

**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА**  
**ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ**  
**КАТЕДРА “ТЕОРЕТИЧНА И ИЗМЕРВАТЕЛНА**  
**ЕЛЕКТРОТЕХНИКА”**

маг. инж. Златан Колев Ганев

**ОПТИМИЗИРАН ЕНЕРГИЕН МОДЕЛ НА**  
**БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**на дисертация за получаване на образователна и**  
**научна степен “ДОКТОР”**

Научна специалност: ”Теоретична електротехника”  
шифър: 02.04.01

**Научен ръководител:** доц. д-р инж. Сава Василев Савов

**Рецензенти:**

1. ....
2. ....

**Варна**  
**2016**

Дисертационният труд е обсъден на ..... г. в катедра  
“Теоретична и измервателна електротехника” на разширен  
катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна №  
..... г. и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра “Теоретична и измервателна  
електротехника” като асистент по дисциплината „Теоретична  
електротехника”.

**Автор:** маг. инж. Златан Колев Ганев

**Заглавие:** Оптимизиран енергиен модел на безжични сензорни  
мрежи

**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА**  
**ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ**  
**КАТЕДРА “ТЕОРЕТИЧНА И ИЗМЕРВАТЕЛНА**  
**ЕЛЕКТРОТЕХНИКА”**

маг. инж. Златан Колев Ганев

**ОПТИМИЗИРАН ЕНЕРГИЕН МОДЕЛ НА**  
**БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**на дисертация за получаване на образователна и**  
**научна степен “ДОКТОР”**

**Варна**  
**2016**

**Дисертационният труд съдържа 172 страници, включително 105 фигури, 27 таблици и 2 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 109 заглавия, от които 98 на латиница, повечето публикувани след 2000 г.**

**Защитата на дисертационния труд ще се състои на ..... г.  
от ..... ч. в .....  
на открито заседание на жури, сформирано със заповед на  
Ректора № ..... / ..... г.**

**Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се във  
ФД “Докторанти”, стая 318 НУК**

## ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

**АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА:** Развитие на безжичните комуникации поставя своите изисквания при проектирането на „БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ“ (БСМ). Това са мрежи с децентрализирана структура, в които информацията се предава безжично, предимно чрез радио или оптична връзка. БСМ са предпочитани, когато изграждането на инфраструктура е трудно, икономически неизгодно, мрежата има временно предназначение. Сензорните възли (СВ) могат да се поставят хаотично в областта за наблюдение (например спуснати от самолет), като всеки един от тях осъществява комуникация с близко стоящите до него възли. Събраната информация се предава най-често постъпково (multi-hop), като се избира най-оптималният маршрут до базовата станция (БС) или до централен възел наречен шлюз (Gateway). Там данните се обработват и изпращат към администратора, който следи процесите в наблюдавания район.

Компактността на устройствата и възможността за бързо разполагане на сензорните мрежи ги прави изключително подходящи за аварийни ситуации, например пожари, наводнения и други природни бедствия. Също така те намират приложение и в други области, като например: отбрана и сигурност (откриване на обекти върху бойното поле, проследяване на вражески действия, откриване на отровни газове или повишени нива на радиация); земеделие (следене на температурата, влажността и пр.) строителство (интелигентни сгради); медицина (проследяване състоянието на пациентите, разпространение на зарази); екология (изследване миграцията на животинските видове, движение на ледниците, вулканични изригвания и пр.).

Изброените особености на БСМ водят до определени изисквания: ниска консумация на енергия (тъй като се работи с ограничено автономно захранване); малки размери на сензорите; сигурност и защитеност на предаваните данни. Характерно за възлите в БСМ е, че имат ограничен обхват за предаване на информацията. За това в повечето случаи пакетите от данни се предават от източника до получателя, преминавайки през множество междинни възли. Този способ позволява да се снижи нивото на изразходваната енергия.

- Кратък анализ за състоянието на изследванията по проблема:

На първо място трябва да отбележим че безжичните сензорни мрежи бързо намират своето приложение в различни области на живота около нас. Търсят се рационални методи за повишаване на тяхната енергийна ефективност, живот, защитеност и пр. Универсално решение няма! Подходът е индивидуален и е съобразен с конкретно поставените задачи и цели. Например когато искаме да изградим по-сигурна мрежа трябва да вземем под внимание, че с това се увеличава консумираната от нея енергия. При намаляване размера на сензорните възли пък се намалява и енергийният им ресурс (тъй като се работи с индивидуално-автономно захранване). Също така важна роля при избора на преносната среда (оптични или радиовълни) и за позиционирането на възлите в БСМ играе роля релефът и особеностите на околната среда. Трябва да се отчете и факта, че участниците в комуникацията, както и преградите, които я възпрепятствуват, може да са статични или да се движат. За това в радиоканалите протичат случайни процеси, вариращи във времето. От това следва, че в общия

случай трябва да се прилага теорията на случайните процеси. Освен това, каналите при радиоразпространение са и честотно зависими (както знаем процесите на отразяване, дифракция и разсейване са в пряка зависимост от дължината на вълната), което поражда допълнителни трудности пред разработчиците.

Въпреки срещаните трудности може да се каже, че бързото развитие и внедряването на безжичните сензорни мрежи ще продължи, особено там където се работи в трудно достъпни райони и там където изграждането на инфраструктура или използването на хора е нецелесъобразно или невъзможно.

**МЯСТО НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:** Експерименталните изследвания са направени в Университета в град Патра – Гърция. Сензорните възли, както и цялото оборудване са осигурени от Лабораторията – APEL (Applied Electronics Laboratory) в Департамента по Електроника и Компютърна Техника към същият университет. Теоретичните изследвания (построяване на модела и разработване на Matlab-програмите) бе извършено в кат. ТИЕ на ТУ Варна.

**МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ:** За решаване на поставените в дисертацията изследователски задачи е използван комплексен подход на база теорията на електромагнитното поле и разпространението на радиовълните. Моделирането е извършено на база разработени алгоритми при използване на програмна среда на Matlab и Excel, осигуряващи възможност за осъществяване на сложни математически изчисления и пространствена визуализация в графична форма на получените резултати за изследваните величини. При разработените алгоритми са използвани емпирични и аналитични методи. Използвана е специална софтуерна програма, работеща в операционната система TinyOS за намиране на RSSI.

**НАУЧНА НОВОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:** Научната новост на дисертационния труд се състои в следното: **1.** Прилагайки теорията на радиоразпространението на вълните и тяхното адекватно моделиране са *разработени алгоритми*, които гарантират енергийната ефективност и надеждната комуникация между възлите в безжична сензорна мрежа. **2.** Установено е *влиянieto на различни видове фактори* върху комуникацията между безжични сензорни възли в БСМ; **3.** Предложен е *теоретичен подход* за моделиране при използването на специфични конфигурации в безжични сензорни мрежи; **4.** Изчислена е *приетата мощност*  $P_r(d)$  на конкретно зададено от нас разстояние между сензорни възли; **5.** Изчислена е *вероятността* приемания сигнал  $P_r$ , да бъде по-голям от зададено от нас ниво (праг) при комуникацията между сензорни възли; **6.** Процентно прогнозиране за област от БСМ със определен радиус, дали приеманата мощност вътре в зададената област ще е *по-голяма от зададения праг*; **7.** Чрез използване на модел за *постъпково предаване* (multi-hop) на данните между безжични сензорни възли, да се покаже, че загубите за предаване на информацията в отворени и затворени пространства между два крайни възела могат да бъдат значително намалени и от там може да бъде *повишена енергийната ефективност* на безжична сензорна мрежа.

**ПРАКТИЧЕСКА ЦЕННОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:** Предложените и виртуално изследвани проектирани модели за комуникация между сензорните възли в безжичните сензорни мрежи могат да бъдат използвани като основен

елемент за оптимизирането им. От направените експерименти при конкретно зададените от нас параметри се установи, че за получаване на по-добра ефективност е нужен *индивидуален подход* за всеки един от случаите. Установи се, че когато имаме пряка видимост между възлите в мрежата, когато те са разположени на известно разстояние над земята и дистанцията между тях е по-малка са налице по-добри резултати. Получените резултати могат да се използват в софтуерни симулатори като модел за проектиране на комуникацията при различна дистанция, среда, работна честота, мощност на приемо-предаване, и позициониране на възлите в безжична сензорна мрежа.

**АПРОБАЦИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО:** По темата на дисертационния труд, основните резултати от изследванията са докладвани и публикувани в следните международни и национални форуми с международно участие и издания:

**Рецензирани научни издания в страната:**

- *“Годишник на Техническият университет във Варна”*, 2011, 2012.

