са дефинирани на база на измервания, направени при честоти от 2 до 38 GHz където $h_1, h_2 < h_r$ и s_2 е до 10 m.

$$L_{NLoS} = L_{LoS} + L_c + L_{att}, \quad (2.6)$$

където: L_{LoS} са загубите от разпространение на радиосигнала при наличие на пряка видимост, когато разстоянието $d_1 > 20 \text{ m}$,

L_{corner} се приема за 20 dB в градска среда или 30 dB при жилищни комплекси

d_{corner} е 30 m и в двата случая.

$$L_c = \frac{L_{corner}}{\log_{10}(1+d_{corner})} \log_{10}(d_2 - d_1/2),$$

където $s_1/2 + 1 < d_2 \leq s_1/2 + 1 + d_{corner}$ (2.7)

$$L_c = L_{corner},$$

когато $d_2 > s_1/2 + 1 + d_{corner}$ (2.8)

$$L_{att} = 10\beta \log_{10} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 + s_1/2 + d_{corner}} \right),$$

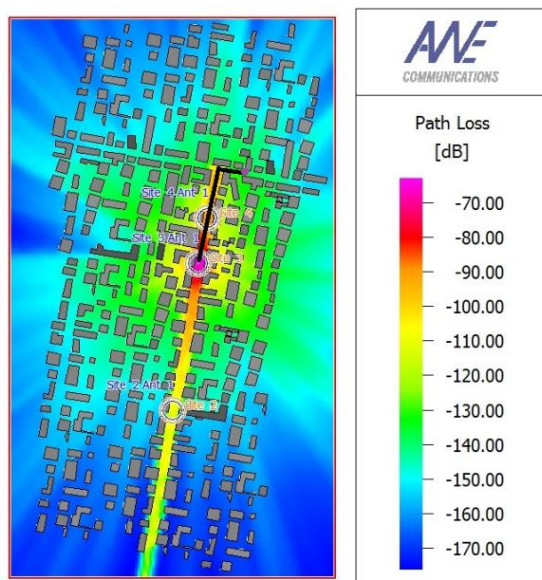
когато $d_2 > s_1/2 + 1 + d_{corner}$ (2.9)

$$L_{att} = 0.$$

когато $d_2 \leq s_1/2 + 1 + d_{corner}$ (2.10)

където: $\beta=6$ в градска среда при наличието на клиновидни сгради.

На фиг. 2.17 за показани получените симулационни резултати от експеримента, реализиран на честота 2 GHz, използвайки модел, подходящ за разпространение на радиосигнала в градска среда при липса на пряка видимост.



Фиг. 2.17. Симулационен експеримент на честота 2GHz

В табл. 2.1 са дадени получените резултати, свързани с теоретичния модел и резултатите от първия симулационен експеримент, като:

L_{NLoS} - загуби от затихване на радиосигнала, използвайки теоретичния модел,

L_{NLoS1} - загуби от затихване на радиосигнала, използвайки Empirical COST-Walfisch-Ikegami модел

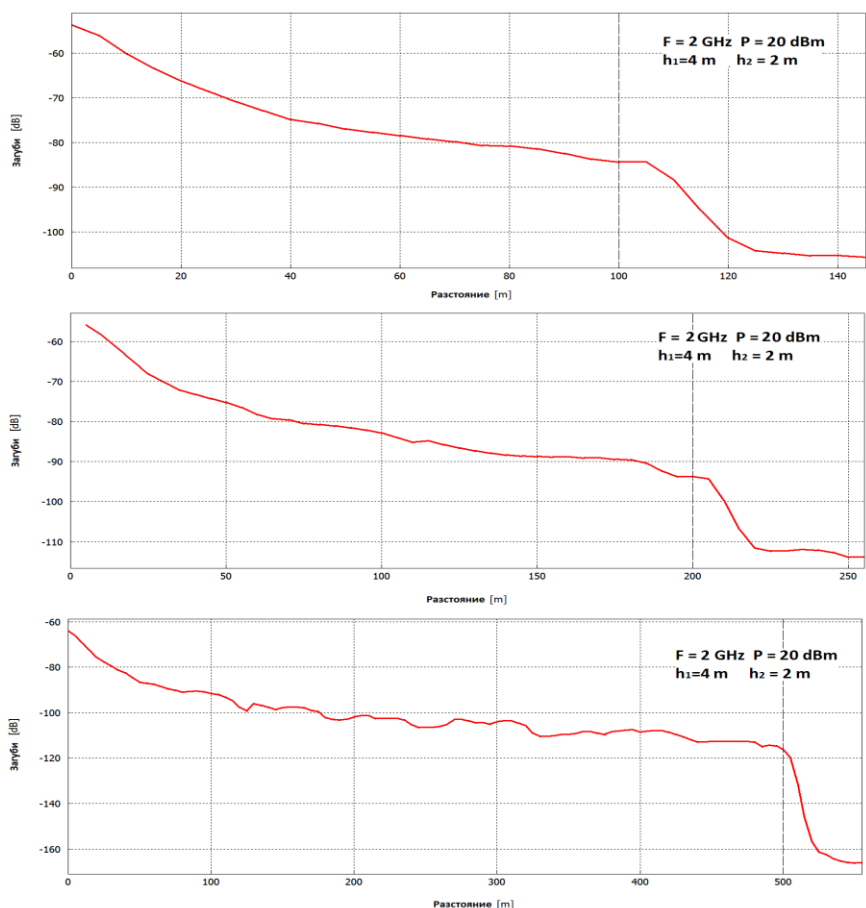
L_{NLoS2} - загуби от затихване на радиосигнала, използвайки Knife Edge Diffraction модел.

Таблица 2.1 Затихване на радиосигнала (N_{LoS}) при честота 2 GHz

	d_1 (m)	d_2 (m)	s_1 (m)	s_2 (m)	L_{NLoS} (dB)	L_{NLoS1} (dB)	L_{NLoS2} (dB)
1	100	50	20	10	100	104	113
2	200	50	20	10	117	113	119
3	500	50	20	10	126	146	143

На фиг. 2.18 са показани получените симулационни резултати от експеримента, реализиран на честота 2 GHz, използвайки същите два модела, подходящи за разпространение на радиосигнала в градска среда при липса на пряка видимост.

Вторият симулационен експеримент е на честота 5 GHz, при мощност на предавателя 30 dBm, при височина на предавателната и приемна антени съответно $h_1=4$ m и $h_2=2$ m.



Фиг. 2.18. Затихване на радиосигнала при трите ситуации на честота 2 GHz

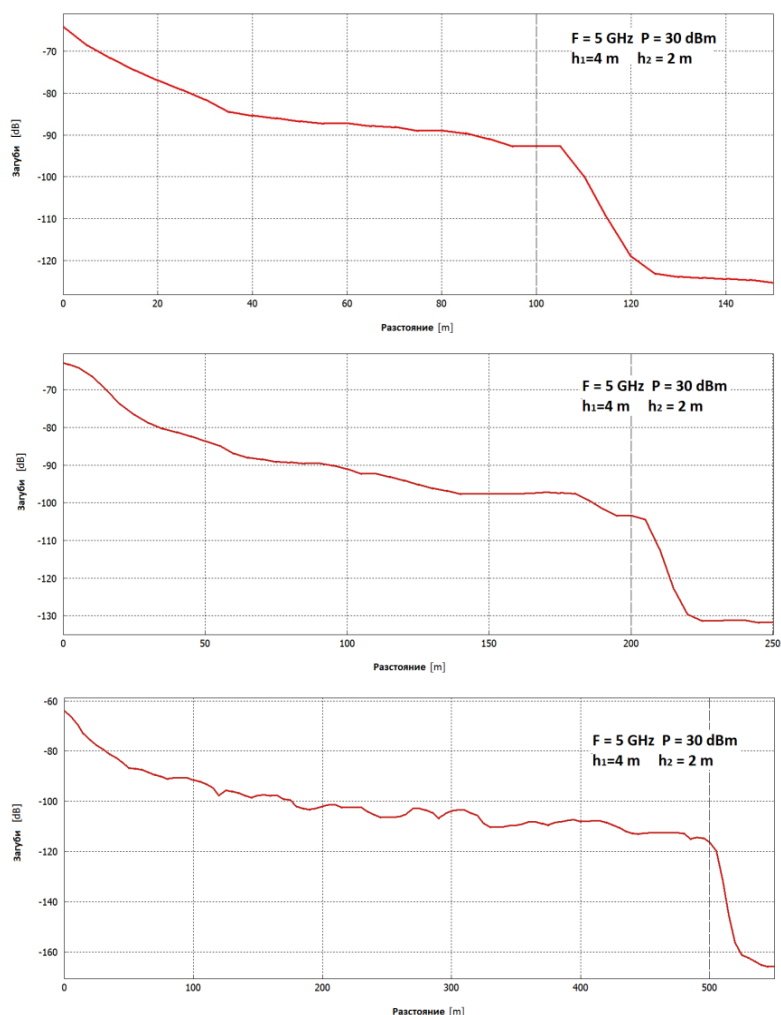
В табл. 2.2 са дадени получените резултати, свързани с теоретичния модел и резултатите от втория симулационен експеримент.

Таблица 2.2. Затихване на радиосигнала (NLOS) при честота 5 GHz

	d_1 (m)	d_2 (m)	s_1 (m)	s_2 (m)	L_{NLoS} (dB)	L_{NLoS1} (dB)	L_{NLoS2} (dB)
1	100	50	20	10	108	123	124
2	200	50	20	10	113	131	133
3	500	50	20	10	120	165	166

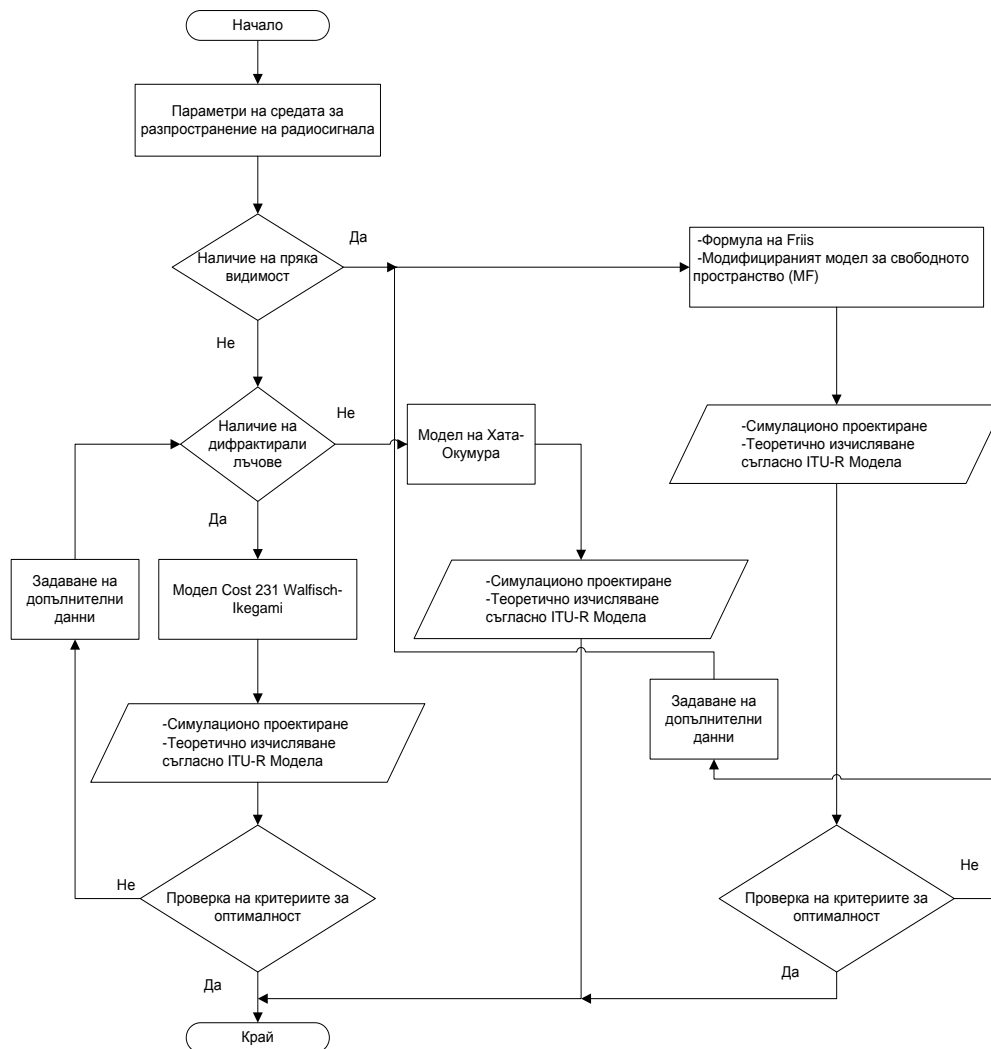
На фиг. 2.20 са показани получените графични зависимости при трите разстояния за честота 5 GHz. На фиг. 2.17 и фиг. 2.19 са визуализирани направленията, по които се извършва измерването, като предавателната антена се намира на височина 4 m. На фиг. 2.18 и фиг. 2.20 са дадени графичните зависимости на затихването на радиосигнала за три конкретни случая за двете честоти (2 GHz и 5 GHz), при разстояния съответно 150 m, 250 m и 550 m, като последните 50 m са в страничната улица, която е с широчина 10 m.

На базата на дотук анализираните модели може да се състави следният алгоритъм, чрез който да се извършва бързо вземане на решение при проектиране, свързан с оптимално решение за избор на модел на разпространение, свързан с реализирането на симулационни и експериментални измервания.



Фиг. 2.20. Затихване на радиосигнала при трите ситуации на честота 5 GHz

На фиг. 2.21 е представен алгоритъм, в началото на който се въвеждат входните данни за проектирането и се взема решение за вида външна среда на разпространение. Вследствие на това се избира съответният математичен модел за външно разпространение на радиосигналите. След избора на математичния модел се пристъпва към оптимално честотно планиране на базата на автоматизирана програмна среда (Win Prop), в която са използвани препоръките на стандартите на ITU-R. Отделните етапи могат да се разширят и разгледат по-подробно на стъпки на изчисляване, проектиране и симулационно тестване за конкретни случаи на външно и вътрешно разпространение на средата, като съм се стремил това да бъде обект на изследване в отделните глави на дисертационният ми труд. Този алгоритъм позволява лесно и бързо да се направи избор на решение за метод на проектиране и симулационно изследване, както и да се търсят мерки за оптимизация на безжично радиопокрытие.



Фиг. 2.21. Алгоритъм за избор на решение за модел на разпространение при проектиране на безжична мрежа

2.4. Изводи към втора глава

В тази глава е внесена реална кадастрална подложка на градски микрорайон в софтуерната среда на WinProp на фирмата AWE Comunications и е извършено симулационно изследване, от което може да се направят следните изводи:

1. Представени са резултатите в тримерен, и двумерен графичен вид на радиочестотното планиране, което позволява да се сравнят резултатите от математическото моделиране в градска среда. Това е необходимо за постигане на по-голямо покритие с радиосигнал на потребителите на мобилни услуги, а също така и за гарантиране на ниски загуби при разпространението на радиосигнала.

2. При използване на математичен модел с доминантен лъч е видимо, че е налична зона на засенчване с радиус от 35 m около сградата, върху която е монтирана антената.

3. От резултатите се вижда, че при използване на емпиричен модел с дифракция (Knife Edge Diffraction) покриването с радиосигнал на градския

микрорайон е най-оптимално. В направената симулация сигналът в точката на приемане при емпиричния модел с дифракция е -80 dBm , което е напълно достатъчно за реализиране на качествена комуникация.

4. Реализиран е симулационен експеримент (използвайки два модела, заложи в автоматизираната среда на WinProp – L_{NLoS1} и L_{NLoS2}) и получените резултати се сравняват с резултатите, получени при използване на теоретичния модел (L_{NLoS}).

При първия експеримент (на честота 2 GHz) съществено различие при анализ на получените резултати се констатира за третия случай (приблизително 20 dB), когато разстоянието на комуникация е 550 m.

5. От графичните зависимости, показани на фиг.2.20 се вижда, че затихването на пресечката на двете улици L_{corner} е от порядъка на 20 dB за първия и втория случай и 40 dB за третия случай. За втория експеримент, реализиран на честота 5 GHz, затихването L_{corner} е съответно 30 dB за първия и втория случай и почти 50 dB за третия случай. И при двата експеримента се вижда, че увеличавайки разстоянието на комуникацията по централната улица (с широчина 20 m) се отклоняваме от теоретичния модел, който дава стойност на затихването на радиосигнала L_{corner} в градска среда от порядъка на 20 dB и 30 dB в жилищни райони. Имайки предвид точността на теоретичния модел, направен на базата на много експериментални измервания и валиден за територията на Европейския съюз е препоръчително при по-големи разстояния (>500 m) да се коригират симулационните измервания, увеличавайки затихването приблизително с 20 dB на честота 2 GHz и с 45 dB на честота 5 GHz.

6. Създаден е алгоритъм за радиочестотно планиране на телекомуникационни мрежи при външно разпространение на радиовълните.

ГЛАВА ТРЕТА - СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО НА РАДИОСИГНАЛА ВЪВ ВЪТРЕШНОСГРАДНА И ХИБРИДНА СРЕДА

3.1. Моделиране на разпространение на сигналите във вътрешноградска среда

Използвани са данни за етаж от примерна сграда, като са зададени точните строителни материали, от които е изградена съществуващата сграда. Цифровата подложка е с размери: дължина 50 m, ширина 22 m и височина 3 m. В използваната симулационна подложка са нанесени и различни по вид интериорни мебели като маси, столове и др. изработени от различни материали. Това дава възможност да се направи сравнителна оценка на възможностите на различните модели за разпространение на сигналите в сложна архитектурна среда.