**Международни конференции:**

- *International Scientific Conference on Information in Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*, 2013, 2014.
- *Communications, Electromagnetics and Medical Applications (CEMA)*, 2014.
- *International Scientific Symposium – Electrical Power Engineering*, Varna, Bulgaria, 2014.
- *International Conference of Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 2015.

Дисертацията е разработена с тематичното и финансово осигуряване от „Договор за научен проект в помощ на докторант” и ФД ”Докторанти” на ТУ-Варна.

**СТРУКТУРА И ОБЕМ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД:**

Дисертационният труд съдържа 172 страници, включително 105 фигури и 27 таблици, списък на използваната литература от 109 заглавия, от които 98 на латиница и 2 приложения. Основният текст е изложен на 127 страници и се състои от съдържание, четири глави, заключение-резюме на получените резултати, библиография и списък на публикациите по темата на дисертационния труд. Част от използваният базисен математически апарат за анализ и моделиране и разработените алгоритми в програмна среда Matlab с оглед на удобство при използване, са оформени като две отделни приложения към дисертацията в обем от 8 страници.

В автореферата са приети означения на фигурите и формулите, съответстващи на тези от дисертацията.

**КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

**УВОД.** Обоснована е необходимостта от провеждане на научното изследване при формулирана същност и актуалност на проблема. Посочени са основните изисквания и особености на безжичните сензорни мрежи, разгледани в дисертационния труд.

## **ГЛАВА ПЪРВА. Въведение в безжичните сензорни мрежи.**

Разработването и използването на БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ (БСМ) по подобие на интернета може да намери своите корени във военното дело. Там първоначално са били изпробвани и внедрени сензори, свързани в мрежа за локализация, проследяване на различни обекти и пр. Така въз основа на изградени вече проекти за военните, а също и бързото развитие в областта на микроелектрониката и безжичните комуникации, доведе до постепенното внедряване на БСМ в множество направления на живота.

Безжичните сензорни мрежи представляват мрежи с децентрализирана структура, в които информацията се предава безжично, предимно чрез радио или оптична връзка и има високи изисквания за размера и продължителността на живот на възлите.

Основните задачи на възлите в БСМ са засичане и отчитане на различни параметри, като температура, осветеност, влажност, радиация и пр. Събирането на желаната информация от определен район може да се извършва в продължение на месеци и години. За изпълнението на тези задачи функционалността на възлите се разделя на три групи (връзка с околната среда; изчисления и обработка; комуникация), като всяка от тях подлежи на оптимизация :

*Връзката с околната среда* включва засичане факторите на средата и отчитане на техните стойности, както и откриването на съседни възли и определяне на координатите им.

*Изчисленията* във възлите са свързани с анализа, обработката и обобщаването на информацията. За целта се ползват различни видове микроконтролери .

За *комуникацията* между възлите има алгоритми и протоколи за маршрутизация, които зависят от архитектурата на мрежата. Те могат да се класифицират в три основни групи съобразно тяхната логическа структура: *централизирани* (data-centric), *йерархични* (hierarchical) и *локално-базирани* (location-based).

Изброените особености на БСМ водят до определени изисквания: ниска консумация на енергия (тъй като се работи с ограничено автономно захранване); малки размери на сензорите; сигурност и защитеност на предаваната информация.

Характерно за възлите в БСМ е, че имат ограничен обхват за предаване на информацията. В повечето случаи пакетите се предават от източника до получателя, преминавайки през множество междинни възли. Този способ позволява да се снижи нивото на изразходваната енергия, но от друга страна налага и условието за динамична маршрутизация на предаване.

Както беше споменато сензорната мрежа се състои от елементи за измерване, обработка и комуникация. Тя дава възможност на администратора да наблюдава и реагира на явления и събития в определена среда. Има четири основни компонента в БСМ: набор от разпределени сензори; вътрешна мрежова свързаност (най-често безжична); централна точка на информационно групиране; набор от изчислителни ресурси за обработка на данните.

Безжичните сензорни мрежи намират приложение в различни области, като: *отбрана и сигурност* (откриване на обекти върху бойното поле, проследяване на вражески действия, откриване на отровни газове или повишени



нива на радиация); *земеделие* (следене на температурата, влажността и пр.) *строителство* (интелигентни сгради); *медицина* (проследяване състоянието на пациентите, разпространение на зарази); *екология* (изследване миграцията на животинските видове, движение на ледниците, вулканични изригвания) и др.

Въз основа на направения обзор и анализ на основните характеристики на на безжичните сензорни мрежи са формулирани следните изводи:

1. На първо място трябва да отбележим, че безжичните сензорни мрежи бързо намират своето приложение в различни области на живота около нас. Търсят се рационални методи за повишаване на тяхната енергийна ефективност, живот, защитеност и пр. Универсално решение няма. Подходът е индивидуален и е съобразен с конкретно поставените задачи и цели. Например, когато искаме да изградим по-сигурна мрежа трябва да вземем под внимание факта, че с това се увеличава консумираната от нея енергия.

2. Също така важна роля при избора на преносната среда (оптични или радиовълни) и за позиционирането на възлите в БСМ играе релефът и особеностите на околната среда.

3. Въпреки срещаните трудности трябва да отбележим, че бързото развитие и внедряването на безжичните сензорни мрежи ще продължи, особено там където се работи в трудно достъпни райони и там където изграждането на инфраструктура или използването на хора е нецелесъобразно или невъзможно. Широкомасштабното използване на БСМ идва от това, че те имат много *предимства* пред традиционните методи за измерване и наблюдение:

- Като първа и много важна особеност е цената им. Използването на евтини микроконтролери и предаватели с ниска консумация на енергия често снижава общата стойност на всички възли в мрежата.

- Друго важно предимство е по-малкият разход на енергия, като това от своя страна също води до снижаване на разходите.

- Също така често се постига и по-добро покритие в сравнение с централизираните методи за наблюдение. От това може да се намали общото ниво сигнал/шум и да се увеличи качеството на предаваните сигнали.

- Изграждането на БСМ става бързо и лесно, като „излизането от строя“ на сензорни възли не повлиява особено на работата в останалата част на мрежата.

- Поради своята структура и организация на управление могат безпроблемно да се добавят сензорни възли, като това спомага за мащабируемостта.

- Доказано е, че БСМ са добро средство за мониторинг и контрол, както в отворени така и в затворени пространства.

- Често размерът на сензорните възли е от порядъка на няколко милиметра, което ги прави трудно разпознаваеми и откриваеми от противника.

Съчетано с почти неограничената наличност на сензорни модули, гъвкавостта предлагана от БСМ има голям потенциал за изграждането на специфични решения. Тъй като в процеса на изучаване на безжичните сензорни мрежи беше установено, че за предаването на данните се изразходва между 100 и 1000 пъти повече енергия отколкото за обработката им, беше взето решение в настоящата дисертация фокусът да бъде насочен към *оптимизация при*

комуникацията между сензорните възли. За тази цел се прилагат модели за разпространение на сигналите, описани подробно в следващата Глава 2.

Представеният кратък обзор на проблема позволява дефиниране на обекта и предмета на изследването, а също и на основната цел и задачи на дисертационния труд.

I. *Обект на изследването*: Предаване на данни между безжични сензорни възли, разположени в затворени и отворени пространства при различни условия на комуникация между тях.

II. *Предмет на изследването*: Изграждане на оптимизиран енергиен модел за комуникация в безжични сензорни мрежи.

III. *Цели на изследването*: Анализирани и изследвани на факторите, които влияят на основните параметри при комуникацията между сензорни възли с цел изграждане на оптимизиран енергиен модел за комуникация в безжични сензорни мрежи.

IV. *Задачи на изследването*: За реализиране на поставената цел следва да бъдат решени следните основни изследователски задачи:

1. Подробно изучаване приложението, устройството и начина на работа на БСМ и избор на конкретно решение за тяхната оптимизация.

2. Подробно изучаване и избор на подходящи модели в зададената област на оптимизацията.

3. Избор на подход при моделирането (емпиричен, аналитичен или комбиниран).

4. Разработване на софтуерна среда за симулации.

5. Разработване на алгоритъм за провеждане на експериментите и симулациите.

6. Анализирани и обобщаване на получените резултати.

## **ГЛАВА ВТОРА. Модели за вътрешно и външно разпространение на радиовълните.**

Познаването на радиоразпространението на вълните и тяхното адекватно моделиране е от съществено значение за разгръщане на безжичните сензорни мрежи по начин, който гарантира енергийната ефективност и надеждната комуникация между възлите в мрежата.

Както знаем при ускореното движение на електрони се създава електромагнитно поле. Така че, ако направим устройство, което да генерира хармонични вълни и чрез антена тези вълни да се излъчват в свободното пространство, можем да предаваме информация безжично на големи разстояния. В случая антената се явява интерфейс между генератора и канала за връзка. Радиоканалите поставят редица ограничения върху функционирането на безжичните комуникационни системи. Това се дължи преди всичко на неблагоприятната среда за разпространение, което поражда редица неудобства при предаването на сигналите. Тук имаме затихване, дължащо се най-общо на многократно разсейване и много други фактори, с които трябва да се съобразяваме. Също така в някои случаи имаме пряка видимост LOS (line of sight) между предавател и приемник, а понякога нямаме такава видимост NLOS (non-line of sight) – тогава комуникацията се възпрепятства от сгради, растителност и пр.

От друга страна, участниците в комуникацията, както и преградите, които я възпрепятствуват, може да са статични или да се движат. За това в радиоканалите протичат случайни процеси, вариращи във времето. От това следва, че за описание на приетите сигнали в общия случай трябва да се прилага теорията на случайните процеси. Освен това, каналите при радиоразпространение са и честотно зависими (както знаем процесите на отразяване, дифракция и разсейване са в пряка зависимост от дължината на вълната), което поражда допълнителни трудности пред проектантите на безжичните сензорни мрежи (БСМ). Като заключение от горенаписаното може да се каже, че моделирането на радиоканалите за разпространението на сигналите е една от най-трудните задачи в планирането на БСМ. При добре избран модел, обаче, ние можем да симулираме една БСМ още преди тя да бъде изградена. Това се прави, тъй като тези мрежи са енергозависими и за това е нужно да се постигне максимална ефективност при изграждането им.

Има три подхода за моделиране:

- *Емпиричен* - вземат се данните от измерванията и се нанасят на координатна система, след което се прави апроксимация.
- *Аналитичен* - механизмите за разпространение се описват математически и така се създава моделът.
- *Смесен* - комбинация от първите два подхода.

При разработването на дисертационния труд бяха изследвани множество публикации (статии и книги), при които се описват различни модели свързани с разпространението на сигналите. Като се започне от по-елементарните, които просто математически изразяват нелинейното затихване на сигнала във функция от разстоянието и се стигне до модели, отчитащи както факторите на средата, така и конкретни параметри (като мощност и честота на предаване, разположение на възлите и пр.), където посредством емпирични данни и математически способности са постигнати реалистични резултати.

От направения кратък обзор става ясно, че ако не се вземат под внимание околната среда, ефекта от отразяване, дифракция и разсейване, както и отчитането на честотата и мощността на предаване не може да бъде направен добър модел за разпространение на сигналите. Евентуална грешката заложена още тук в първия (физически) слой на комуникацията неминуемо ще бъде мултиплицирана и в по-горните четири слоя (канален, мрежов, транспортен, приложен). Тогава, дори и те да са добре моделирани, крайният резултат от изграждането на една такава мрежа би бил лош. Например, би имало вероятност за недобра комуникация между възлите, а на места даже и от прекъсване на мрежата (т.е. би се получила територия с недобро покритие) поради слаб сигнал. Или пък при по-големи нива на сигнала може да се получи интерференция между сигналите на различните възли и това отново би довело до провал на комуникацията.

Когато, обаче, получим реалистични резултати в следствие на добър модел, който сме задали, можем да разположим нашата БСМ по подходящ начин, като с това повишим нейната надеждност, енергийна ефективност и живот. Това е така, тъй като може да се намери оптималното решение за мощността на предаване между сензорните възли. От една страна тя трябва да бъде достатъчно

голяма за качествено приемо-предаване на данните, но от друга страна трябва да не се получава интерференция и преразход на енергия в мрежата.

След направения задълбочен анализ на различни модели за разпространение беше взето решение да се направят измервания на силата на приетия сигнал RSS от безжично свързани сензорни възли при *вътрешно разпространение* (коридори, офиси и лаборатории, разположени на различни етажи) и *външно разпространение* (градини и паркинги). За определяне на загубите при разпространение на сигнала, като подходящ беше избран модел „*Path-Loss Shadowing Model*“ (PLSM), т.е. „Загуби в разпространението с отчитане на засенването“.

Той беше избран, защото при него освен математическото изразяване на нелинейното затихване на сигнала във функция от разстоянието се отчитат още и факторите на средата, а така също и влиянието на конкретни параметри, като мощност и честота на предаване и това става по един относително несложен математически начин. Иначе казано, този алгоритъм съчетава в себе си основните важни противоречиви изисквания – сравнително добра точност с относителна простота. Това прави този алгоритъм достатъчно реалистичен и достоверен, поради което той бе избран за приложение в следващите две глави на дисертацията, с което се постига изпълнение на поставените в нея цели.

## **ГЛАВА ТРЕТА. Изследване предаването на сигнали между сензорни възли разположени в затворени пространства.**

### **3.1. Увод.**

В тази глава са разгледани различни случаи за предаване на данни между безжични сензорни възли, разположени в затворени пространства. В направените експерименти се измерва Силата на Приетия Сигнал - Received Signal Strength (RSS). След това чрез изчисления са намерени: 1) *Загубите при предаване на сигналите* - Path Loss (PL); 2) *Константата на загубите* - Path Loss constant ( $n$ ); 3) *Стандартното отклонение* - Standart Deviation ( $\sigma$ ); 4) *Приетата мощност* във функция от разстоянието –  $P_r(d)$ ; 5) *Вероятността* приемания сигнал  $P_r$ , да бъде по-голям от зададено ниво (праг)  $\gamma$  -  $[P_r(d) > \gamma]$ ; 6) *Процентно прогнозиране* на това, дали приеманата мощност вътре в областта със зададен радиус  $d$  ще е по-голяма от зададен праг  $\gamma$  [dBm] -  $U(\gamma)$ .

За по-точно и достоверно представяне на загубите PL са използвани два модела: 1) „*Log-distance Path Loss Model*” – (LDPLM) и 2) „*Path-loss Shadowing Model*” – (PLSM). Също така накрая е използван модел на базата на *multi-hop* способ (постъпково предаване), чрез който значително се намаляват загубите при предаването между възлите.

### **3.2. Модел на разпространение и формули за статистическа обработка на данните от получените резултати.**

#### 1) *Log-normal Shadowing Model.*

Използван е “Log-normal Shadowing Model” (модел на *логаритмично-нормално засенчване*):

$$PL[dB] = PL(d_0) + 10n \lg(d/d_0) + X_\sigma \quad (3.1)$$

$$RSS[dBm] = P_t - PL(d) \quad (3.2)$$

$$RSS[dBm] = P_t - PL(d_0) - 10 \lg(d/d_0) - X_\sigma \quad (3.3)$$

където  $d$  е разстоянието на приемо-предаване (T-R),  $d_0$  е опорното разстояние,  $P_t$  е мощността на предаване в [dBm],  $PL$  са загубите в [dB],  $n$  е константата на загубите.  $X_\sigma$  е случайна променлива с Гаусово разпределение с нулева средна стойност и със стандартно отклонение  $\sigma$  [dB].  $X_\sigma$  има приблизителна стойност от 8 до 10 dB (при изчисленията е взета стойност 9 dB) и може да се намери чрез формулата:

$$X_\sigma(RSS) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(RSS - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.4)$$

където  $\mu$  е средната стойност на RSS (тук равна на нула).

## 2) Намиране на $n$ и $\sigma$ .

Използван е методът на най-малките квадрати: MMSE (*minimum mean square error*) за намиране на константата на загубите ( $n$ ) и стандартното отклонение ( $\sigma$ ).

Отчитаме факта, че опорното разстояние за разпространение на сигналите във вътрешни помещения е  $d_0 = 1$  m и това, че загубите за това разстояние за конкретния случай  $PL(d_0)$  са известни.

Сумата от квадратичната грешка при всяко измерване (съпоставена с пресметнатата стойност), която трябва да се минимизира е:

$$S(n) = \sum_{k=0}^N (p_k - p'_k)^2 \quad (3.5)$$

където с  $p_k$  сме означили приетата мощност RSS, изчислена с уравнението,

$$p_k = RSS_k = RSS(d_0) - 10 \lg(d_k/d_0) \quad (3.6)$$

а с  $p'_k$  приетата мощност, получена от измерванията.  $k=1,2,\dots,N$ , а  $N$  е общият брой на направените измервания.