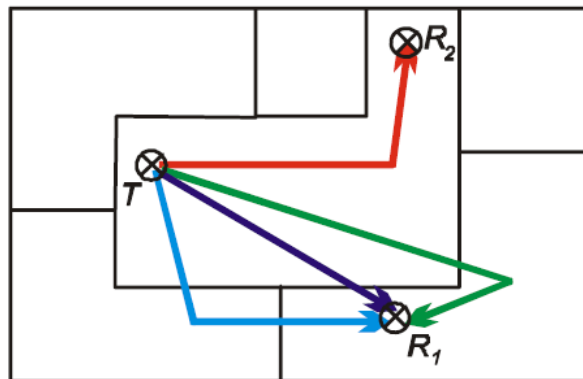
Реализирано е симулационно изследване с помощта на софтуерния продукт WinProp на фирмата AWE-Communications. Използвани са различни математични модели за разпространение на радиосигнала, които

отчитат не само загубите от разпространение на директния лъч, но и от отразени и дифрактирани лъчи.

С помощта на реален архитектурен план на сградата е направен 3-D модел, чрез който може да бъде напълно визуализирано всяко едно изследване. Предмет на изследване на трите симулационни модели са параметрите: интензитет на електричното поле $dB\mu V/m$, мощност на сигнала dBm и загуби от разпространението dB . Използвана е честота $f=2400 MHz$ като са извършени три симулационни експеримента с различни модели за разпространение на радиосигналите. Явленията, които влияят върху разпространението на радиовълните може да се обобщят като четири основни механизма: отражение (reflection), дифракция (diffraction), проникване (penetration) и разсейване (scattering) [88,89,92]. Тези механизми на разпространение са използвани в различните математични модели в различна степен. Процесът на проектиране изисква многоетапно моделиране и редица симулационни изследвания.

3.1.1. Разпространение на радиосигналите в затворени пространства

Моделите, определящи загубите при разпространение на радиосигналите позволяват да се определи нивото на приетия сигнал във функция от разстоянието, а от там да се прогнозира отношение сигнал/шум на входа на приемниците.



Фиг. 3.1. Многопътно разпространение на радиосигналите в етаж от жилищна сграда

Разпространението при използване на вътрешни радиосистеми се различава в някои отношения от това в свободното пространство. Крайните цели, както на открито, са да се осигури ефективно покритие на необходимата площ (или да се осигури надежден път, в случай на системи от типа точка до точка). На фиг. 3.1 е показана типична офисна или жилищна сграда, в която се разпространяват радиосигналите, като са дадени доминантните пътища [90,94].

Измененията в разпространението на радиосигналите в закрити помещения най-често са причинени от:

- Отражение или дифракция около предмети (включително стени и подове) в помещенията;

- Загуба от разпространението при преминаване през стени, подове и други препятствия;

- Насочване на голяма част от високочестотната енергия в коридорите;

- Движение на лица и предмети в помещенията, което може доведе до загуби от разпространение;

Вследствие на тези нарушения се предизвикват:

- Времени и пространствени вариации на загуба по пътя на разпространението на сигнала;

- Многопътни ефекти, предизвикани от отразени и дифрактирани компоненти на радиовълната;

- Изменение на поляризацията на електромагнитната вълна.

В табл. 3.1 са дадени стойностите на специфичната проводимост и относителната диелектрична проникваемост за различни честоти на някои от най-често използваните материали в строителството на една сграда [27]. Тези данни са използвани в процеса на симулация в автоматизираната среда на WinProp при определяне на загубите от затихване на радиосигналите в затворени помещения, особено при преминаване на сигнала от едно помещение в друго и от един етаж на друг [29]. Това дава възможност на проектанта да оцени предварително загубите от разпространение във всяка точка, което ще даде възможност за определяне на оптималната мощност на сигнала за реализиране на качествена комуникация при достатъчно високи трансферни скорости.

Таблица 3.1. Електрични параметри на строителните материали

Материал	Относителна диелектрична проникваемост	Специфична проводимост		Честотен диапазон (GHz)
		c	d	
Бетон	5.31	0.0326	0.8095	1÷100
Тухла	3.75	0.038	0.0	1÷10
Гипсокартон	2.94	0.0116	0.7076	1÷100
Дърво	1.99	0.0047	1.0718	0.001÷100
Стъкло	6.27	0.0043	1.1925	0.1÷100
Окачен таван	1.50	0.0005	1.1634	1÷100
Паркет	2.58	0.0217	0.7800	1÷100
Ламинат	3.66	0.0044	1.3515	50÷100
Метал	1	10^7	0.0	1÷100

3.1.2. Изследване на разпространение на радиосигнали, чрез използване на виртуална среда

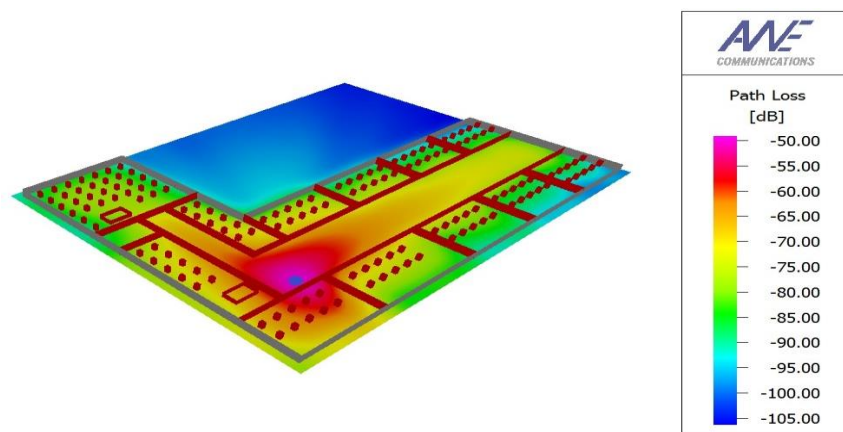
Проектиране на виртуална основа

Виртуалната основа е база данни, чрез която се създава виртуална среда за разпространение на радиосигнали и изчисляване на покритието на

определени вътрешни зони чрез използване на математични модели за разпространение.

Посредством модула WallMan на WinProp за създаване на такава среда се зарежда готова база данни или се проектира нова [32]. Според изискванията на симулацията може да се съдържат данни за мебели и материали, намиращи се вътре в сградата и в частност в помещенията.

Симулационното изследване сравнява данните, получени при използването на три от математичните модели за разпространение на радиосигнали във вътрешна среда. Изследването е реализирано с ненасочена антена (omni directional antenna) при честота 2400 MHz и максимална еквивалентна изотропно излъчена мощност 100 mW. Използвайки подходящи математични модели за вътрешно разпространение, изследването започва с разполагането на една ненасочена антена в коридора на сградата на височина 2 m [33,41,49].



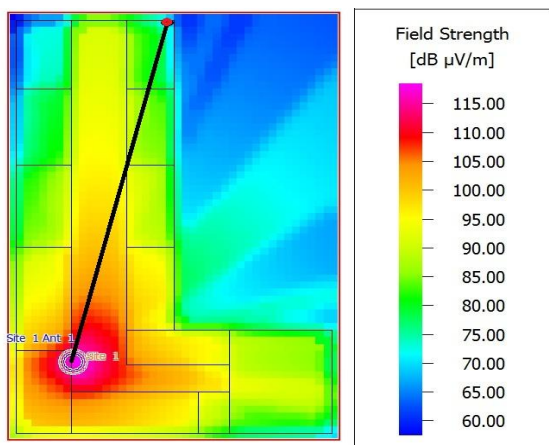
Фиг. 3.3. Разпространение на радиосигнала в триизмерен вид

Направени са симулационни изследвания с три различни математични модели на разпространение на радиосигналите. При първия случай е използван модел с доминантен лъч, при втория - е използван емпиричен модел, базиран на (Multi-Wall Model COST 231), при третия - емпиричен модел с двойна стръмност (One Slope Model). На фиг. 3.3 в триизмерен вид е показана виртуалната подложка и работата на точка за достъп, поставена в коридора на сградата след реализиране на симулационния експеримент.

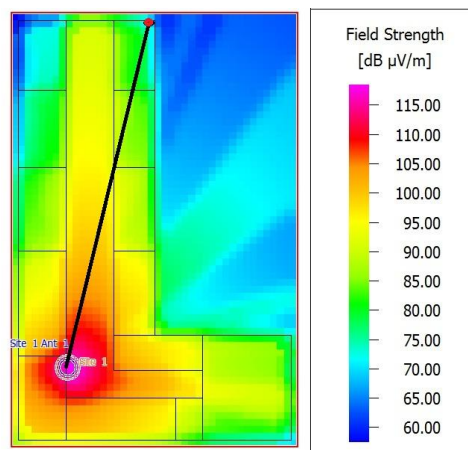
На фиг. 3.4, фиг. 3.5 и фиг. 3.6 в двуизмерен вид са визуализирани резултатите от трите изследвания, като са показани стойностите на параметрите на интензитета на електричното поле в $dB\mu V/m$.

Направен е сравнителен анализ на параметрите: интензитет на електричното поле ($dB\mu V/m$). , мощност на радиосигнала dBm и загубите от затихване на сигналите вследствие разпространението dB .

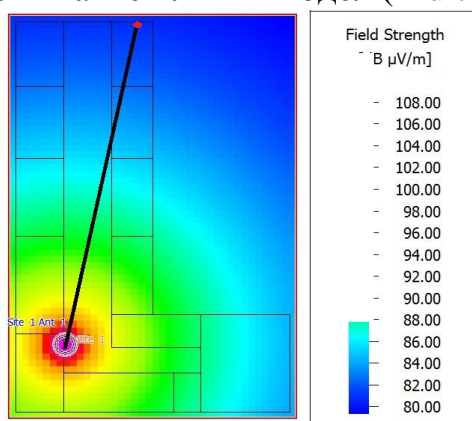
Избрана е еднаква и за трите изследвания крайна точка в сградата, разположена на разстояние 35 m от точката на излъчване.



Фиг.3.4. Интензитет на електричното поле при модел на разпространение с доминантен лъч

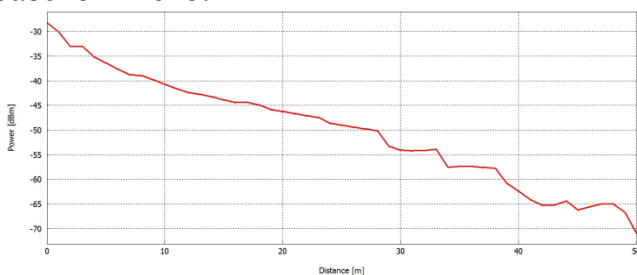


Фиг.3.5. Интензитет на електричното поле при емпиричен модел (Multi-Wall Model COST 231)

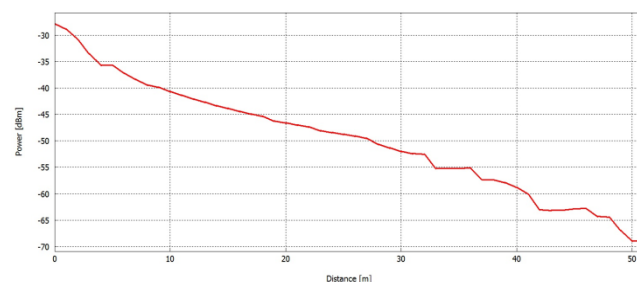


Фиг. 3.6. Интензитет на електричното поле при емпиричен модел с (One Slope Model)

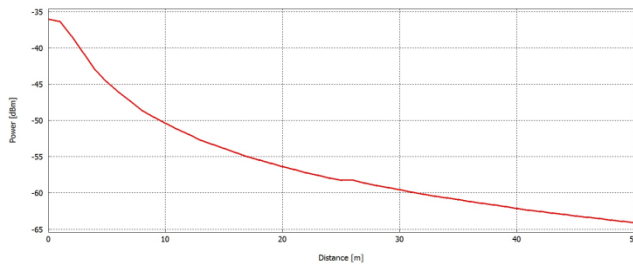
Получени са графични зависимости на базата на трите математични модела на разпространение, като резултатите дават връзката между мощността и загубите от затихване на сигналите във функция от разстоянието до точката за достъп. На фиг. 3.7, фиг. 3.8 и фиг. 3.9 са показани графики на мощността на сигнала във функция от разстоянието. На фиг. 3.10, фиг. 3.11 и фиг. 3.12 са показани графични зависимости на затихването на сигналите вследствие на разпространението във функция от разстоянието.



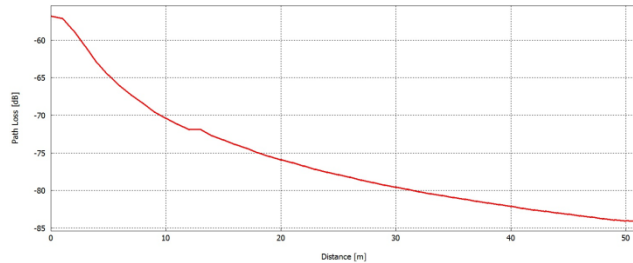
Фиг. 3.7. Графична зависимост на мощността във функция от разстоянието при използване на модел с доминантен лъч



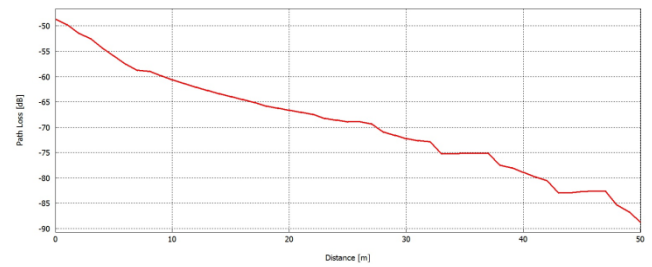
Фиг. 3.8. Графична зависимост на мощността и разстоянието при симулация с емпиричен модел (Multi-Wall COST 231)



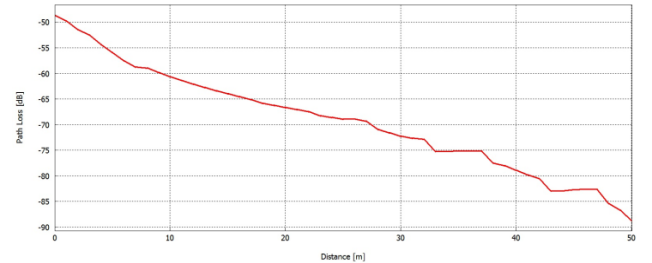
Фиг. 3.9. Графична зависимост на мощността във функция от разстоянието при симулация с емпиричен модел (One Slope Model)



Фиг. 3.11. Графична зависимост на загубите от разпространение при симулация с емпиричен модел (Multi-Wall Model), базиран на стандарта COST 231



Фиг. 3.10. Графична зависимост на загубите от разпространение при симулация с модел с доминантен лъч



Фиг. 3.12. Графична зависимост на загубите от разпространение във функция от разстоянието при симулация с емпиричен модел (One Slope Model)

От анализа на получените резултати се вижда, че използването на емпиричен модел (Multi-Wall Model COST 231) е най – оптимално за сграда от такъв тип. При този начин на разположение на излъчващата точка е подходящ за използване и модела с доминантен лъч. При използване на емпиричен модел с двойна стръмност (One Slope Model) се наблюдават големи не добре покрити зони в сградата.

3.2. Симуляционно изследване на затихването на електромагнитното излъчване в градска среда

Използвана е реално съществуваща градска планировка като основа за изследването. Цифровата подложка на района на изследване е с размери: дължина 1250 m и ширина 1450 m (1.81 km²). Сградите са с височина, варираща от 6 m до 55 m. Широчината на улиците е от 11 m до 37 m. Това дава възможност да се направи сравнителен анализ и оценка на различните места, на които могат да бъдат монтирани антени за външно (Wi-Fi) разпръскване в сложна архитектурна среда.

На изследваната реална градска подложка могат да бъдат направени редица измервания, както и да бъдат визуализирани резултатите в 3-D координатна система. Реализирани са три симулации, като предмет на изследване са оптималните местата за разположение на антените при равни други условия. В няколко референтни точки са измерени показателите: интензитет на електричното поле в $dB\mu V/m$ и мощност на сигнала в dBm . Това дава възможност да се определят загубите от затихване в сложна градска среда при наличие и липса на пряка видимост между точката за достъп и крайният потребител. Използвана е честота $f=5000 MHz$, като са

извършени три симулационни експеримента при различна височина на предавателната антена. Явленията, които влияят върху разпространението на радиовълните в сложна архитектурна среда могат да се обобщят като: отражение (reflection), дифракция (diffraction), проникване (penetration) и разсейване (scattering).

Изчисляване на загубите от разпространение на сигнала в сложна градска среда. При сложна градска среда обикновено предавателната и приемни антени на радио комуникационните линии са на сравнително малка височина и при наличие на пряка видимост се получава частично засенчване на първа Френелова зона. Разстоянието, при което първа Френелова зона ще докосне земята, се определя като:

$$R_{III} = \frac{4h_1h_2}{n\lambda} \sqrt{1 - \frac{n^2}{I_6} \left(\frac{\lambda}{h_1}\right)^2 - \frac{n^2}{I_6} \left(\frac{\lambda}{h_2}\right)^2 + \frac{n^4}{25_6} \left(\frac{\lambda^2}{h_1h_2}\right)^2} \quad (3.1)$$

където n е номера на Френеловата зона, h_1 - височината на антената на точката за достъп, h_2 - височината на антената в точката на приемане, λ - дължината на вълната в m .

Това разстояние гарантира свободна първа Френелова зона при разпространение на радиосигнала и се явява точка на пречупване на модела, които отчита загубите от разпространение при тези условия и се нарича модел с двойна стръмност (Dual slope model). До точката на пречупване се приема коефициента на затихване равен на 2,5, тъй като по краткото разстояние води до по-слабо засенчване.

При високи честоти това разстояние приблизително може да се изчисли, използвайки следния аналитичен израз:

$$R_{III} \approx \frac{4h_1h_2}{\lambda}, \quad (3.2)$$

където R_{III} - точка на пречупване в m .