Необходимото условие за минимум е изразено по следния начин:

$$\frac{dS}{dn} = 0 \quad (3.7)$$

от където математически определяме константата на загубите  $n$ .

Стандартното отклонение ( $\sigma$ ) [dB] се намира по формулата:

$$\sigma[dB] = \sqrt{S(n)/N} \quad (3.8)$$

Установено е, че с увеличаване броят на измерванията ( $\sigma$ ) намалява.

## 3) Пресмятане на приетата мощност на определено разстояние.

За да се изчисли приетата мощност  $P_r$  ( $P_r = RSS$ ) на точно зададена дистанция  $d$  от предавателя, при намерени  $n$  и  $\sigma$ , може да се използва уравнението

$$P_r(d) = RSS(d) = RSS(d_0) - 10 \lg(d/d_0) + X_\sigma \quad (3.9)$$

Когато знаем мощността на предаване  $P_t$ , за изчисляване на  $P_r(d)$ , можем да използваме и уравнение (3).

4) Пресмятане на вероятността приемания сигнал  $P_r$  да бъде по-голям от зададено ниво ( $\gamma$ )  $\gamma$  [dBm].

$$\Pr\{P_r(d) > \gamma\} = Q\left(\frac{\gamma - P_r(d)}{\sigma}\right) \quad (3.10)$$

където

$$Q(z)=0.5[1 + \operatorname{erf}(z/\sqrt{2})] \quad (3.11)$$

а  $\operatorname{erf}(x)$  “error function” ,т.е. *функция на грешката* (използвана е директно от MatLab при изчисленията). За тези две специални функции вж. в Приложение П1.

5) Процентно прогнозиране за област със зададен радиус  $d$ , дали приеманата мощност вътре в областта ще е по-голяма от зададен праг  $\gamma$  [dBm].

Вероятността, полученото ниво на сигнала да бъде по-голямо от  $\gamma$  [dBm] е представена чрез следното уравнение:

$$U(\gamma)=0.5\{1+\exp(1/b^2)[1-\operatorname{erf}(1/b)]\} \quad (3.12)$$

където  $\operatorname{erf}(x)$  е дефинирана вече функция, а  $b$  е параметър, представен с уравнението:

$$b=(10\lg e)/(\sigma\sqrt{2}) \quad (3.13)$$

### 3.3 Фактори, които оказват влияние върху RSS и PL.

#### 3.3.1 Фактори свързани с хардуера на сензорните възли.

- 1) Радиочестота
- 2) Антена
- 3) Мощност на предаване

#### 3.3.2 Фактори свързани с разположението на възлите и околната среда.

- 1) Фактори свързани с разположението на възлите
- 2) Фактори свързани с околната среда

### 3.4. Експерименти и резултати от симулациите.

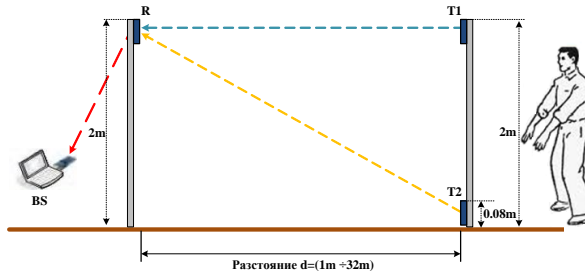
Експериментите са направени в Университета в град Патра – Гърция.

#### 3.4.1. Експеримент първи – Централен коридор.

Коридорът се намира на първият етаж в Департамента по Електроника и Компютърна Техника в Университета в град Патра.

##### 3.4.1.1. Схема на опитната постановка на експеримент първи.

Схема на опитната постановка на експеримента е показана на фиг. 3.7.



Фиг.3.7 Схема на опитната постановка на експеримент първи

##### 3.4.1.2 Резултати от измерванията и изчисленията от експеримент първи.

1) Намиране на RSSI [dBm] – намира се, както е обяснено в т.4.1.1, посредством специална софтуерна програма, която преобразува приетата информация от T1 и T2 в числа, които се изписват на екрана на Лаптопа.

2) Намиране на RSS [dBm] - използвана е формула (3.14), чрез която е изчислена силата на приетия сигнал от двата предавателя съответно  $RSS_{T1}$  и  $RSS_{T2}$  в [dBm].

3) Намиране на PL [dB] - използвана е формула (3.2), чрез която са изчислени загубите при разпространението на сигнала от двата предавателя съответно  $PL_{T1}$  и  $PL_{T2}$  в [dB] [П2.1].

4) Намиране на  $n$  и  $\sigma$  – Използвани са формули (3.5-3.8), както и линейна регресия с метода на най-малките квадрати : MMSE (*minimum mean square error*) за намиране на константата на загубите ( $n$ ) и стандартното отклонение ( $\sigma$ ) [dB] в средата на Matlab.

5) Намиране на PL [dB] чрез Log-distance Path Loss Model (LDPLM) – след като сме намерили  $n$ , загубите при разпространение на сигнала от двата предавателя  $PL(LDPLM_{T1})$  и  $PL(LDPLM_{T2})$ , намираме чрез уравнението:

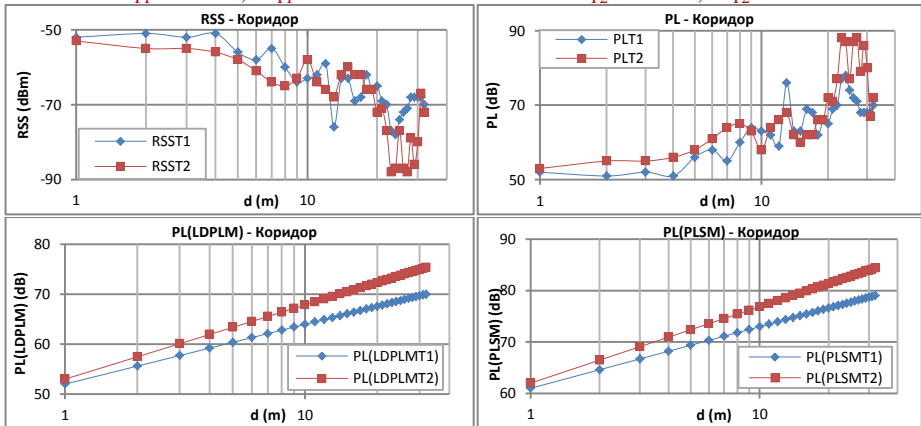
$$PL_{LDPLM}[dB] = PL(d_0) + 10 \lg(d/d_0) \quad (3.15)$$

6) Намиране на PL [dB], чрез Path Loss Shadowing Model (PLSM) - след като сме намерили  $n$ , загубите при разпространение на сигнала от двата предавателя  $PL(PLSM_{T1})$  и  $PL(PLSM_{T2})$ , намираме чрез (3.1).

### 3.4.1.2.1 Централен коридор: $P_t = 0$ dBm; $f = 2.480$ GHz; $d = 32$ m.

$$n_{T1} = 1.1969, \sigma_{T1} = 4.4936$$

$$n_{T2} = 1.4847, \sigma_{T2} = 7.2984$$

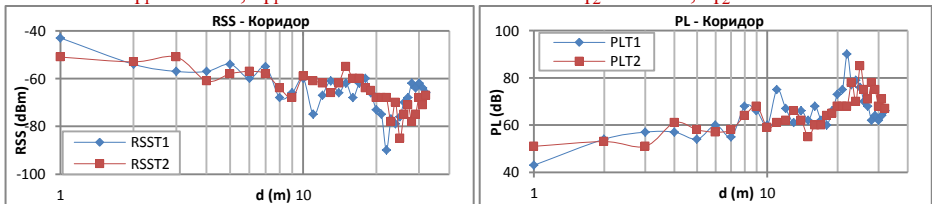


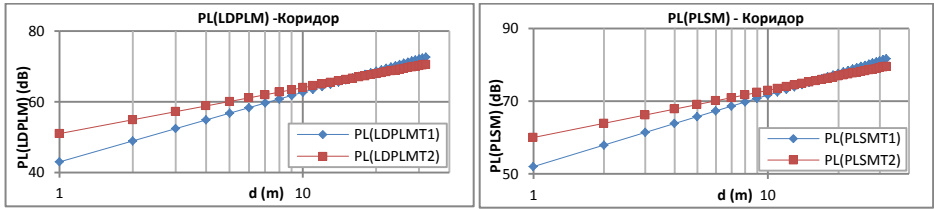
Фиг.3.9 Получени графики за Централен коридор ,  $P_t = 0$  dBm;  $f = 2.480$  GHz;  $d = 32$  m