Долната граница на загубите от разпространение на сигнала в градска среда при наличието на пряка видимост се определят като:

$$L_{LoS,l} = L_{III} + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{r}{R_{III}} \right) & \text{for } r \leq R_{III} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{r}{R_{III}} \right) & \text{for } r > R_{III} \end{cases}, \quad (3.3)$$

Приблизително горната граница на загубите, вследствие разпространението на радиосигнала при наличие на пряка видимост се определят като:

$$L_{LoS,u} = L_{III} + 20 + \begin{cases} 25 \log_{10} \left(\frac{r}{R_{III}} \right) & \text{for } r \leq R_{TP} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{r}{R_{III}} \right) & \text{for } r > R_{TP} \end{cases}, \quad (3.4)$$

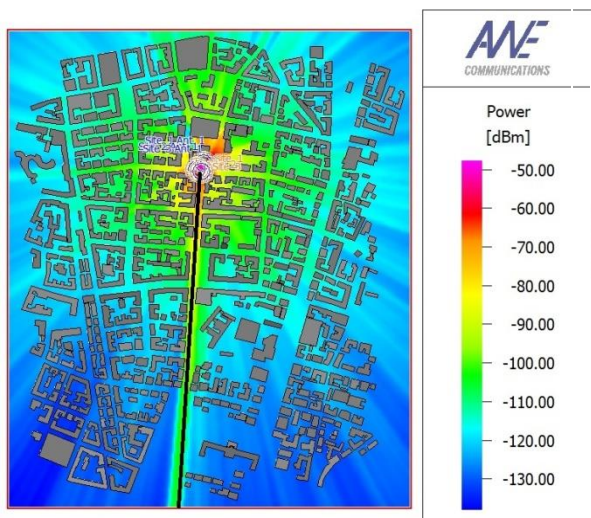
От аналитичните изрази се вижда, че максималните загуби превишават минималните с 20 dB. И в двата случая предварително се определят загубите вследствие разпространение на радиосигнала в точката на пречупване:

$$L_{\text{III}} = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_1 h_2} \right) \right| \quad (3.5)$$

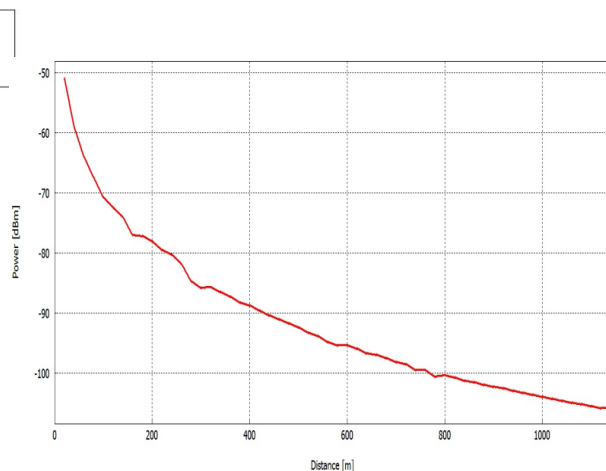
Симулационни изследвания в сложна архитектурна среда

Като основа на симулационното изследване е използвана кадастрална карта на реално съществуваща градска архитектурна среда. За целта на симулацията е избрана улица с широчина 23 m, като антените ще бъдат разположени на три различни места в началото на улицата, за да се оцени затихването на радиосигнала. Измерването на мощността се реализира при равни други условия в уличния каньон, като за целта са избрани 12 референтни точки през 100 m една от друга. Максималното разстояние от точката за достъп, за които ще бъдат снети стойностите на мощността е 1150 m. Експериментът се реализира при три различни височини на точката за достъп (30 m, 6 m и 4 m). На фиг. 3.14, фиг. 3.16 и фиг. 3.18 са показани резултатите от симулационните изследвания за трите случая в цветна мощностна скала. На фиг. 3.14 е показана наситеността с радиосигнал на градската среда, в следствие разположението на предавателната точка на сграда с височина 30 m.

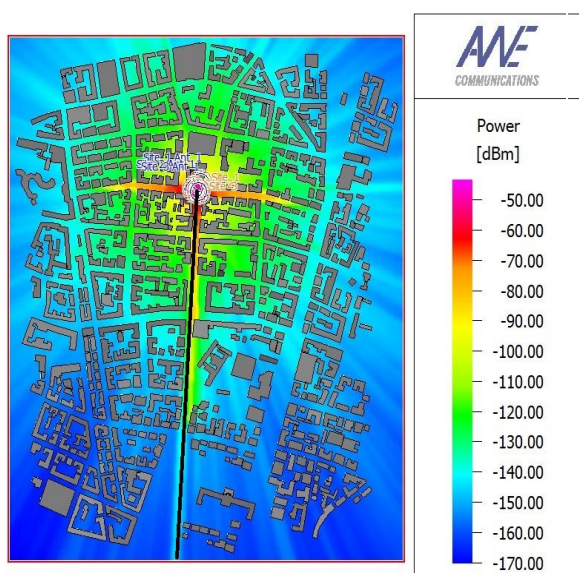
На фиг. 3.16 е илюстрирана работата на антена, монтирана на светофарна уредба с височина 6 m, а на фиг. 3.18 е показана работата на антената, поставена на стълб за улично осветление с височина на монтиране 4 m. За трите симулационни ситуации са показани графични зависимости на фиг. 3.15, фиг. 3.17 и фиг. 3.19, като се визуализира връзката между приемната мощност в dBm и разстоянието в m.



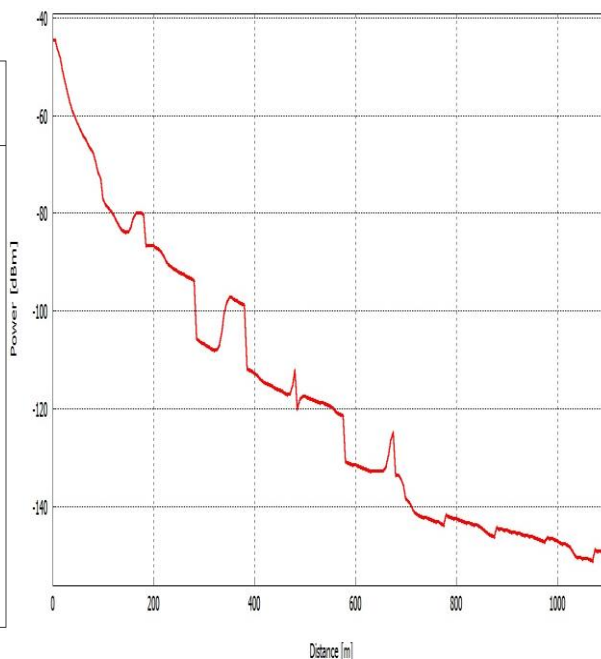
Фиг. 3.14. Антена, разположена върху сграда на 30 m височина



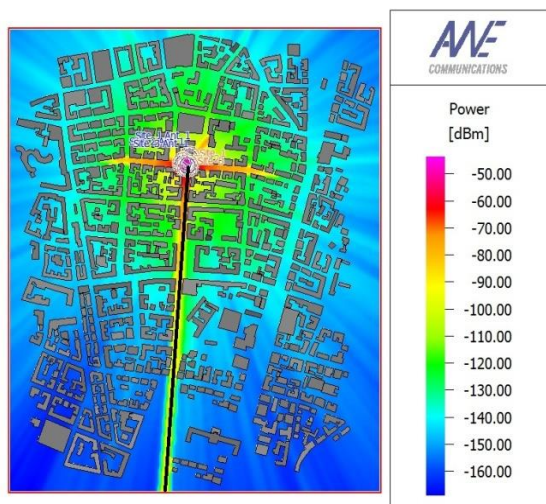
Фиг. 3.15. Мощност в точката на приемане антена на 30 m височина



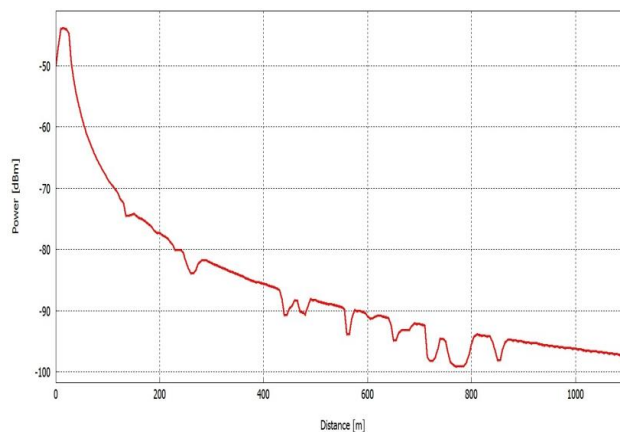
Фиг. 3.16. Антена, разположена върху светофарна уредба на 6 m височина



Фиг. 3.17. Мощност в точката на приемане при антена на 6 m височина

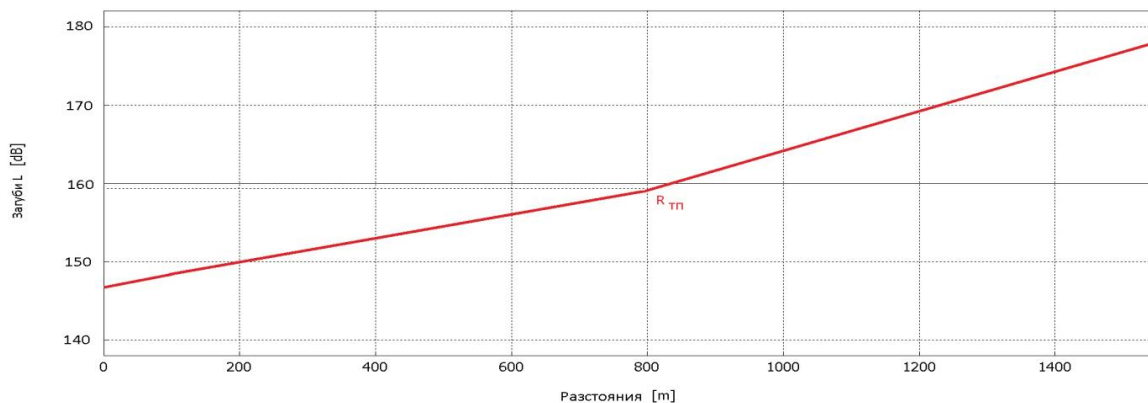


Фиг. 3.18. Антена, разположена върху стълб за улично осветление на 4 m височина



Фиг. 3.19. Мощност в точката на приемане при антена на 4 m височин

Съгласно математичния модел за разпространение на радиосигналите при наличие на пряка видимост (Dual slope model) затихването вследствие разпространението е показано в графичен вид на фиг. 3.20, като точката на пречупване е на разстояние 800 m от предавателната антена, което дава основание за сравнителен анализ между симулационното проектиране и резултатите от идеализирания математичен модел.



Фиг. 3.20. Графичната зависимост на загубите на радиосигнала

3.3. Симуляционно изследване на изменението на интензивността на полето при радиоизлъчването в среда със сложна архитектура

Тук са представени данните от симуляционното изследване в табличен и картинен вид, с които да се онагледят резултатите, както и за да се направят изводи за разпространението на радиочестотното поле в дадения случай и за поведението и коректността на математичните модели за разпространение.

В двата вида среди на разпространение – външна градска и затворена вътрешна, за които се използват съответните модели за изчисление – са избрани определени точки или зони, в които се следи изменението на някои от параметрите на полето. Тези данни са в основата на база за сравнение и анализ на резултатите от прогнозните изчисления при използваните модели за разпространение в двата вида симулирана среда.

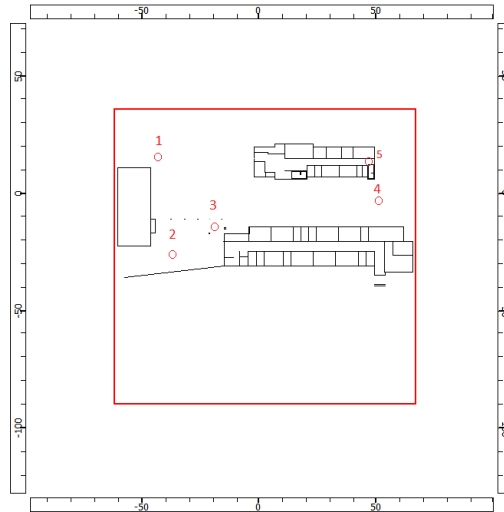
3.3.1. Резултати и анализи от симулация при използвана база данни за вътрешна среда на разпространение

С цел постигане на голям обем от данни, които да служат за основа на изводи и сравнения са проведени множество симулации при различни стойности на входните данни като: мощност на предавателя, честота на полето и други. Освен това резултати са снети при различни стойности на височината на равнината на прогнозиране, както и при няколко вида модели за изчисление на разпространение на полето.

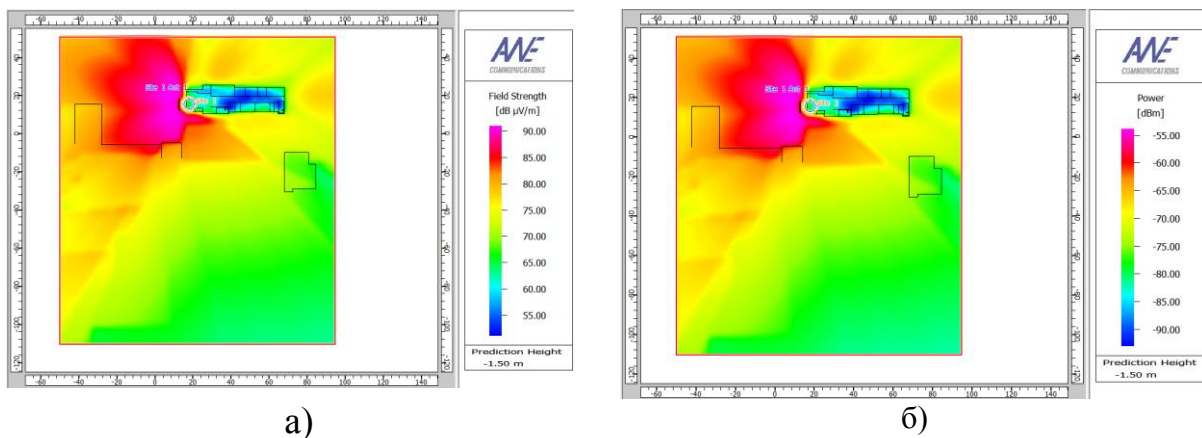
Проведени са и симулации, при които източникът на сигнал е на различна височина и с променено местоположение, спрямо взетите за сравнение зони. Тези зони са подбрани произволно, но целта е да се следят стойностите на параметрите на полето в тях при всички симулации и по този начин да се отчете влиянието на промяната на входните данни (фиг.3.21). Чрез тях се събират данни за разпространението, както около сградите и обектите и в тях.

Резултати от изследвания при височина на равнината на прогнозиране $1,5\text{ m}$ ($-1,5\text{ m}$) от земята от гледна точка новата сграда на корпуса на „Баждар”, която се намира в по-ниска равнина спрямо другата

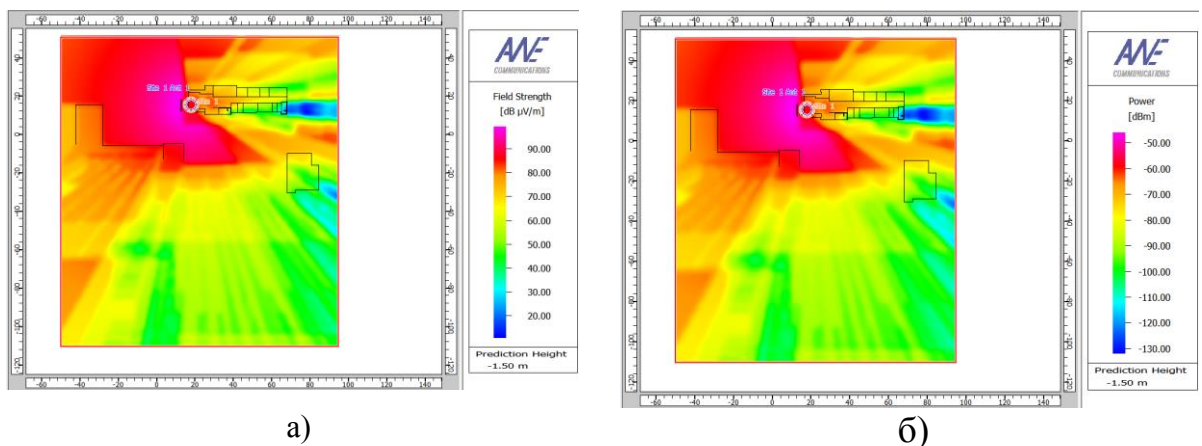
сграда поради денивелацията на терена. Тези резултати са взети при мощност на предавателя 100 mW , честота на сигнала $2,4\text{ GHz}$ и местоположение на точката за достъп на височина $6,4\text{ m}$ на последния етаж във фоайето на сградата. Диаграмите показват стойностите на интензитета на полето (в $\text{dB } \mu\text{V/m}$) и на разпръснатата мощност (в dBmW или dBm).