### 3.4.1.2.2 Централен коридор: $P_t = 0$ dBm; $f = 2.405$ GHz; $d = 32$ m.

$$n_{T1} = 1.9683, \sigma_{T1} = 6.7113$$

$$n_{T2} = 1.2974, \sigma_{T2} = 5.2707$$



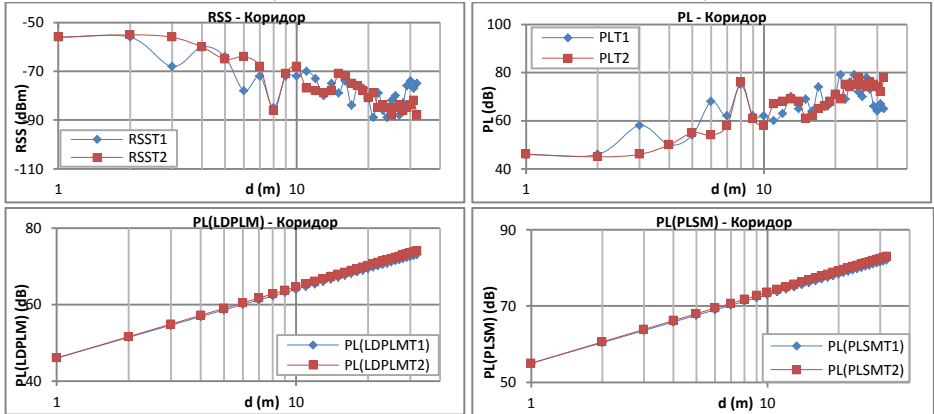


Фиг.3.10 Получени графики за Централен коридор ,  $P_t = 0$  dBm;  $f=2.405$  GHz;  $d=32$  m

### 3.4.1.2.3 Централен коридор: $P_t = -10$ dBm; $f=2.480$ GHz; $d=32$ m.

$$n_{T1}=1.7999, \sigma_{T1}=5.2761$$

$$n_{T2}=1.8583, \sigma_{T2}=4.7295$$

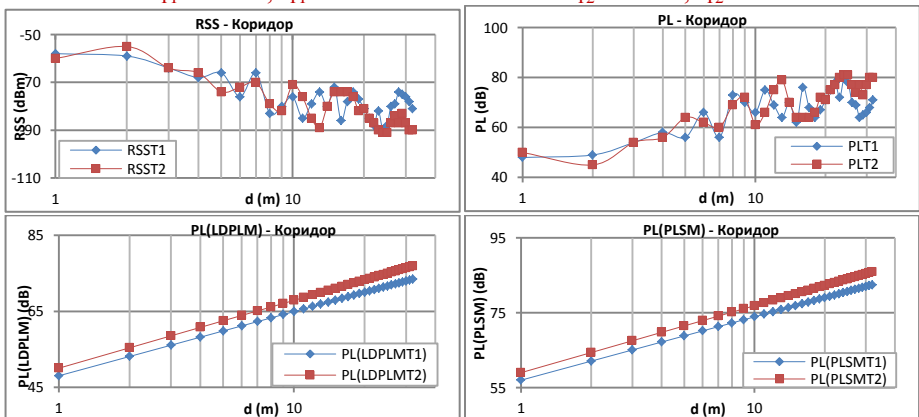


Фиг.3.11 Получени графики за Централен коридор ,  $P_t = -10$  dBm;  $f=2.480$  GHz;  $d=32$  m

### 3.4.1.2.3 Централен коридор: $P_t = -10$ dBm; $f=2.405$ GHz; $d=32$ m.

$$n_{T1}=1.6901, \sigma_{T1}=5.2650$$

$$n_{T2}=1.7867, \sigma_{T2}=4.8700$$



Фиг.3.12 Получени графики за Централен коридор ,  $P_t = -10$  dBm;  $f=2.405$  GHz;  $d=32$  m

## 3.4.2 Експеримент втори – Офиси.

Направени бяха измервания в четири офиса, разположени един до друг.

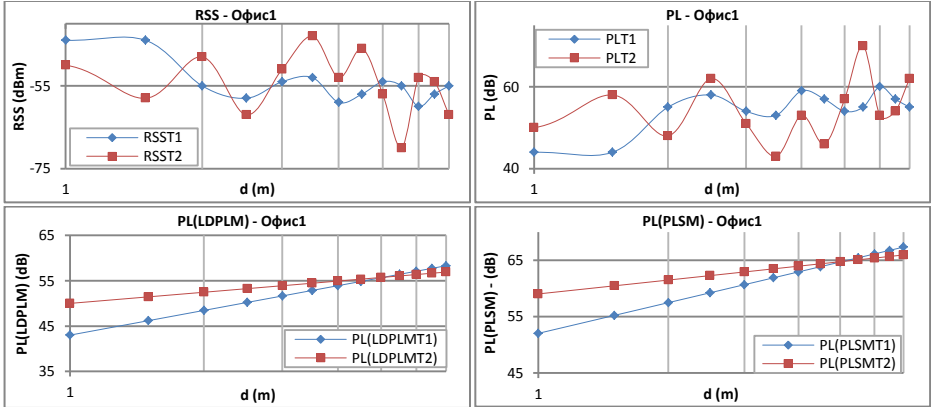
### 3.4.2.1 Резултати от измерванията и изчисленията от експеримент втори.



### 3.4.2.1.1 Офис едно: $P_t = 0$ dBm; $f = 2.480$ GHz; $d = 7$ m.

$$n_{T1} = 1.8117, \sigma_{T1} = 3.3493$$

$$n_{T2} = 0.8181, \sigma_{T2} = 6.9139$$

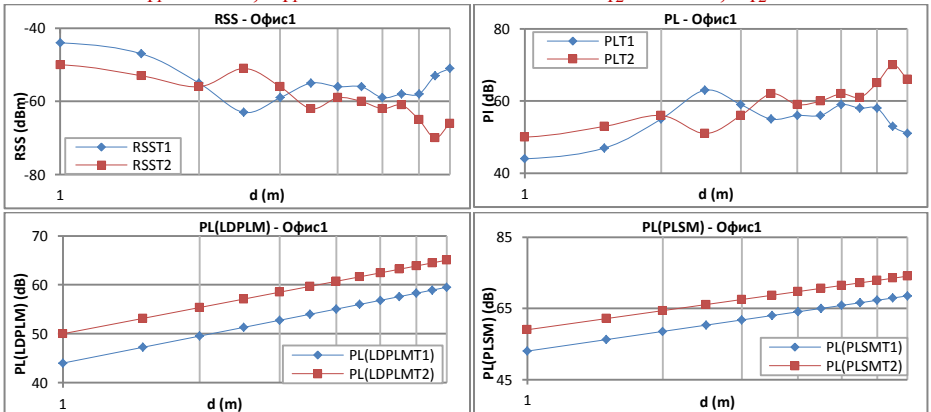


Фиг.3.17 Получени графики от Офис1,  $P_t = 0$  dBm;  $f = 2.480$  GHz;  $d = 7$  m

### 3.4.2.1.2 Офис едно: $P_t = 0$ dBm; $f = 2.405$ GHz; $d = 7$ m.

$$n_{T1} = 1.8347, \sigma_{T1} = 4.9628$$

$$n_{T2} = 1.7800, \sigma_{T2} = 2.6655$$

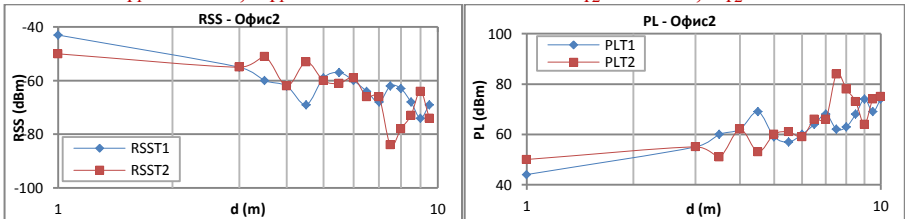


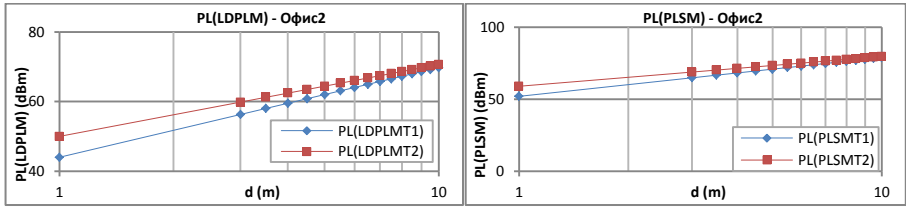
Фиг.3.18 Получени графики от Офис1,  $P_t = 0$  dBm;  $f = 2.405$  GHz;  $d = 7$  m

### 3.4.2.1.3 Офис две: $P_t = 0$ dBm; $f = 2.480$ GHz; $d = 10$ m.

$$n_{T1} = 2.5774, \sigma_{T1} = 3.8154$$

$$n_{T2} = 2.0642, \sigma_{T2} = 6.8508$$



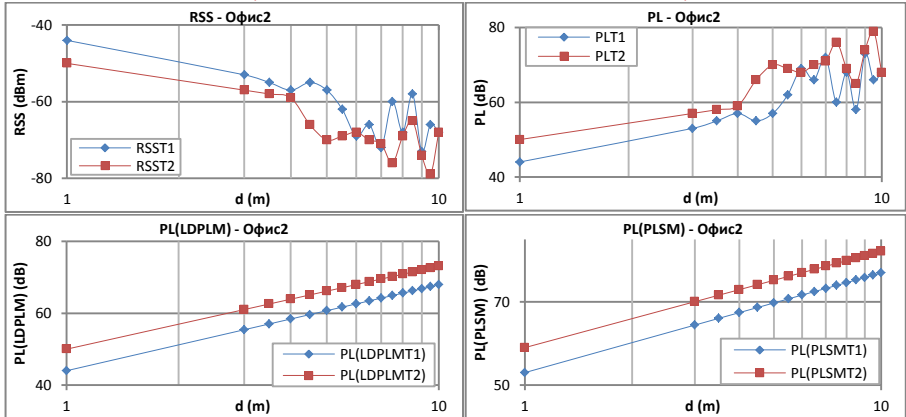


Фиг.3.19 Получени графики Офис2,  $P_t = 0$  dBm;  $f=2.480$  GHz;  $d=10$  m

### 3.4.2.1.4 Офис две: $P_t = 0$ dBm; $f=2.405$ GHz; $d=10$ m.

$$n_{T1} = 2.3914, \sigma_{T1} = 4.2790$$

$$n_{T2} = 2.3101, \sigma_{T2} = 3.8232$$

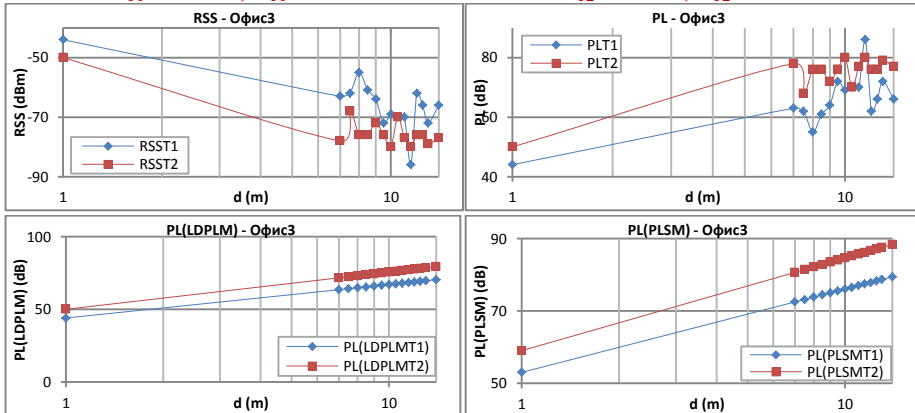


Фиг.3.20 Получени графики Офис2,  $P_t = 0$  dBm;  $f=2.405$  GHz;  $d=10$  m

### 3.4.2.1.5 Офис три: $P_t = 0$ dBm; $f=2.480$ GHz; $d=14$ m.

$$n_{T1} = 2.3037, \sigma_{T1} = 6.1076$$

$$n_{T2} = 2.5609, \sigma_{T2} = 3.2445$$

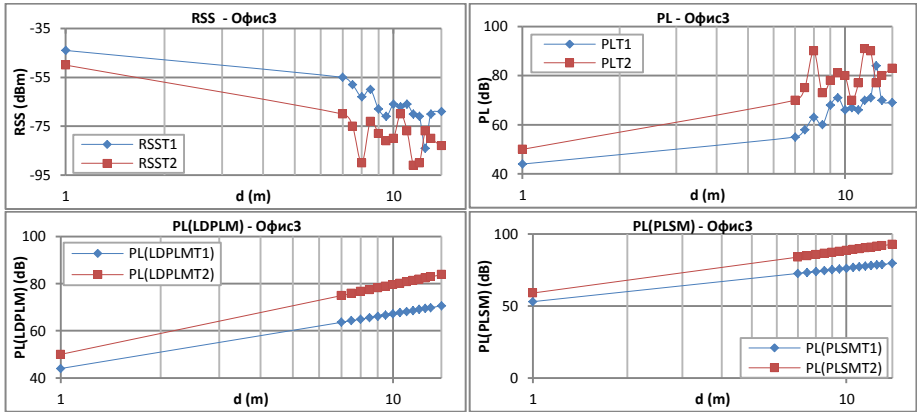


Фиг.3.21 Получени графики Офис3,  $P_t = 0$  dBm;  $f=2.480$  GHz;  $d=14$  m

### 3.4.2.1.6 Офис три: $P_t = 0$ dBm; $f=2.405$ GHz; $d=14$ m.

$$n_{T1} = 2.3202, \sigma_{T1} = 5.1466$$

$$n_{T2} = 2.9531, \sigma_{T2} = 6.0150$$

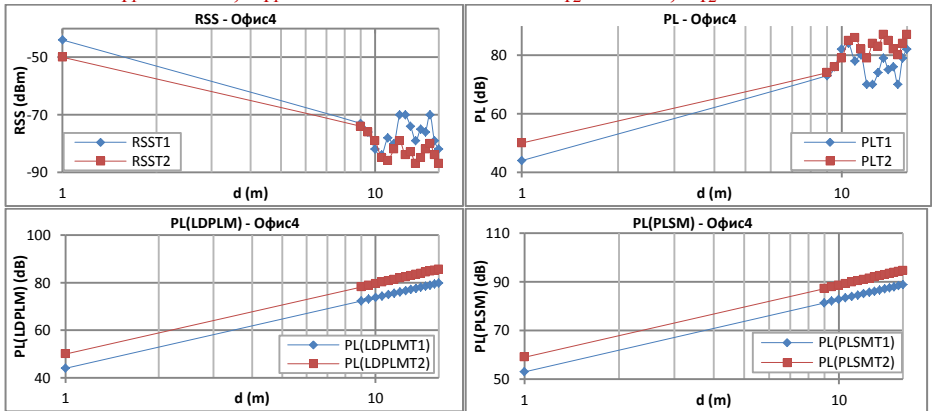


Фиг.3.22 Получени графики Офис3,  $P_t = 0$  dBm;  $f=2.405$  GHz;  $d=14$  m

### 3.4.2.1.7 Офис четири: $P_t = 0$ dBm; $f=2.480$ GHz; $d=16$ m.

$$n_{T1} = 2.9672, \sigma_{T1} = 4.9563$$

$$n_{T2} = 2.9538, \sigma_{T2} = 2.8915$$

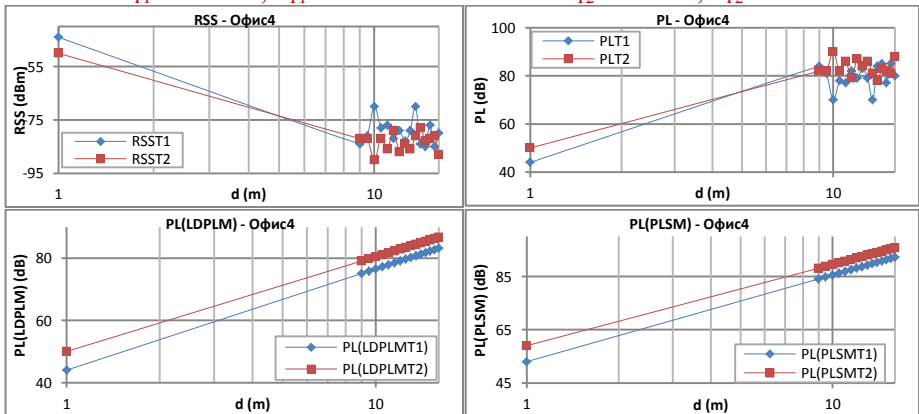


Фиг.3.23 Получени графики Офис4,  $P_t = 0$  dBm;  $f=2.480$  GHz;  $d=16$  m

### 3.4.2.1.8 Офис четири: $P_t = 0$ dBm; $f=2.405$ GHz; $d=16$ m.

$$n_{T1} = 3.2543, \sigma_{T1} = 4.6947$$

$$n_{T2} = 3.0463, \sigma_{T2} = 4.0732$$



Фиг.3.24 Получени графики Офис4,  $P_t = 0$  dBm;  $f=2.405$  GHz;  $d=16$  m

### 3.4.3 Експеримент трети – Лаборатории.

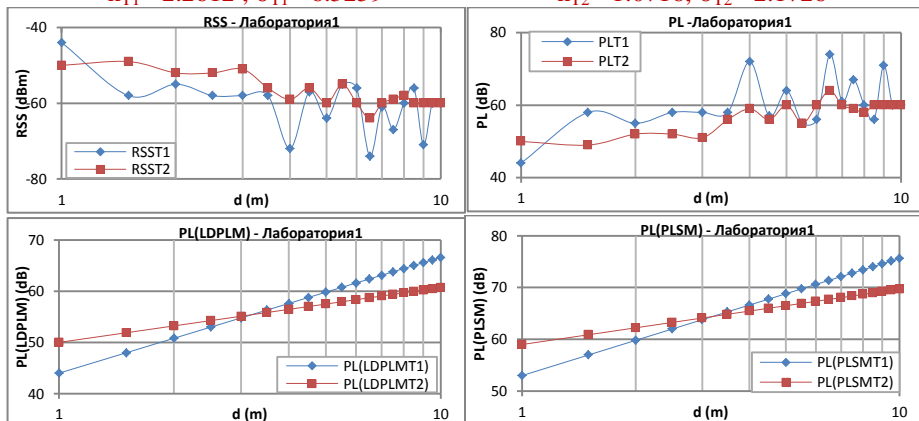