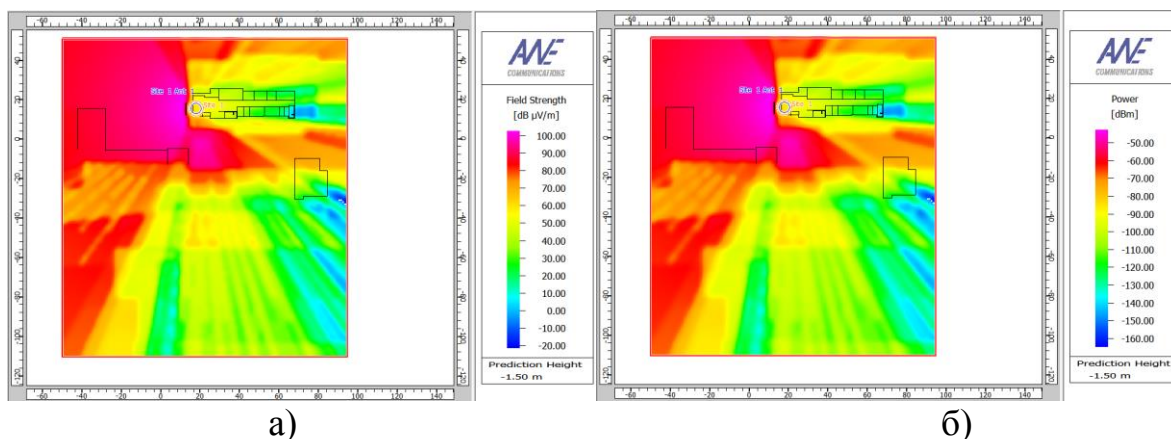
Фиг. 3.21. Разположение на зоните за сравнение



Фиг. 3.22. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, съгласно модела на Доминантните лъчи



Фиг. 3.23. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, съгласно модела на Моутли - Кийнън



Фиг. 3.24. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, съгласно Многостенният COST модел

Таблица 3.2. Данни от зоните за сравнение

$f=2,4 \text{ GHz}; P=0,1 \text{ W}; \text{BPII} = 1,5 \text{ m} (-1,5 \text{ m})$

Модел		1	2	3	4
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V}/\text{m}$	84,1	77	86,2	75
	Мощност dBm	-60	-67,2	-59,14	-69,7
MWM	Интензитет dB $\mu\text{V}/\text{m}$	90	75	92,3	72,68
	Мощност dBm	-54	-70,15	-52,5	-72,19
МКМ	Интензитет dB $\mu\text{V}/\text{m}$	87,4	78,5	84,8	71,5
	Мощност dBm	-57,5	-66,17	-60,07	-71,9

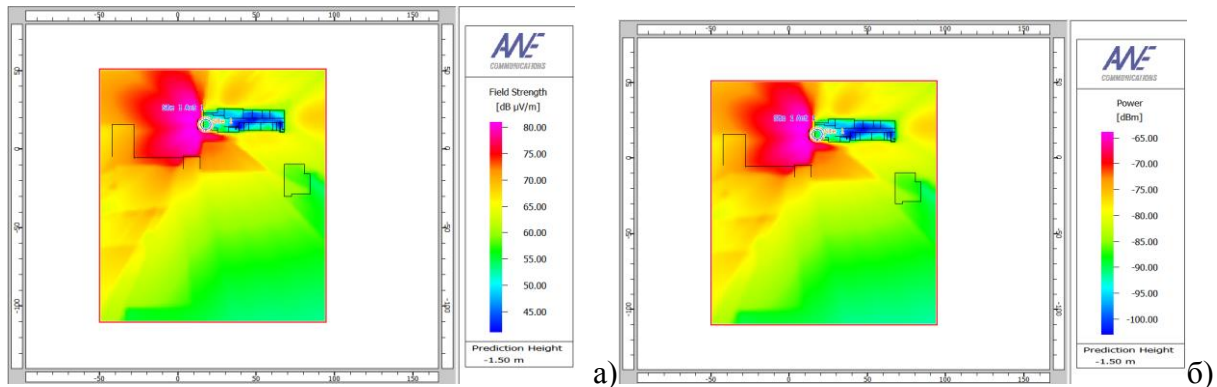
В табл. 3.2 са показани резултатите, снети от зоните за сравнение, посочени на фиг. 3.21 при трите използвани в тази симулация модели: DPM – Dominant Path Model – Модел на доминиращия лъч; МКМ – Motley-Keenan Model – Модел на Моутли-Кийнън; MWM – Multi-Wall COST Model - Многостенен COST модел.

При сравнение на данните се забелязва разлика в моделите на разпространение. Във вътрешността на сградата, в която се намира предавателят, стойностите на интензитета на полето и разпръскваната мощност са по-ниски при модела на доминиращите лъчи, докато покритието според другите два модела е по-голямо, но на определени места и с по-големи разлики в стойностите на изследваните параметри. И трите модела дават почти еднакви резултати за разпространението на полето в свободното пространство пред сградата. Моделът на Моутли-Кийнън и Многостенния COST модел отчитат с по-голяма точност загубите от дифракция и поглъщане от препятствията.

За да бъде направено сравнение при различни мощности на предавателя е направена следващата симулация, при която всички други входни параметри са еднакви с предходната симулация с единствена промяна на мощността, която е намалена на 10 mW .

Таблица 3.3. Данни от зоните за сравнение при мощност 10 mW

$f= 2,4 \text{ GHz}; P= 0,01 \text{ W}; \text{BPII}= 1,5 \text{ m}$					
Модел		1	2	3	4
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	74,3	68	76	63
	Мощност dBm	-70,5	-76,4	-69	-81,07
MWM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	80,41	65,6	82,16	62,48
	Мощност dBm	-64,5	-79,2	-62,36	-82,15
МКМ	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	77,3	69,3	74,9	62
	Мощност dBm	-67,9	-75,3	-70	-82



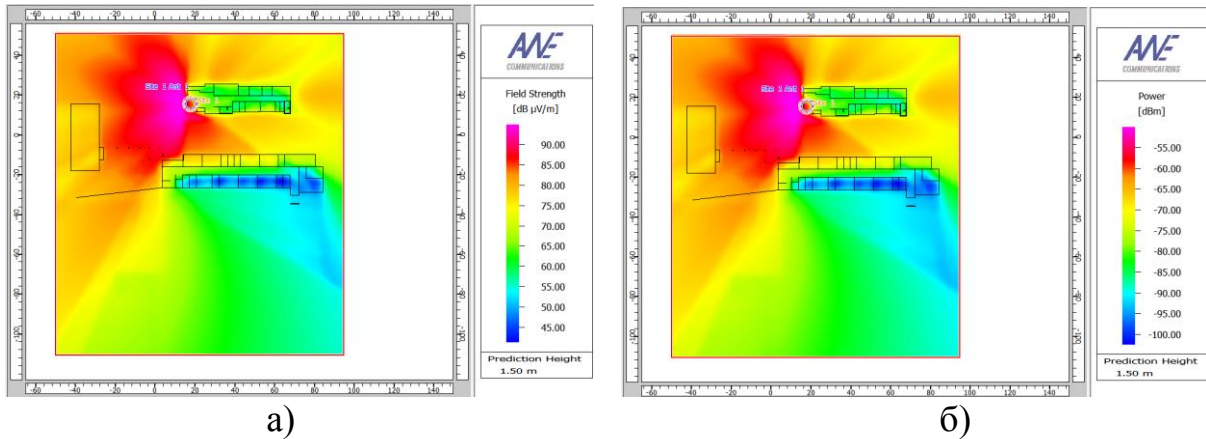
Фиг. 3.25. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, Съгласно модела на Доминантните лъчи

Както се вижда при сравнението на данните за разпространението полето на фиг. 3.25 ÷ 3.27 и данните от табл. 3.3, изследваните параметри запазват поведението си при намалената входна мощност. Основните разлики с данните от симулацията с използвана мощност 100 mW са намалените стойности на интензитета и разпръскваната мощност на полето с около 10 пункта, съответно в dB $\mu\text{V/m}$ за интензитета и в dBmW за мощността.

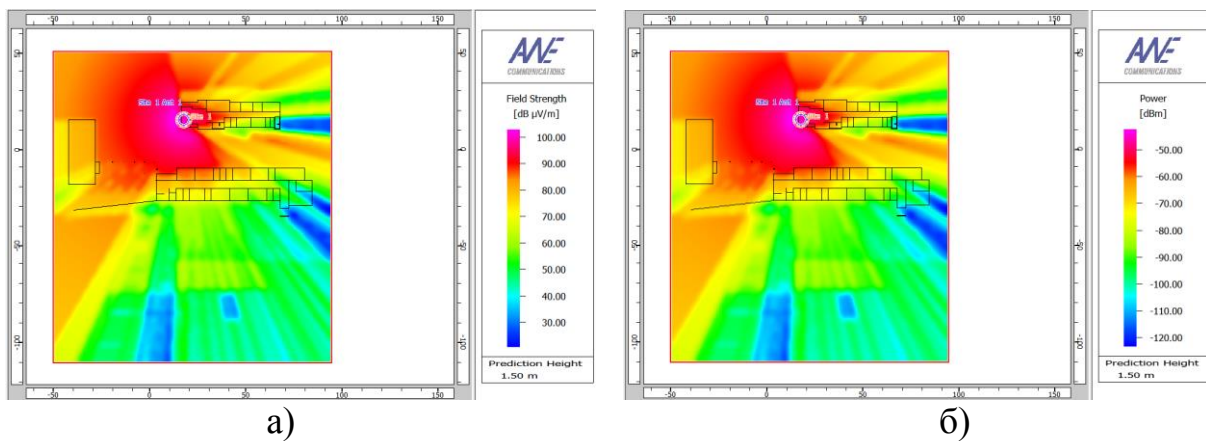
В следващият случай са зададени същите входни параметри както при първата симулация а именно: мощност на предавателя 100 mW, честота на сигнала 2,4 GHz и местоположение на точката за достъп на 6,4 m на последния етаж във фоайето на сградата, но равнината на прогнозиране е поставена на височина 1,5 m над нивото на земята от гледна точка на сграда 2а (старата сграда). В този случай равнината на прогнозиране пресича във височина първия етаж на тази сграда и вторият етаж на (новата) сграда 2б.

При трите модела на разпространение, резултати от които са показани последователно на фиг. 3.28, фиг. 3.29 и фиг. 3.30, се забелязва, че при по-голямата близост до предавателя покритието на полето се подобрява за сграда 2б. С оглед на по-високата равнина на прогнозиране в този случай има данни и за разпространението на полето и на 1 етаж на сграда 2а на корпуса. При модела на Доминантните лъчи покритието е наситено в предната страна на сградата, гледаща към източника. Ясно се забелязва рязкото понижаване на стойностите на изследваните параметри в

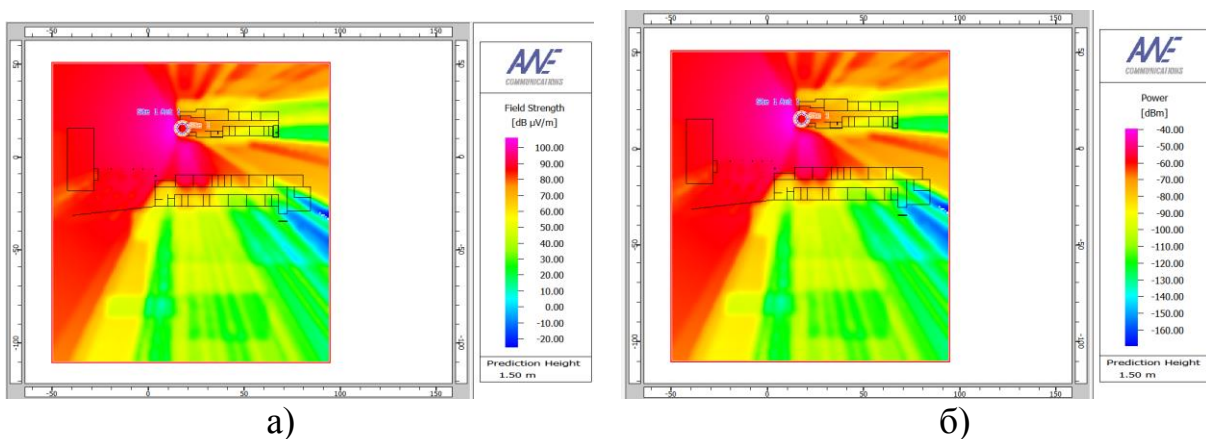
задната част на сградата. Това се дължи на влиянието на вълноводния ефект, който се отчита при този модел.



Фиг. 3.28 а) – Интензитет на полето б) – Мощност на сигнала, съгласно модела на Доминантните лъчи.



Фиг. 3.29. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, съгласно модела на Моутли – Кийнън



Фиг. 3.30. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, съгласно Многостенният COST модел

От съществено значение е също така и разположението и броя на помещенията, през които преминават лъчите. Докато при другите два модела с по-голямо влияние е броят на обектите, през които преминават

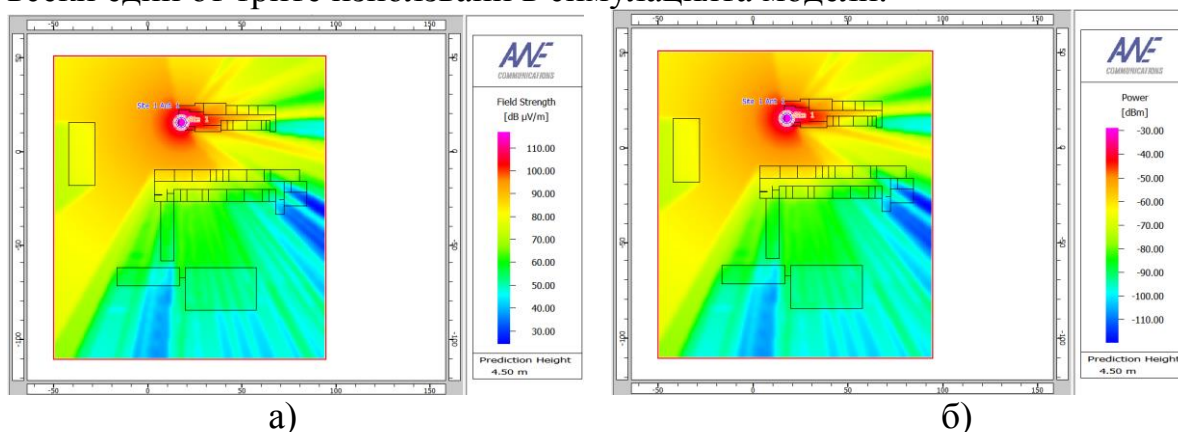
лъчите и изчислените на база на това загуби. При моделът на Моутли-Кийнън като допълнителни фактори за явлението поглъщане се взимат под внимание и ефекта на засенчване. При Многостенният модел се отчита точното местоположение на стените и препятствията, но недостатък е че ефект на вълновода не се разглежда при него.

Таблица 3.4. Данни от зоните за сравнение

$f=2,4 \text{ GHz}; P= 0,1 \text{ W}; \text{BPII} = 1,5 \text{ m}$					
Модел		1	2	3	4
DPM	Интензитет $\text{dB } \mu\text{V/m}$	84,4	81,5	87,7	76
	Мощност dBm	-60,46	-63	-57,2	-68,6
MWM	Интензитет $\text{dB } \mu\text{V/m}$	90,3	87,25	91,3	73
	Мощност dBm	-54,3	-57,6	-53	-71,6
MKM	Интензитет $\text{dB } \mu\text{V/m}$	87,5	80	89	76,4
	Мощност dBm	-57,4	-64,9	-55,8	-69

На табл. 3.4. са обобщени стойностите на параметрите интензитет и мощност на полето при съответна височина на равнината за прогноза. Стойностите за зоните 2 и 3 в табл. 3.4 са измерени при по-голяма височина на равнината за прогнозиране за разлика от тези в табл. 3.2 и 3.3, и имат реално приложение към резултатите.

В четвъртият случай отново се прави промяна единствено на височината на равнината на прогнозиране. Тя е вдигната на 4,5 m, което съответства на третия етаж на сградата, в която се намира точката за достъп и на втория етаж на сграда 2а. Настъпилите промените в параметрите са показани на фиг. 3.31, фиг. 3.32 и фиг. 3.33 съответно за всеки един от трите използвани в симулацията модели.



Фиг. 3.32. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, съгласно модела на Моутли – Кийнън

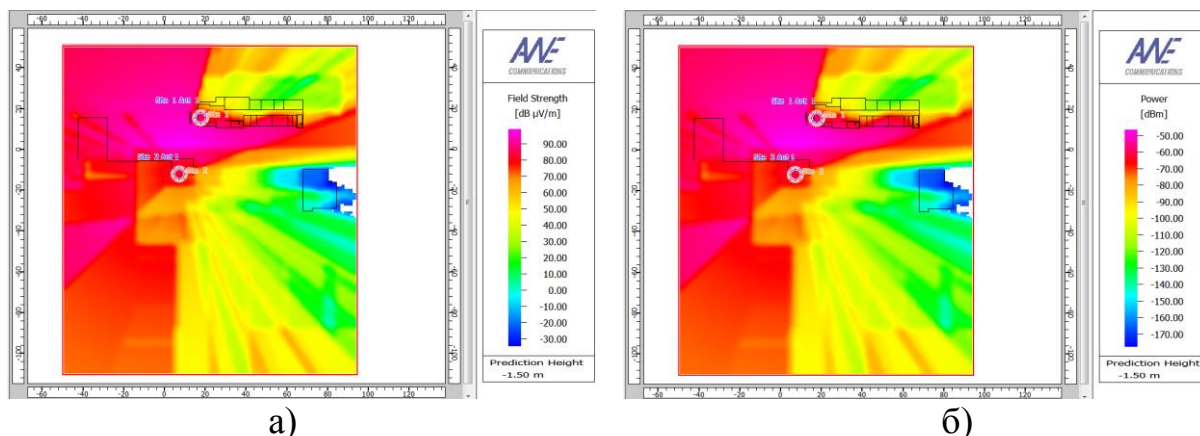
В последният случай, както се вижда от фиг. 3.31, фиг. 3.32 и фиг. 3.33, при всички използвани модели на разпространение на сигнала параметрите на интензитета и мощността на полето имат оптимално покритие в единия обект на симулацията – сграда 2б – поради приближение на равнината, на която са снети резултатите към равнината

на източника на полето (във вертикалното пространство на един етаж). От друга страна, резултатите в сграда 2а, за дадения етаж, са вече занижени поради отдалечаване от предавателя.

Таблица 3.5. Данни от зоните за сравнение

$f=2,4\text{ GHz}; P=0,1\text{ W}; BPII=4,5\text{ m}$					
Модел		1	2	3	4
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V}/\text{m}$	77,2	77,7	82,8	77,3
	Мощност dBm	-67,6	-66,7	-62,4	-67,6
MWM	Интензитет dB $\mu\text{V}/\text{m}$	90,9	88,1	92,7	75
	Мощност dBm	-54	-56,6	-51,5	-70
МКМ	Интензитет dB $\mu\text{V}/\text{m}$	87,4	84,5	89,6	75,6
	Мощност dBm	-57,3	-60,1	-54,7	-68,5

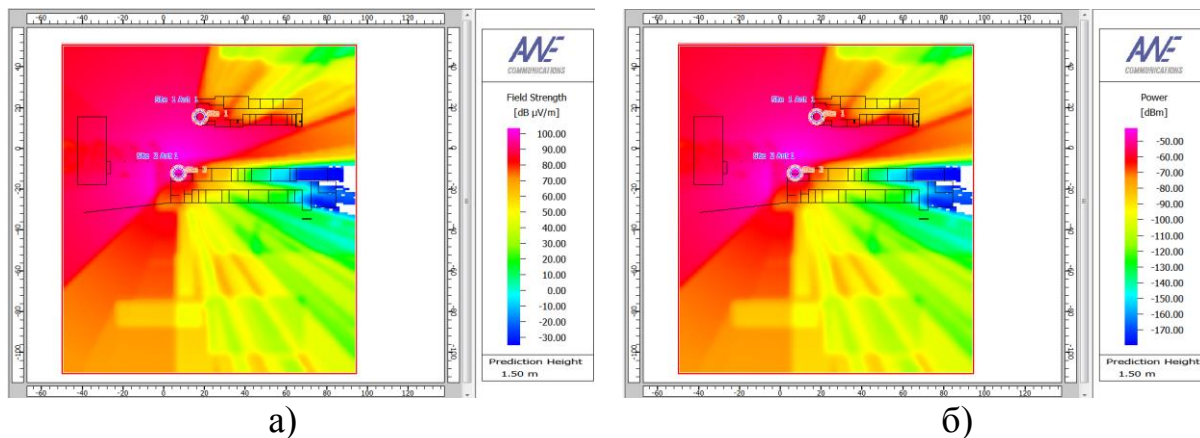
Поради тази причина, а също така и заради необходимостта покритието на полето да бъде оптимално разпространено в определения район или поне в най-посещаваната си част, е направено и изследване, при което местоположението на предавателя е променено. Той е разположен в съседната сграда 2а на корпуса на височина 4,8 m – отговаряща на разположението на втория етаж. Разпространението е симулирано при входните параметри използвани в предишните изследвания, а именно: честота $f=2,4\text{ GHz}$, мощност на предавателя $P=0,1\text{ W}$, $BPII=1,5\text{ m}$ и 2 m от гледна точка на сграда 2а и от гледна точка на сграда 2б (-1,5 m).



Фиг. 3.35. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, Съгласно Многостенният модел

Таблица 3.6. Данни от зоните за сравнение

$f=2,4\text{ GHz}; P=0,1\text{ W}; BPII=1,5\text{ m}(-1,5\text{ m})$					
Модел		1	2	3	4
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V}/\text{m}$	84,7	-	-	81,11
	Мощност dBm	-60,15	-	-	-63,5
MWM	Интензитет dB $\mu\text{V}/\text{m}$	90,2	-	-	75,8
	Мощност dBm	-54,1	-	-	-69
МКМ	Интензитет dB $\mu\text{V}/\text{m}$	85,2	-	-	77
	Мощност dBm	-59,8	-	-	-67,3



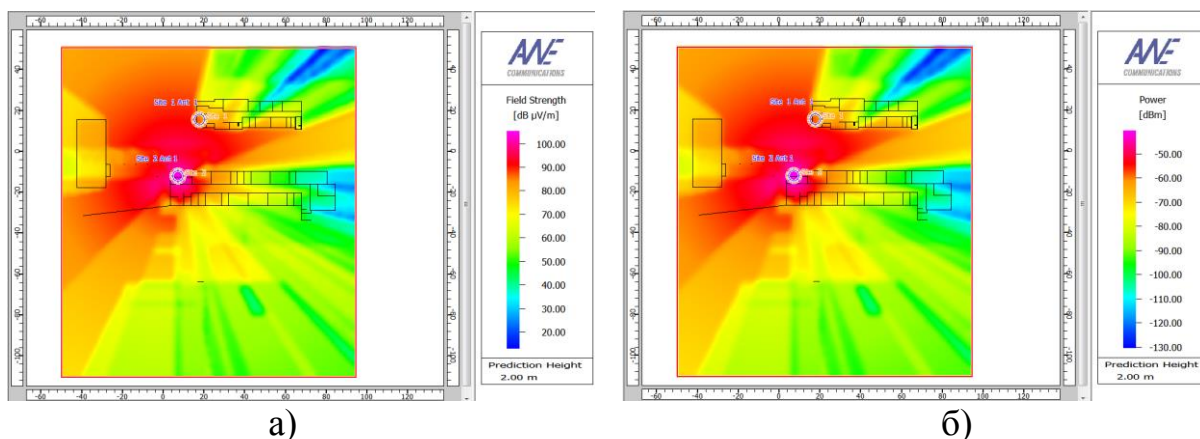
Фиг. 3.38. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, съгласно Многостенният модел

Както се вижда от фиг. 3.35 и фиг. 3.38 при дадените височина на равнината на разпространение Многостенният модел губи възможността си за прогнозиране при места, които са под силно въздействие на явлението засенчване и броя на препятствията между източника на сигнал и съответния участък. Докато другите два модела запазват поведението си при определените условия.

Таблица 3.7. Данни от зоните за сравнение

$f=2,4\text{ GHz}; P=0,1\text{ W}; BPII=1,5\text{ m}$					
Модел		1	2	3	4
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	85	89,8	94,12	81,7
	Мощност dBm	-59,5	-54,5	-50,7	-63,4
MWM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	90	95,6	92	76,12
	Мощност dBm	-54,8	-50,14	-52,18	-68,7
МКМ	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	86,8	90,4	93,5	79,2
	Мощност dBm	-58,13	-53,7	-51	-65,5

Данни, снети при височина на равнината на прогнозиране 2 m.



Фиг. 3.42. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, съгласно модела на Моутли – Кийнън

При сравнение на данните, снети при последните стойности на ВРП се вижда, че според модела на Моутли-Кийнън покритието на сграда 2а е по-равномерно в сравнение с покритието, изчислено от модела на Доминантните лъчи, при който то е оптимално само в едната половина на сградата по дължина, при която има външен достъп за сигнала през прозорците и Многостенния модел, при който по-голяма наситеност е в близост до източника.

Таблица 3.7. Данни от зоните за сравнение

$f= 2,4 \text{ GHz}; P= 0,1 \text{ W}; \text{BPII} = 2 \text{ m}$					
Модел		1	2	3	4
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	85,2	90	95,2	81,6
	Мощност dBm	-59,4	-55,11	-49,7	-63,36
MWM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	90,6	94,5	93,3	76,15
	Мощност dBm	-54,27	-50,27	-50,9	-68,66
MKM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	86,8	91,94	93	79,2
	Мощност dBm	-57,8	-54,5	-51,4	-65,5

Следващата симулация е направена при промяна на честота на предавателя на 5 GHz .

Мощността на предавателя е $0,1 \text{ W}$, височината на равнината на прогнозиране е $1,5 \text{ m}$ от гледна точка на сграда 2а, симулацията е направена и за двете местоположения на източника на сигнал. Снетите резултати на тази стойност на ВРП са достатъчни, за да се направи сравнение на поведението на моделите. Фиг. 3.43, 3.44, 3.45 и табл. 3.8 се отнасят за предавател с местоположение в сграда 2б.

Таблица 3.8. Данни от зоните за сравнение при честота 5 GHz

$f= 5 \text{ GHz}; P= 0,1 \text{ W}; \text{BPII} = 1,5 \text{ m}$					
Модел		1	2	3	4
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	84,2	81,4	87,8	70
	Мощност dBm	-66,9	-69,6	-63,3	-80,5
MWM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	90,87	86,8	87,46	51,3
	Мощност dBm	-60,5	-69	-61,9	-99,87
MKM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	87,4	80	88,8	75,6
	Мощност dBm	-64	-72,51	-62	-75,12

Фиг. 3.46, 3.47, 3.48 както и табл. 3.9 се отнасят за предавател с местоположение в сграда 2а.

Таблица 3.9. Данни от зоните за сравнение при честота 5 GHz

$f= 5 \text{ GHz}; P= 0,1 \text{ W}; \text{BPII} = 1,5 \text{ m}$					
Модел		1	2	3	4
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	85,5	90	93,5	81,3
	Мощност dBm	-65,8	-60,7	-57,5	-69,7
MWM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	90,5	94,1	74,5	60,2
	Мощност dBm	-61	-56,8	-74,7	-90,9
MKM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	86,8	90,4	93,6	79,2
	Мощност dBm	-64,2	-61,18	-58	-71,9

От получените резултати се вижда че поведението на моделите на Доминантните пътища и на Моутли – Кийнън се запазва, но разпространението в по-трудно покриваните участъци се подобрява, поради използването на по-високата честота се увеличава и проникването на сигнала през препятствията. От друга страна при по-високата честота Многостенният модел не е в състояние да изчисли точна прогноза за места, които са под силно въздействие на явлението засенчване и доставяната мощност е много ниска.

При сравнение на данните от таблиците за зоните с измерените стойности на параметрите на интензитета на полето и разпръскваната мощност, се забелязва че стойностите на тази мощност са по-ниски при използване на честота 5 GHz , което означава, че при по-ниски честоти необходимата мощност за достигане на почти еднакъв интензитет на полето е по-малка (табл. 3.4 с табл. 3.8 и табл. 3.7 с табл. 3.9).

Таблица 3.10. Сравнение на интензитета в зона 5

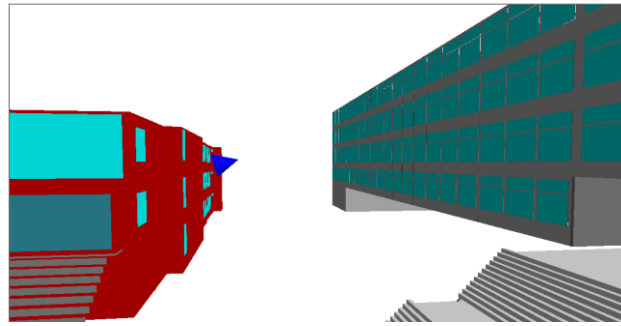
Интензитет при MWM $f=2,4\text{GHz}$ $P=0,1\text{mW}$			
ВРП	-1,5	1,5	4,5
Tx 1 - Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	34,2	56,6	83,12
Tx 2 - Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	53	64,14	65,8

Табл. 3.10. показва сравнение на данни за интензитета на полето при един и същ модел (Многостенен) за зона 5 (виж фиг. 3.21). Както се вижда от табл. 3.10. стойностите на интензитета за височини $-1,5\text{ m}$ и $1,5\text{ m}$ са по-ниски при използване на предавателя (Tx 1) в сграда 2б (който е в същата сграда, както и посочената зона 5), а тези при симулация с предавателя (Tx 2) в сграда 2а (който е по-далечен за зона 5) са по-високи. Въз основа на това, както и на другите изследвания може да се заключи, че дадена точка, намираща се на различно ниво в сградата или друго отдалечено местоположение в сравнение с източника на полето, покритието се осигурява чрез преминаване на лъчите през прозорци и отвори даващи достъп до дадената точка, отколкото директно през подовете и таваните на сградата.

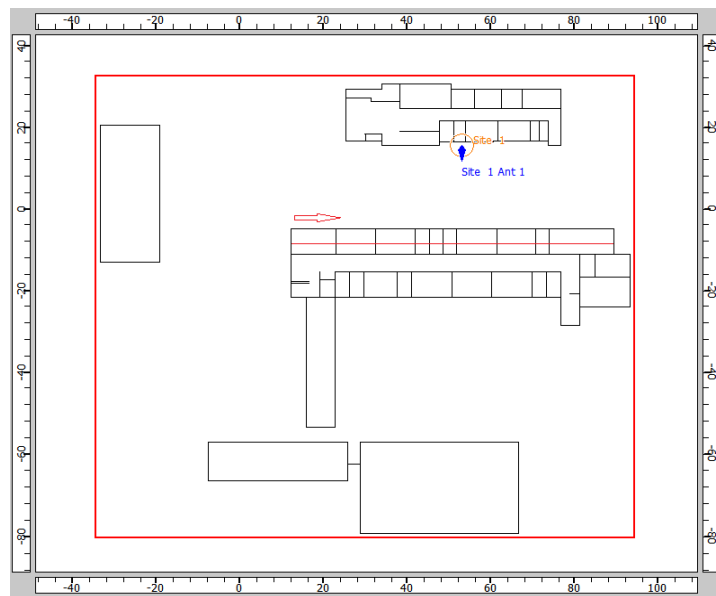
3.3.2. Изследване с насочена антена, чрез която в определена зона може да се концентрира насищането на сигнала с цел по-малки загуби от разпространение при разпръскване на сигнала във всички посоки

При тази симулация се използва насочена антена закрепена на едната страна на сграда и облъчваща другата. Това се осъществява при честота $2,4\text{ GHz}$, мощност на предавателя $0,1\text{ W}$, височина 4 m и при височини на разпространение за всеки етаж от облъчваната сграда. Използваният модел за изчисление на разпространението е този на Доминантните лъчи. Разположението на антената е показано на фиг. 3.49 и фиг. 3.50, на която също е показано и посока на разпределение на сметите графични

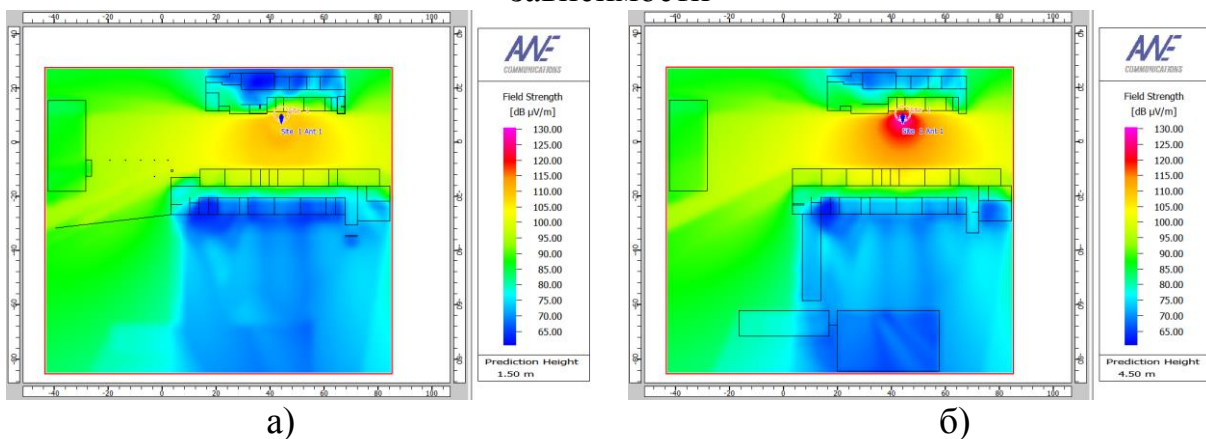
зависимости на интензитета и мощността на полето във функция от разстоянието [m].



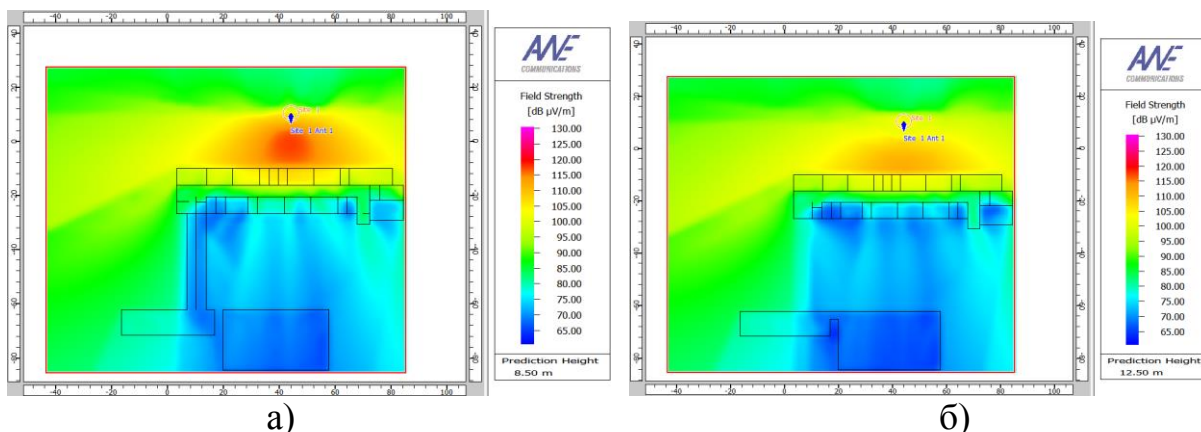
Фиг. 3.49. Местоположение на насочената антена



Фиг. 3.50. Местоположение на антената и посока на сметените графични зависимости

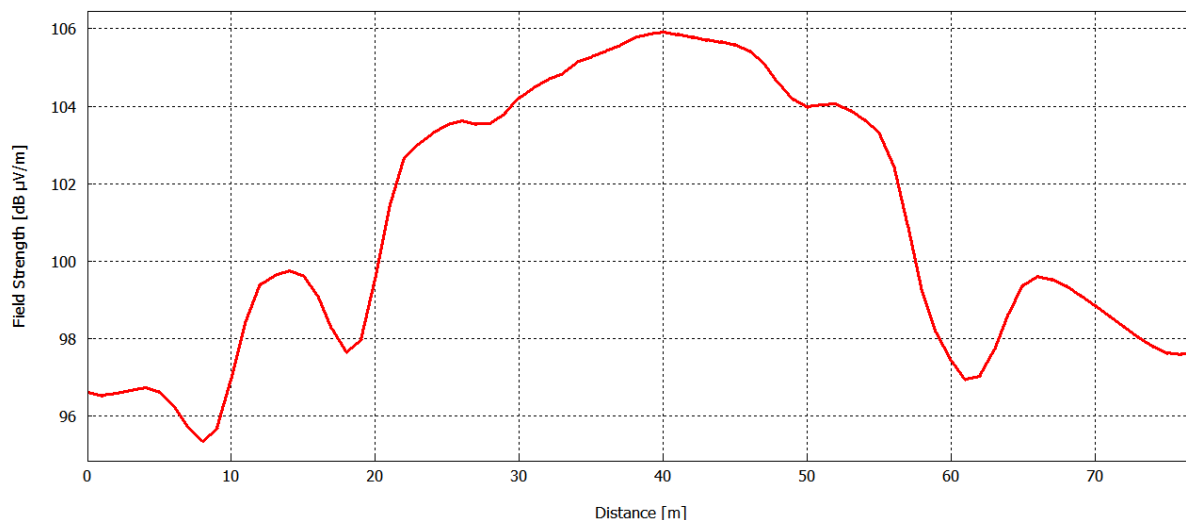


Фиг. 3.51. а) Интензитет на полето при ВРП 1,5 m; б) Интензитет на полето при ВРП 4,5 m чрез модела на Доминантните лъчи



Фиг. 3.52. а) Интензитет на полето при ВРП 8,5 m; б) Интензитет на полето при ВРП 12,5 m чрез модела на Доминантните лъчи

Фиг. 3.53, 3.54, 3.55 и 3.56 показват изменението на интензитета в посока по дължина обекта (фиг. 3.50), в зависимост от височината на равнината на разпространение.