Направени бяха измервания в две лаборатории, които са разположени една над друга.

#### 3.4.3.1 Резултати от измерванията и изчисленията от експеримент трети.

##### 3.4.3.1.1 Лаборатория едно: $P_t = 0$ dBm; $f = 2.480$ GHz; $d = 10$ m.

$$n_{T1} = 2.2612, \sigma_{T1} = 6.5259$$

$$n_{T2} = 1.0716, \sigma_{T2} = 2.1726$$

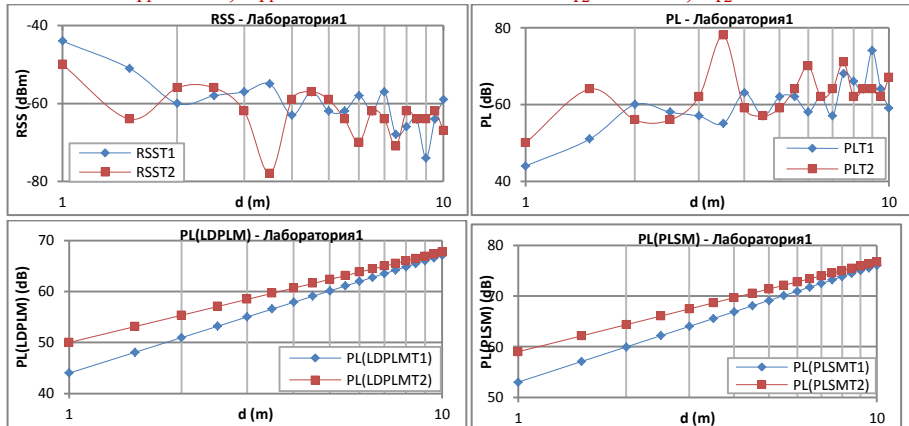


Фиг. 3.27 Получени графики от Лаборатория едно,  $P_t = 0$  dBm;  $f = 2.480$  GHz;  $d = 10$  m

##### 3.4.3.1.2 Лаборатория едно: $P_t = 0$ dBm; $f = 2.405$ GHz; $d = 10$ m.

$$n_{T1} = 2.306, \sigma_{T1} = 4.937$$

$$n_{T2} = 1.7712, \sigma_{T2} = 5.8059$$

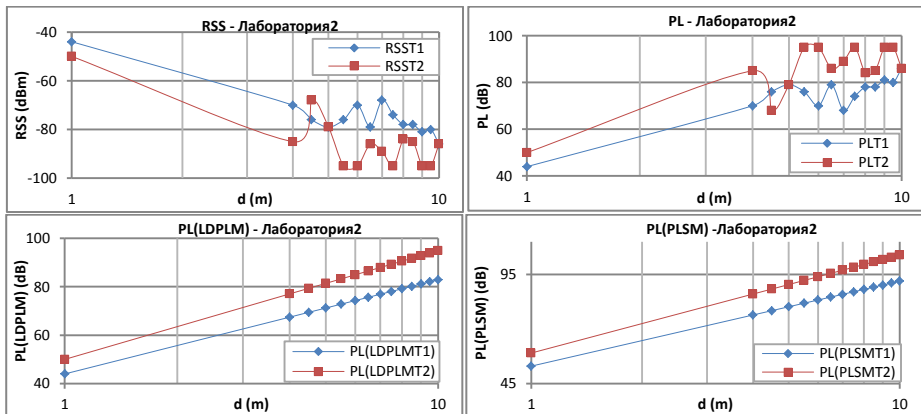


Фиг. 3.28 Получени графики от Лаборатория едно,  $P_t = 0$  dBm;  $f = 2.405$  GHz;  $d = 10$  m

##### 3.4.3.1.3 Лаборатория две: $P_t = 0$ dBm; $f = 2.480$ GHz; $d = 10$ m.

$$n_{T1} = 3.8905, \sigma_{T1} = 4.3566$$

$$n_{T2} = 4.4879, \sigma_{T2} = 6.7834$$

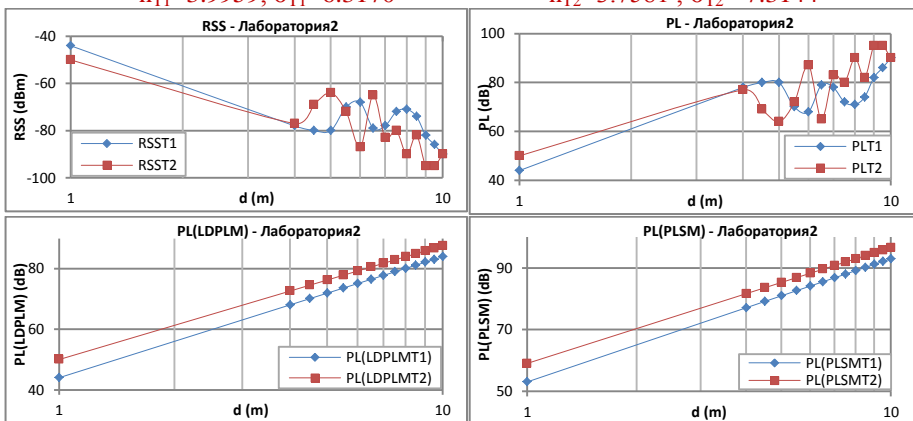


Фиг.3.29 Получени графики от Лаборатория две,  $P_t = 0$  dBm;  $f = 2.480$  GHz;  $d = 10$  m

### 3.4.3.1.4 Лаборатория две: $P_t = 0$ dBm; $f = 2.405$ GHz; $d = 10$ m.

$$n_{T1} = 3.9959, \sigma_{T1} = 6.3170$$

$$n_{T2} = 3.7581, \sigma_{T2} = 7.3144$$



Фиг.3.30 Получени графики от Лаборатория две,  $P_t = 0$  dBm;  $f = 2.405$  GHz;  $d = 10$  m

## 3.4.4 Експеримент четвърти – Коридор (земя).

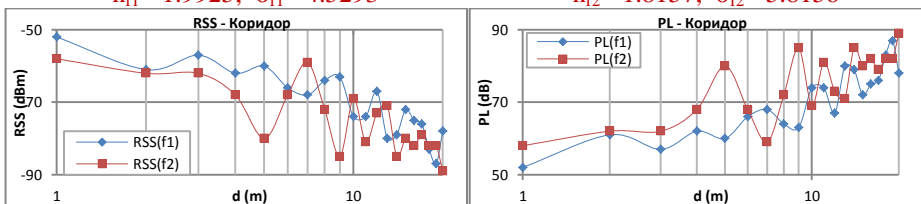
Направени бяха измервания в коридора от експеримент първи, като обаче предаващият възел T и приемащият R са позиционирани на земята първо един срещу друг, а след това успоредно един спрямо друг.