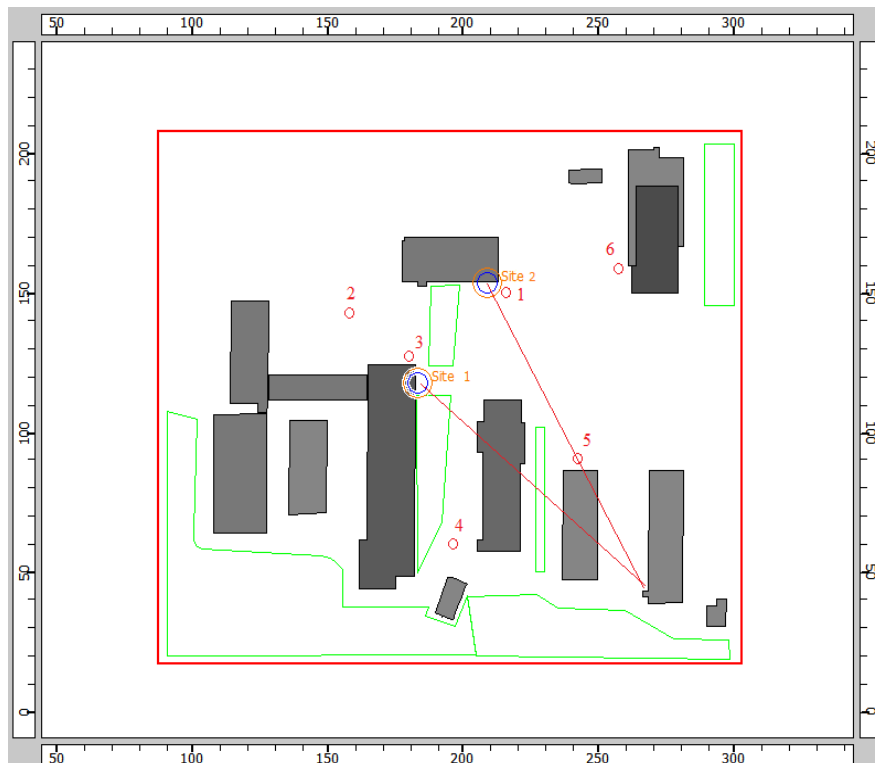
Фиг. 3.55. Функция на интензитета от разстоянието при ВРП 8,5 m

Както се вижда от данните на графичните зависимости покритието на определеното вътрешно пространство е оптимално. Най-големите стойности на интензитета на полето са във фокусното пространство на излъчващата антена към височина 8,5 m.

3.3.3. Резултати и анализи от симулация при използвана база данни за външна среда на разпространение

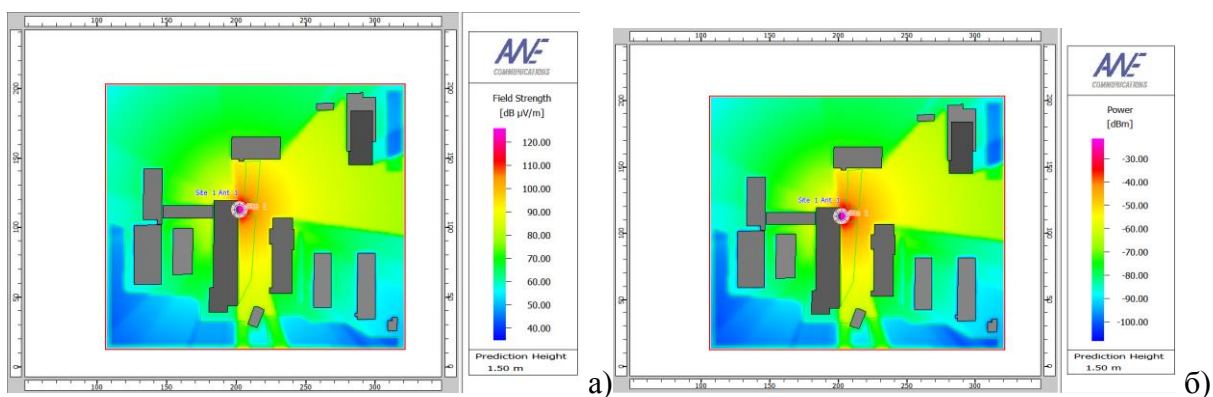
В тази част от главата са разгледани резултатите от симулациите, при които се използват модели на разпространение за външна (градска) среда. Както и при моделите за вътрешно разпространение тези симулации са проведени при различни входни данни – местоположение на предавателя, честота на сигнала. Основната разлика тук, е че височината на равнината на прогнозиране е само на 1,5 m над земята, това се дължи на невъзможността да бъде зададена денивелация на обектите. На фиг. 3.57 са

показани зоните, за които се отчитат стойности на интензитета на полето и разпръскваната мощност, както линии, чрез които се създават графични зависимости, отразяващи изменението на интензитета във функция от разстоянието до източника на сигнал. Зоните са еднакви и за двете използвани местоположения на предавателя, докато линиите за зависимостите са съобразно това местоположение. Моделите, с които се работи са Разширен модел COST 231 – Уолфиш-Икегами, модел на Доминантните лъчи (пътища) и Дифракционен модел – Knife-Edge Diffraction.

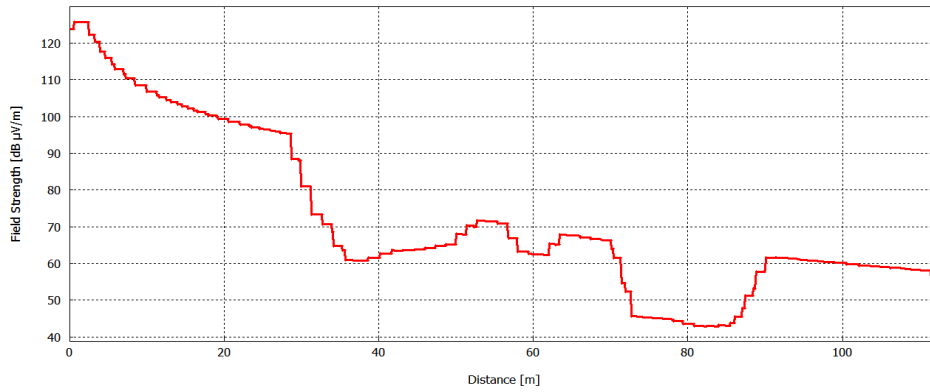


Фиг. 3.57. Местоположение на предаватели и зони за сравнение

При тези симулации в първия случай предавателят се намира над входа на сграда 2а на височина 4,5 m, при втория - над сграда Аула на височина 7 m. Следващите резултатите са относно първия случай. Зоните от 1 до 4 съвпадат с тези от изследванията за вътрешни модели.

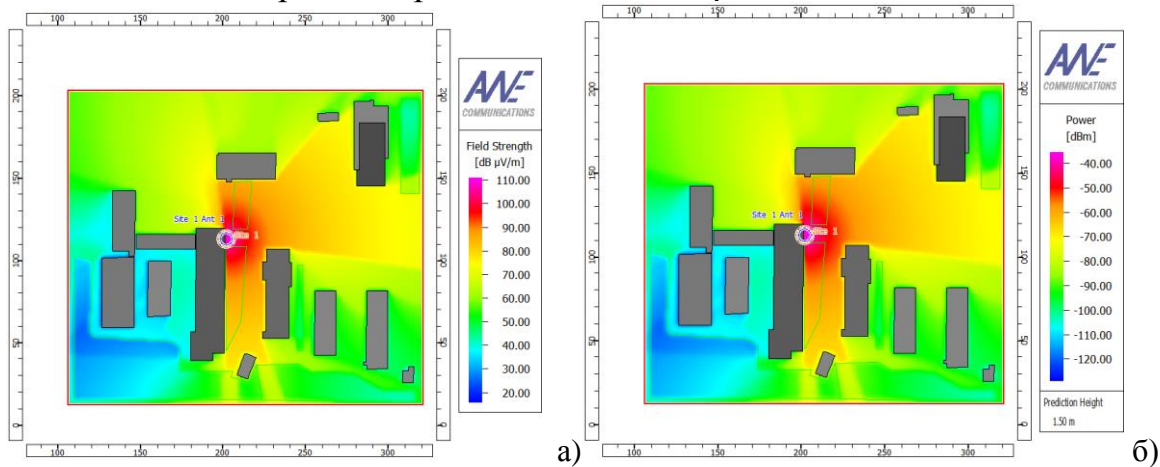


Фиг. 3.58. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, изчислени по модела COST 231

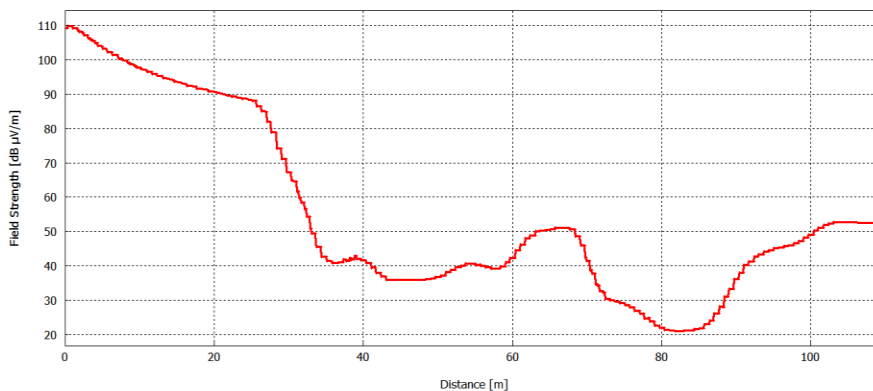


Фиг. 3.59. Функция на интензитета от разстоянието при модела COST 231

Както се вижда от фиг. 3.58 и фиг. 3.59 изменението на интензитета при пряка видимост в свободното пространство намалява експоненциално. При преминаване през сгради (при 40 m и 80 m) стойностите на интензитета падат рязко поради намаленото проникване на сигнала.



Фиг. 3.60. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, изчислени по модела на Доминантните лъчи



Фиг. 3.61. Функция на интензитета от разстоянието при Дифракционният (KED) модел

Таблица 3.11. Данни от зоните за сравнение при честота 2,4 GHz

$f= 2,4 \text{ GHz } P= 0,1 \text{ W } \text{BPII}= 1,5 \text{ m}$							
Модел	Параметър	1	2	3	4	5	6
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	83	70	89,5	80,4	64,5	76,4
	Мощност dBm	-61,3	-75,1	-50,6	-64,5	-79,6	-68,2
COST 231	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	89,8	78,8	100	86,6	69,2	82,57
	Мощност dBm	-54,9	-67,4	-44,2	-58,34	-75,7	-62,16
KED	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	81,9	37,2	60	78,8	53,3	74,8
	Мощност dBm	-62,9	-107,3	-86	-66	-91,6	-69,9

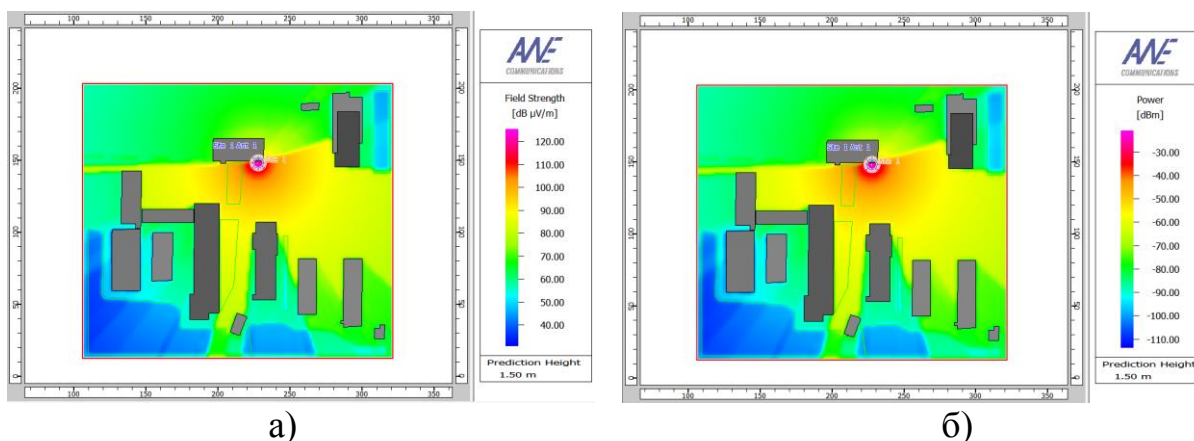
Както се вижда от фиг. фиг. 3.60 и фиг. 3.61 изменението на функцията на интензитета на полето от разстоянието е най-големи падове на стойностите при симулацията с Дифракционния модел KED. А показанията за изследваните параметри в табл. 3.11. за този модел са по-ниски от тези на другите два модела.

Таблица 3.12. Данни от зоните за сравнение при честота 5 GHz

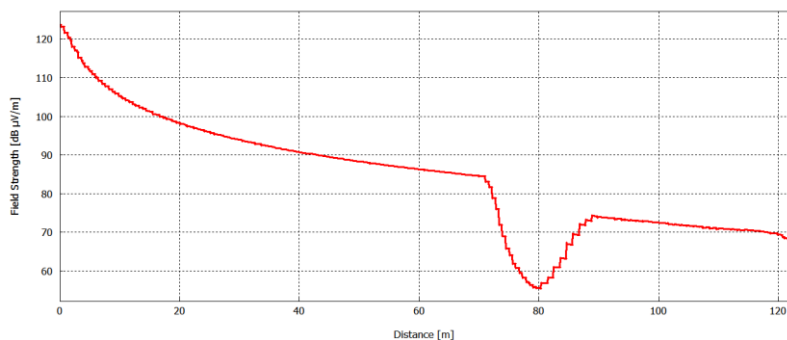
$f= 5 \text{ GHz } P= 0,1 \text{ W } \text{BPII}= 1,5 \text{ m}$							
Модел	Параметър	1	2	3	4	5	6
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	89,8	69	89,2	86,6	59,7	82,5
	Мощност dBm	-61,48	-82,3	-56,9	-64,6	-91	-68,6
COST 231	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	89,7	66,9	87,4	86,6	59,7	82,4
	Мощност dBm	-61,3	-82,5	-56,9	-64,5	-91,8	-69,4
KED	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	82	36,91	58,6	78,8	53,3	74,7
	Мощност dBm	-69	-114,3	-92	-72,2	-97,8	-76,4

Поведението на моделите се запазва при тази честота на сигнала.

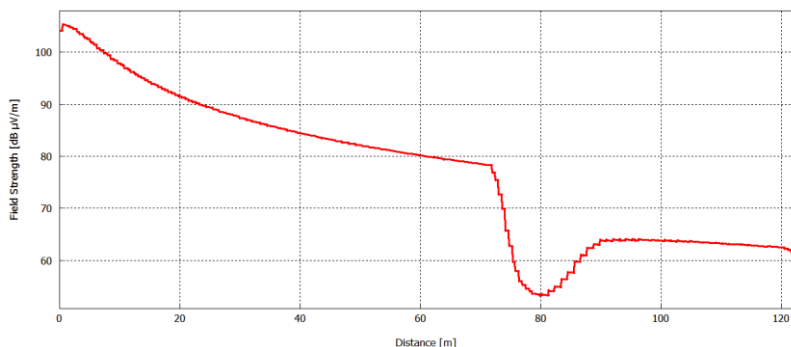
В основата на следващите симулации е промяна на местоположението на предавателя. В този случай то е над сграда Аула на 7 m над земята. Останалите входни данни остават непроменени. Симулациите са направени отново при две стойности на честотата – 2,4 GHz и 5 GHz.



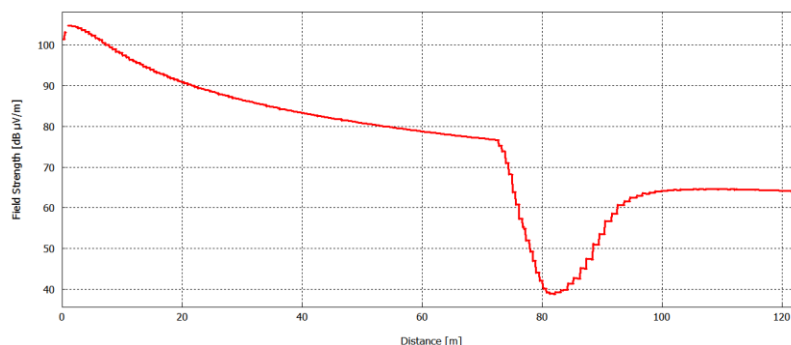
Фиг. 3.68. а) Интензитет на полето; б) Мощност на сигнала, изчислени по модела COST 231



Фиг. 3.69. Функция на интензитета от разстоянието при модела COST 231



Фиг. 3.71. Функция на интензитета от разстоянието при модела на Доминантните лъчи



Фиг. 3.73. Функция на интензитета от разстоянието при Дифракционният (KED) модел

При сравнение на данните от фиг. 3.69, 3.71 и 3.73 се вижда, че стойностите на интензитета намаляват експоненциално с отдалечаване от източника. Поведението на моделите едно също спрямо единственото съприкосновение с голямо препятствие дадената линия разпространение.

Таблица 3.13. Данни от зоните за сравнение при честота 2,4 GHz
 $f= 2,4 \text{ GHz}$ $P= 0,1 \text{ W}$ $BPII= 1,5 \text{ m}$

Модел	Параметър	1	2	3	4	5	6
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	100,6	82,2	85,6	75,4	78,4	82,2
	Мощност dBm	-43	-63	-59,2	-69,4	-66,3	-62,2
COST 231	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	110	88,5	92	81,4	84,6	88,7
	Мощност dBm	-33,7	-56,2	-52,8	-63,3	-60,2	-56
KED	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	99,9	80,4	84	73,5	76,75	80,9
	Мощност dBm	-43,5	-64,3	-60,5	-71,2	-67,9	-64,8

При това местоположение на предавателя насищането със сигнал е по-ефективно, както сочат и данните от табл. 3.13. Това се забелязва и при трите използвани модела на разпространение.

Резултати при зададена честота на сигнала 5 GHz .

Таблица 3.14. Данни от зоните за сравнение при честота 5 GHz

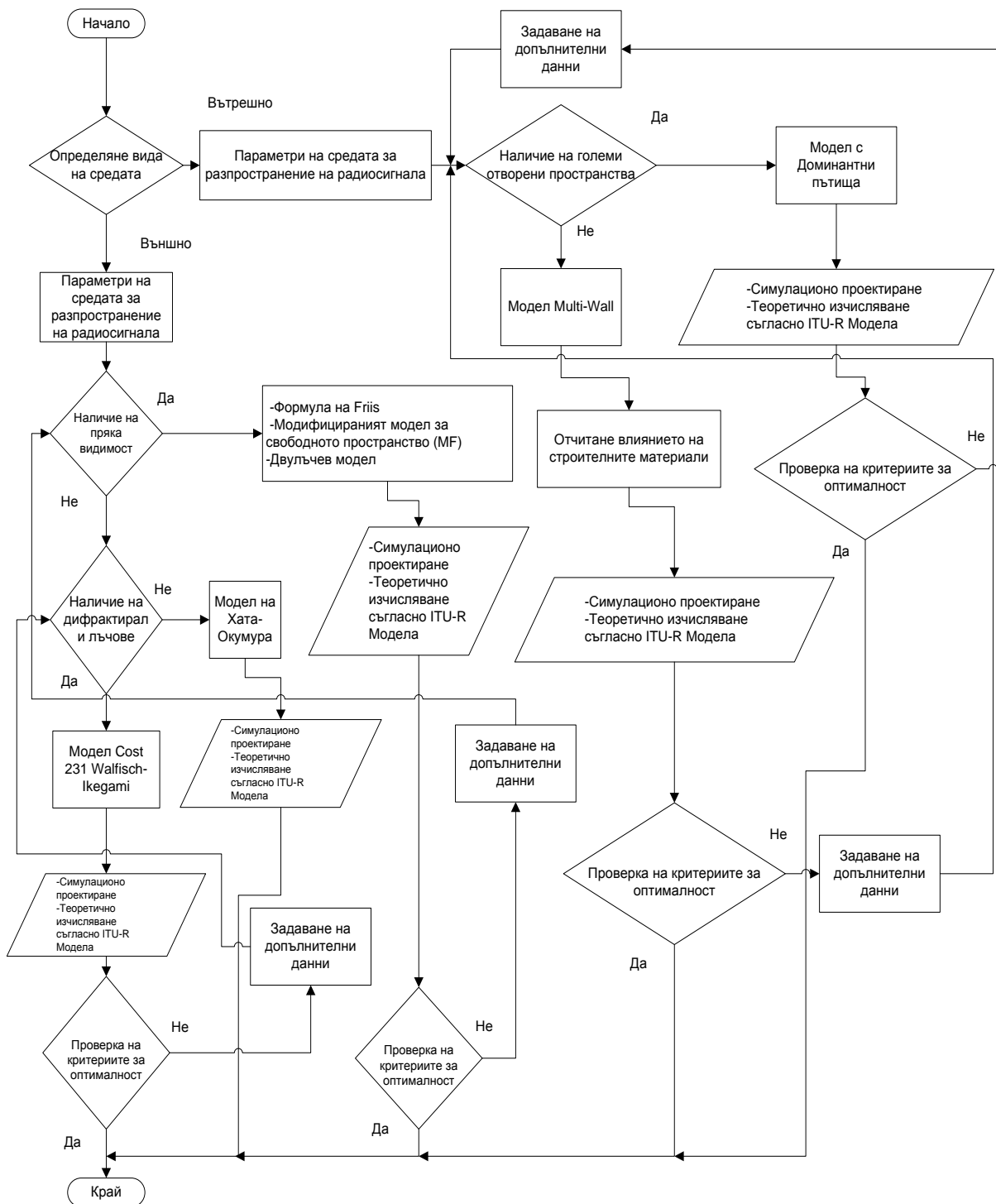
$f= 5\text{ GHz } P= 0,1\text{ W } BPI= 1,5\text{ m}$							
Модел	Параметър	1	2	3	4	5	6
DPM	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	99,87	81,6	85,4	75,4	78,4	82,3
	Мощност dBm	-50,5	-69,12	-65,8	-75,8	-72,8	-68,82
COST 231	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	109	89	91	81,4	84,6	88,7
	Мощност dBm	-42,15	-62,9	-59,2	-69,8	-66,7	-62,4
KED	Интензитет dB $\mu\text{V/m}$	98,5	80,5	84	73,6	76,8	80,6
	Мощност dBm	-52,9	-71,4	-67,14	-77,7	-74,4	-70,3

От всички направени досега изследвания за изчисление на разпространението на чрез моделите за външна среда се вижда, че общото между тях е начинът по който отчитат разпространението в свободното пространство в зоната на пряка видимост, а разликите се появяват когато разпространението на полето взаимодейства с обектите от градската среда. Разширеният модел на COST 231 Уолфиш-Икегами не отчита влиянието на вълноводния ефект, което ограничава точността му за такъв вид среда, но от друга страна е много обективен при изчисление на разпространението в средното ниво на пространството над покривите, тъй като отчита множеството дифракции от тях. При дифракционният модел KED загубите от препятствията във вертикалната равнина се прибавят към тези от свободното пространство. При него голямо значение имат явленията засенчване и дифракция.

На фиг. 3.80. е представен алгоритъм, в началото на който се въвеждат входните данни за проектирането и се взема решение за вида външна среда на разпространение. Вследствие на това се избира съответният математичен модел за външно разпространение на радиосигналите. След избора на математичния модел се пристъпва към симулационно проектиране на базата на автоматизирана програмна среда (WinProp) така и на базата на препоръките на стандартите на ITU-R, като това позволява оптимално радиочестотно планиране на съответната телекомуникационна мрежа във вътрешна среда.

Отделните етапи могат да се разширят и разгледат по-подробно на стъпки на изчисляване, проектиране и симулационно тестване за конкретни случаи на външно и вътрешно разпространение на средата, като съм се стремил това да бъде обект на изследване в отделните глави на дисертационният ми труд.

Този алгоритъм позволява лесно и бързо да се направи избор на решение за модел на проектиране и симулационно изследване, както и да се търсят мерки за оптимизация на безжично радиопокрытие.



Фиг. 3.80. Алгоритъм за избор на решение за модел на разпространение и проектиране на хибридна безжична мрежа

3.4. Анализ и изводи към трета глава:

1. Изследвано е разпространението на радиосигнали в сграда по реален архитектурен план в софтуерната среда на WinProp на фирмата AWE Comunciations. Дадени са резултатите в триизмерен, двуизмерен и в графичен вид на радиочестотното планиране, което позволява изследване

поведението на математичните модели за разпространение на радиосигнала в сграда, отчитайки влиянието на материалите, от които е изградена сградата. Това е необходимо за постигане на достатъчно висока точност на разполагане на излъчващите точки, осигуряващи радиосигнал на потребителите на мобилни услуги. При използване на математичен модел с доминантен лъч се вижда, че има зони без достатъчно покритие в сградата и прилежащите площи, тъй като този модел не отчита отразените и дифрактиралаи лъчи от стени, подове и тавани. При използване на емпиричен модел (Multi-Wall Mode, COST 231) покриването с радиосигнал на сградата е най-оптимално. В направената симулация сигналът в точката на приемане при емпиричния модел (Multi-Wall Model) е -70 dBm, което е напълно достатъчно за реализиране на качествена комуникация.

2. Направено е изследване на разпространението на радиосигнали в сложна градска среда при наличието на пряка видимост в сложна архитектурна среда.

Таблица 3.15 Сравнение между теоретични и симулационни резултати, измерени в референтни точки

Разстояние (m)	50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150
Трансферна скорост (Mbps)	54	48	36	24	18	12	11	9	6	55	2	1
Мощност, (dBm) (съгласно теоретичния модел)	-71	-75	-80	-84	-86	-87	-88	-89	-90	-92	-93	-94
Мощност1, (dBm) (при височина на антената 30 m)	-60	-70	-80	-88	-92	-95	-97	-99	-101	-105	-106	-108
Мощност2, (dBm) (при височина на антената 6 m)	-50	-72	-81	-85	-90	-92	-94	-95	-97	-99	-100	-101
Мощност3, (dBm) (при височина на антената 4 m)	-48	-80	-90	-100	-110	-120	-130	-135	-137	-140	-142	-145

В табл. 3.15 са дадени разстоянията на комуникация в зависимост от приемната мощност на мобилният терминал в dBm, при реализиране на пряка видимост, както и реализираната трансферна скорост в Mbps. Изследването е направено за три случая на разположение на антените, като данните за приемна мощност са получени за 12 референтни точки. Това дава възможност да се определи височината, на която се монтира точката за достъп, за да се постигне максимално ефективна комуникация, т.е да се освободи 55% от първа Френелова зона. Имайки предвид, че чувствителността на съвременните приемни комуникационни терминали е от порядъка на -95 dBm, използвайки резултатите от табл.3.1 и при зададени трансферни скорости може да се определи разстоянието на комуникацията при която се реализира надеждна връзка.

3. Извършено е изследване на радиочестотното покритие на зона за безжичен достъп, както и сравнение на моделите за изчисление на

разпространението на полето при външни (градски) условия и също така в среда на вътрешно разпространение в сгради.

4. При така направените изследвания на разпространението на радиочестотното покритие при използване на математични модели за вътрешна и външна среда, се вижда че поведението на всеки един модел е различно в зависимост от началните входни параметри и условията, при които се провежда симулацията. Моделите отчитат различни явления и величини, спрямо които се изчисляват параметрите от които зависи разпространението на сигнала и оптималното покритие на полето. Сравнението между тях дава представа за това при какви условия се използва даден модел и ефикасността приложението му. Използването на такива модели за прогнозиране на разпространението дава възможност за предварително проучване на факторите и явленията, които биха имали роля при радиочестотното планиране на нови безжични мрежи, разширяването на съществуващи мрежи, както и за изследвания на електромагнитната съвместимост в мобилното пространство.

5. Създаден е алгоритъм за радиочестотно планиране на телекомуникационни мрежи които обхваща външно, вътрешно и хибридно разпространение на радиовълните.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА - СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА МОЩНОСТТА И ЗАТИХВАНЕТО НА РАДИОСИГНАЛИТЕ, РАЗПРОСТРАНЯВАЩИ СЕ ПРЕЗ РАЗЛИЧНИ СТРОИТЕЛНИ МАТЕРИАЛИ

4.1. Въведение в проблема на затихване на радиовълните през различни материали

Представено е изследване на затихването на радиосигнала през различни строителни материали, използвани в промишленото и гражданското строителство. Направени са теоретични изчисления и са реализирани симулационни експерименти при преминаване на радиосигнала през съответния материал. Това дава възможност за сравнителна оценка на радиочестотните характеристики на различните строителни материали, като по този начин те могат рационално да бъдат използвани, с цел по-оптималното покритие на дадената територия с радиосигнал. Това ще доведе до качествена комуникация вътре в сградата, като съответно ще се подобри електромагнитната обстановка в обитаемата среда.

В теоретичното изследването са използвани формули от препоръка на ITU P.2040-1 за коефициентите на отразяване и предаване на електромагнитната вълна при ТЕ и ТМ поляризации. Изчислени са затихванията за основни типа среди на разпространение. С помощта на програмен продукт MatLab са написани програми за изчисляване загубите

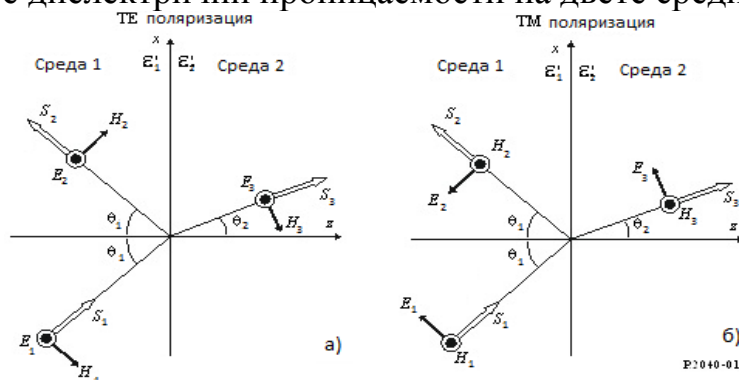
от разпространение. Теоретичният експеримент е реализиран при честоти 900 MHz, 2000 MHz и 5000 MHz.

При симулационното изследване са използвани няколко различни хипотези, като за целта е проектирана сграда на четири етажа, с размер на етажа 10 m на 12 m. При реализацията на всеки етаж е използван различен строителен материал (бетон, тухла, дърво и стъкло), като всички вътрешни преградни стени в сградата са изработени от гипсокартон. С помощта на програмния продукт WinProp е направена 3-D подложка, чрез която може да бъде напълно визуализирано всяко едно изследване. Реализирани са четири симулации, като предмет на изследване са загубите от разпространение на радиосигнала (dB) при преминаване през определен строителен материал. Това дава възможност както да се сравнят теоретичните и симулационни резултати, така и да се даде сравнителна оценка на възможностите на различните строителни материали да отразяват, поглъщат и пречупват радиовълните.

Процесът на проектиране изисква многоетапно моделиране и редица симулационни изследвания, като целта е постигане на оптимални параметри за реализация на подходяща електромагнитна среда, безопасна от гледна точка на човешкото присъствие [85,86,88,90,101,102].

4.2. Коефициент на отразяване и коефициент на предаване на електромагнитната вълна на границата между две среди

На фиг. 4.1 е показан процесът на отразяване и преминаване на падаща електромагнитна вълна при два вида поляризация на сигнала – хоризонтална TE и вертикална TM, като ϵ'_1 и ϵ'_2 са съответно относителните диелектрични проницаемости на двете среди [1,2].

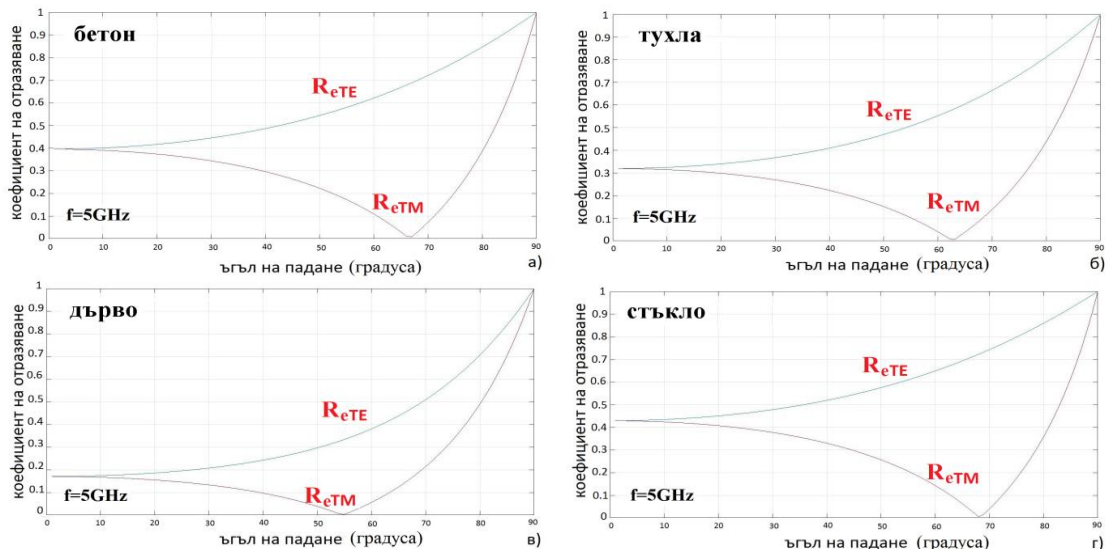


Фиг. 4.1. Отражение и пречупване на електромагнитна вълна от плоска гранична повърхност

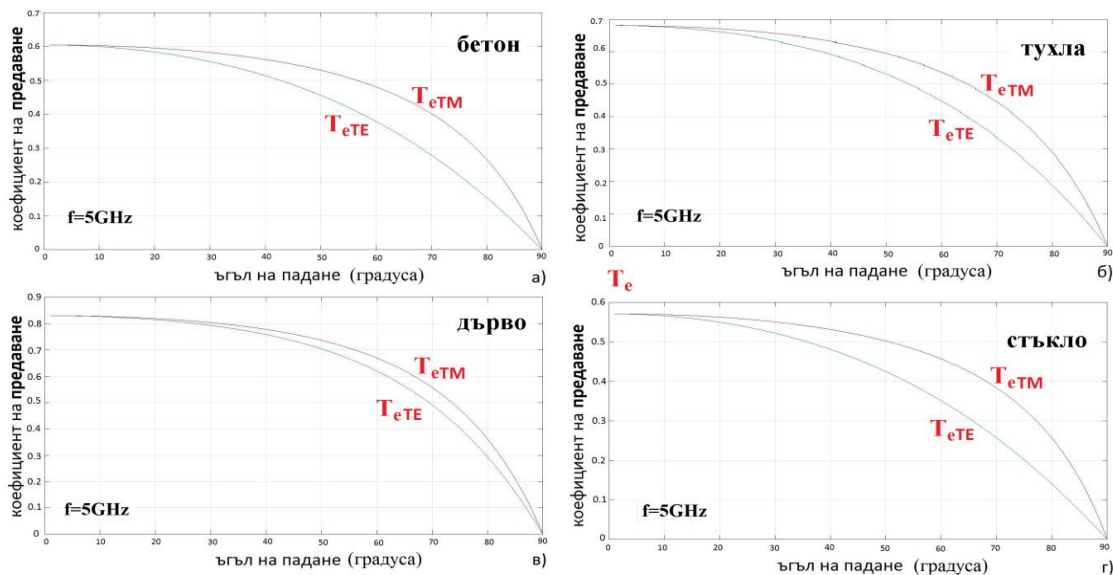
4.3. Изследване затихването на радиосигнали през различни строителни материали

Разработени са програми за изчисляване затихването на радиовълните при преминаване през различни строителни материали. Програмният код е написан в софтуерната среда на Matlab и дава възможност за изчисляване на посочените по-горе параметри. На фиг. 4.2 са показани графичните

зависимости на коефициентите на отразяване R_{eTE} и R_{eTM} , използвайки строителните материали бетон, тухла, дърво и стъкло при честота $f = 5 \text{ GHz}$. На фиг. 4.3 са показани графиките на коефициентите на предаване T_{eTE} и T_{eTM} за четирите случая.



Фиг. 4.2. Графични зависимости на коефициентът на отразяване във функция от ъгъла на падане за четирите случая



Фиг. 4.3. Графични зависимости на коефициентът на предаване във функция от ъгъла на падане за четирите случая

В табл. 4.1 са дадени стойностите на коефициента на отразяване и коефициента на предаване през различните материали, като се задават параметрите на средата ϵ' и σ . Използвани са три различни работни честоти 900 MHz, 2000 MHz и 5000 MHz. Стойностите за коефициентите са изчислени за ъгъл на падане на електромагнитната вълна $\theta_i = 0 \text{ deg}$.

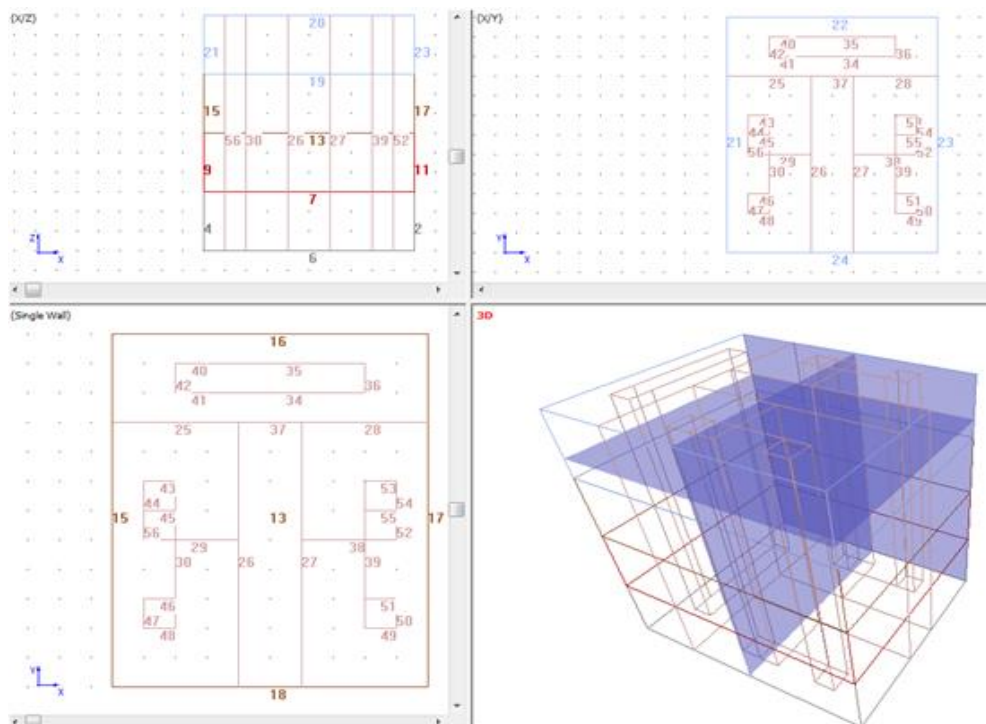
Таблица 4.1. Коефициент на отразяване и коефициент на предаване през различни строителни материали при ъгъл на падане $\theta_i=0 \text{ deg}$

Честота (MHz)	R_{eTE}	R_{eTM}	T_{eTE}	T_{eTM}	ϵ	$\sigma (S/m)$
БЕТОН						
900	0.43	0.43	0.59	0.59	6	0,035
2000	0.42	0.42	0.58	0.60	6	0,078
5000	0.41	0.41	0.61	0.61	6	0,194
ТУХЛА						
900	0.33	0.33	0.68	0.68	4	0,005
2000	0.31	0.32	0.69	0.69	4	0,044
5000	0.31	0.31	0.70	0.70	4	0,111

4.4. Симуляционно изследване затихването на радиосигнали през различни строителни материали в програмна среда на Matlab и WinProp

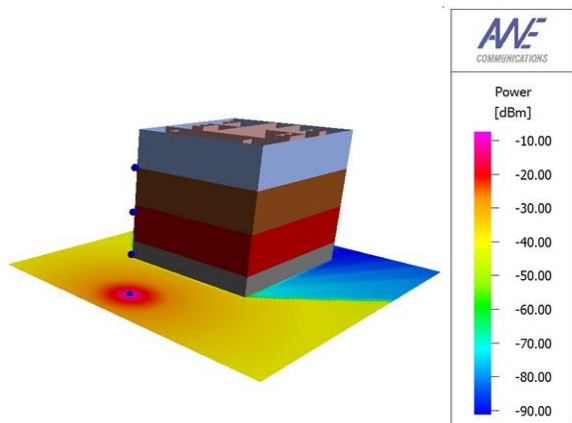
За целите на експеримента е проектирана четириетажна сграда с размери 10 m на 12 m. С помощта на програмен продукт WinProp е създадена виртуална подложка, като първият етаж е реализиран за целите на експеримента изцяло от бетон. Вторият етаж на сградата е зададен да бъде изцяло от червена тухла. Третият етаж е изграден от дърво, а четвъртият етаж е проектиран да бъде от стъкло.

На фиг. 4.4 е показан етап от проектирането на симулационната подложка в програмен продукт WallMan. За целите на експеримента външните стени на всеки етаж са приети да бъдат от различни строителни материали, а вътрешните преградни стени са еднакви за четирите етажа и са проектирани да бъдат от гипсокартонени плоскости. Това дава възможност за обективно сравняване на загубите от разпространение при четирите случая [103,105,107].

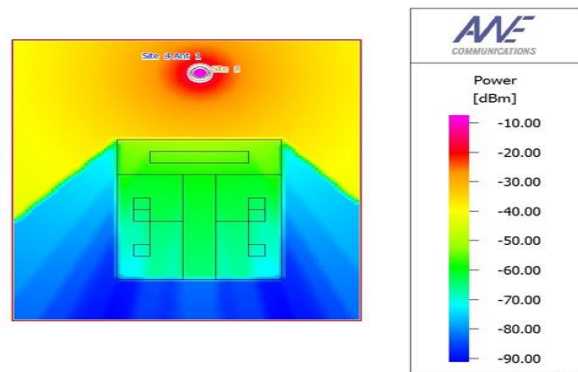


Фиг. 4.4. Проектиране на симулационен модел на сграда в WallMan

На фиг. 4.5 е показана в 3D координатна система проектираната сграда, като е визуализиран експеримент с ненасочена антена. Работната честота е $f=2000\text{ MHz}$, а предавателната мощност е 100 mW (20 dBm).



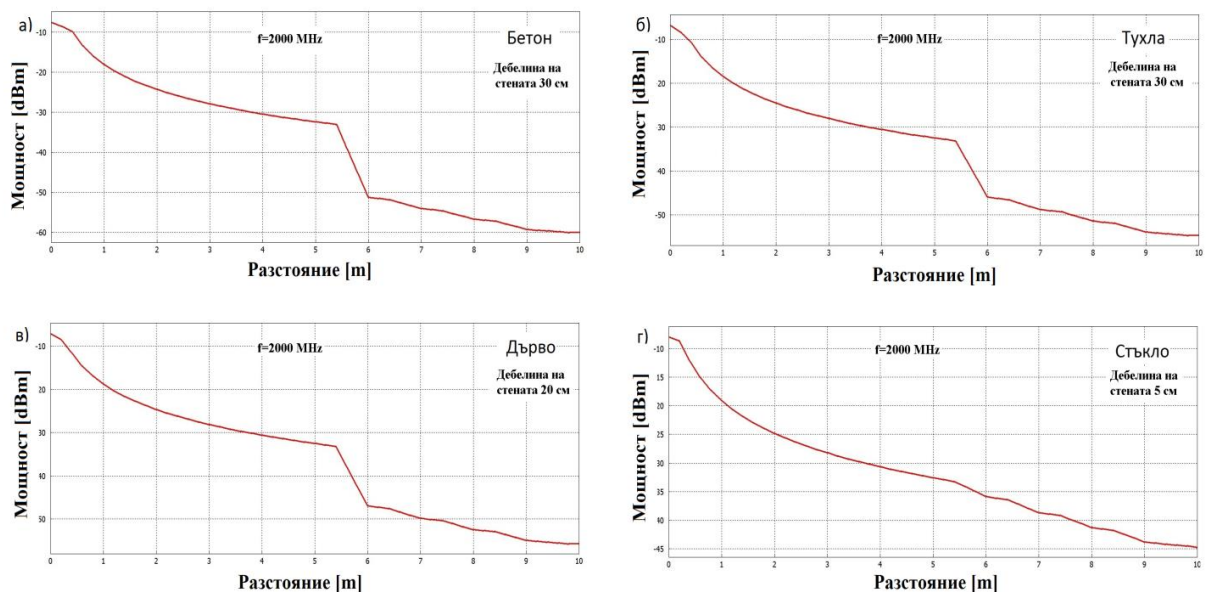
Фиг. 4.5. Разпределение на мощността при преминаване през бетонна стена в 3D вариант



Фиг. 4.6. Разпределение на мощността в 2D при преминаване през стена от червена тухла

На фиг. 4.6 в 2D формат е показана работата на ненасочената антена, разположена на височината на втория етаж на сградата, изграден от червена тухла. На цветовата скала се вижда разпределението на мощността в изследваната експериментална област.

За получаване на графичните зависимости е използвана единна методика, като и при четирите случая разстоянието е до 10 m , измерено от предавателната антена. Графичните зависимости на приемната мощност P , dBm в зависимост от разстоянието за четирите случая са показани на фиг. 4.7. Предавателната антена се намира на разстояние $5,5\text{ m}$ от фасадата на сградата.



Фиг. 4.7. Графични зависимости на мощността във функция от разстоянието при четирите случая (бетон, тухла, дърво и стъкло)

В табл. 4.2 са дадени стойностите на приемната мощност в dBm във функция от разстоянието, като за повишаване точността на симулационния експеримент са снети през $1 m$.

Таблица 4.2. Затихване на сигнала при преминаване през различни строителни материали

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Приемна мощност при преминаване през бетон, (dBm)	-20	-24	-28	-30	-32	-52	-54	-56	-58	-60
Приемна мощност при преминаване през тухла, (dBm)	-20	-24	-28	-30	-32	-45	-48	-52	-55	-56
Приемна мощност при преминаване през дърво, (dBm)	-20	-24	-28	-30	-32	-47	-50	-52	-53	-54
Приемна мощност при преминаване през стъкло, (dBm)	-20	-24	-28	-30	-32	-36	-38	-41	-44	-45

4.5. Изводи към четвърта глава:

В тази глава е изследвано разпространението на радиосигнали при преминаване през различни строителни материали. За целта както теоретично, така и симулационно са направени няколко изследвания в програмните среди на Matlab и WinProp, които могат да доведат до следните заключения:

1. От резултатите на теоретичното изследване (табл. 4.1) се вижда, че при фронтално падащ лъч на електромагнитната вълна към фасадата на сградата коефициентът на отразяване R_{eTE} при осреднена честота $f=2000 MHz$ е : за бетон - 0,42; за тухла - 0,31; за дърво - 0,15; за стъкло - 0,44. За коефициента на предаване T_{eTE} стойностите са: за бетон - 0,58; за тухла - 0,69; за дърво - 0,85; за стъкло - 0,56.

2. В резултат от симулационното изследване (табл. 4.2) се получават стойностите на загубите на радиосигнала при преминаване през различни строителни материали (за бетон - 20 dB; за тухла - 13 dB; за дърво - 15 dB; за стъкло е 4 dB).

3. Симулационните експерименти са необходими за определяне на загубите, вследствие преминаване на електромагнитната вълна през стени, изпълнени от различни строителни материали. Това изследване може да послужи при радиочестотно планиране на различни по вид и структура сгради, за по-прецизно разположение на комуникационното оборудване, с цел по-добро и оптимално покритие на потребителите, намиращи се вътре в сградата.

В. КЛАСИФИКАЦИЯ НА ПРИНОСИТЕ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

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

1. Разработен е алгоритъм за оптимално решение при избор на симулационен математичен и емпиричен модел на разпространение на радиовълните с цел изследване на процесите на разпространението на електромагнитното поле в различни по структура и състав еднородни среди.
2. Приложени са математични и емпирични модели на разпространение на радиосигналите и е направена оценка на изменението на енергетичните характеристики на разпространяващото се електромагнитното поле.
3. Създадена е методика за симулационно изследване на изменение на интензивността на електромагнитното поле при разпространение през различни по структура и състав среди.
4. Разработен е алгоритъм за оптимално решение при избор на симулационен математичен и емпиричен модел на разпределение на мощността на разпространяващото се електромагнитно поле в хибридни (разнородни) среди.
5. Реализирана е сравнителна оценка при разпространяване на радиовълните през различни строителни материали, което дава възможност да се направи радиочестотно планиране на различни по вид сгради с цел оптималното разположение на радиокомуникационното оборудване.

Г. ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

[A.1] Ташков Н., Р. Цветков, Изследване на радиочестотните модели в градска среда, Международна научна конференция „УНИТЕХ 2016“ - Габрово, 18-19.11.2016г., Том 2, ISSN 1313-230X, стр.97-101;

[A.2] Ташков Н., Р. Цветков, Изследване на радиочестотни модели за вътрешно разпространение на сигнала, Научна конференция – РУ&СУ'16 Научни трудове на Русенския университет 2016г, ISSN 1311-3321, том 55, серия 3.2., стр. 19 ÷ 24;

[A.3] Р. Цветков, Радиоразпръскване в сложна архитектурна среда, Международна научна конференция „УНИТЕХ 2017“ - Габрово, 17-18.11.2017., Том 2, ISSN 1313-230X, стр.192-196;

[A.4] Ташков Н., Р. Цветков, Optimal planning of an URBAN Wi-fi network. Научни трудове на Русенския университет 2017г, ISSN 1311-3321, том 56, серия 3.2., стр. 31 ÷ 36;

[A.5] Ташков Н., Р. Цветков, Research of transmission loss in radiowave propagation effected by building materials. Списание на Технически университет - Габрово, JTUG-2018-0004.R1, 2018 г. (приета за печат)

“Radio Frequency Planning of Telecommunication Networks”

Author: Rosen Ivanov Tsvetkov

Annotation:

Modern communications for building reliable networks are predominant for all major requirements regarding the location and accessibility of plants and customers. Wireless communication networks provide fast and easy access. In order to build such a network, it is of great importance to pre-design and analyze the surrounding environment in which the signal will spread.

Research on wireless communications networks requires a prior study of the standards of the IEEE 802.11 (Wi-Fi) standard and their proper implementation. Another factor for achieving a successful result when designing and commissioning is the knowledge and efficient usage of specialized software products, such as WinProp.

The main goal of the research The main goal of the research is modern wireless communication standards (IEEE 802.11) and networks (Wi-Fi). The present study presents the methods of planning, designing and diagnostics during operation and configuration of the parameters of the wireless environment in wireless Wi-Fi network.

The subject of research is the variety of processes regarding transmission, reception and synchronization over the air environment as well as the dependencies concerning the parameters determining the propagation of the radio waves in specific conditions.

The main contributions of the thesis have applied scientific character and give importance and usefulness during planning, construction, setup and operation of wireless networks.