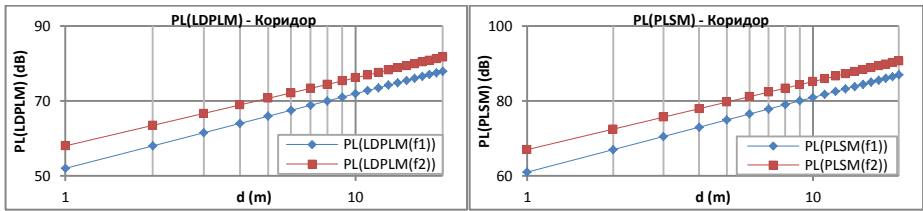
### 3.4.4.1 Резултати от измерванията и изчисленията от експеримент четвърти.

#### 3.4.4.1.1 Централен коридор (T c/y R): $P_t = 0$ dBm; $f_1 = 2.480$ GHz; $f_2 = 2.405$ GHz; $d = 20$ m.

$$n_{f1} = 1.9925, \sigma_{f1} = 4.5293$$

$$n_{f2} = 1.8157, \sigma_{f2} = 5.8156$$



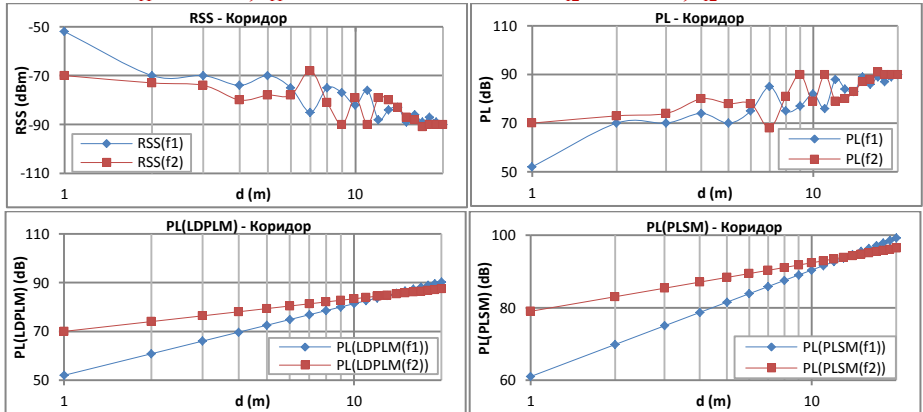


Фиг.3.33 Получени графики коридор (Т с/у R),  $P_t = 0$  dBm;  $f_1=2.480$  GHz;  $f_2=2.405$  GHz;  $d=20$  m

### 3.4.4.1.2 Централен коридор(Т с/у R): $P_t = -10$ dBm; $f_1=2.480$ GHz; $f_2=2.405$ GHz; $d=20$ m.

$$n_{f1} = 2.9370, \sigma_{f1} = 3.8451$$

$$n_{f2} = 1.3377, \sigma_{f2} = 4.5546$$

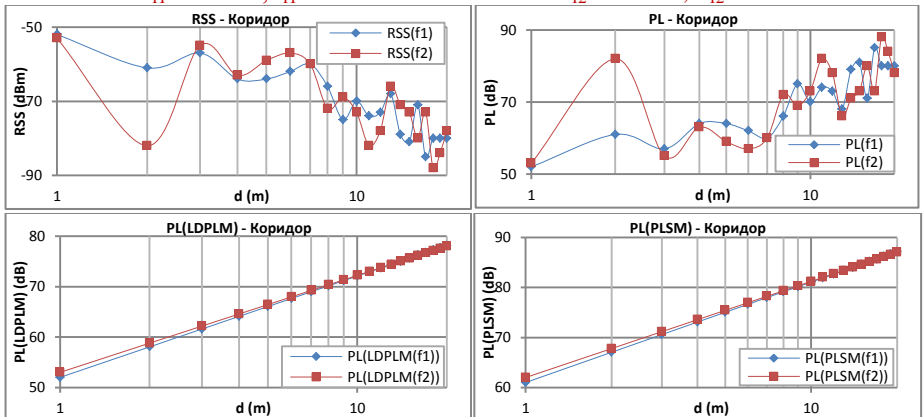


Фиг.3.34 Получени графики за коридор (Т с/у R),  $P_t = -10$  dBm;  $f_1=2.480$  GHz;  $f_2=2.405$  GHz;  $d=20$  m

### 3.4.1.2.3 Централен коридор (Т || R) : $P_t = 0$ dBm; $f_1=2.480$ GHz; $f_2=2.405$ GHz; $d=20$ m.

$$n_{f1} = 2.0092, \sigma_{f1} = 4.3674$$

$$n_{f2} = 1.9222, \sigma_{f2} = 7.8822$$

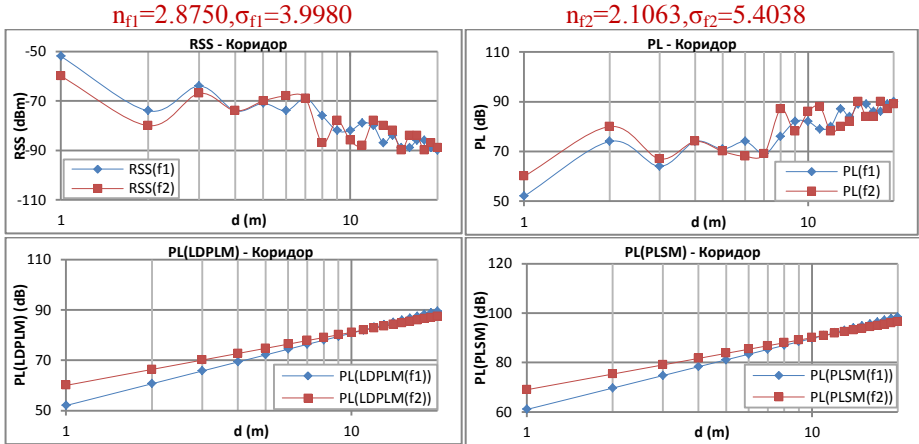


Фиг.3.35 Получени графики за централен коридор (Т || R),  $P_t = 0$  dBm;  $f_1=2.480$  GHz;  $f_2=2.405$  GHz;  $d=20$  m

### 3.4.1.2.4 Централен коридор (Т || R) : $P_t = -10$ dBm; $f_1=2.480$ GHz; $f_2=2.405$ GHz; $d=20$ m.

При изчисленията е използвана същата последователност, както във предходните експерименти. Освен това обаче, единствено тук са добавени и три допълнителни изчисления описани в т.3.2:

- 1) Пресмятане на приетата мощност на определено разстояние.
- 2) Пресмятане на вероятността приемания сигнал  $P_r$ , да бъде по-голям от зададено ниво (праг)  $\gamma$  [dBm].
- 3) Процентно прогнозиране за област със зададен радиус  $d$ , дали приеманата мощност вътре в областта ще е по-голяма от зададен праг  $\gamma$  [dBm].



Фиг.3.36 Получени графики Централен коридор ( $T \parallel R$ ),  $P_t = -10$  dBm;  $f_1 = 2.480$  GHz;  $f_2 = 2.405$  GHz;  $d = 20$  m

След като сме намерили константата на загубите ( $n$ ) и стандартното отклонение ( $\sigma$ ) можем да изчислим:

а) При честота на предаване  $f_1 = 2.480$  GHz ( $d = 15$  m).

а1) Изчисляване на приетата мощност  $P_r(d)$  на конкретно зададено от нас разстояние  $d = 15$  m.

От (3.9) следва:  $P_r(d=15\text{m}) = -52 \text{ dBm} - 10(2.875)\lg(15/1) + 9 \text{ dB} = -76,81 \text{ dBm}$

а2) Пресмятане на вероятността приемания сигнал  $Pr[P_r(d) > \gamma]$ , да бъде по-голям от зададено ниво (праг)  $\gamma$  [dBm].

Задаваме праг  $\gamma = -77 \text{ dBm}$ .

Тогава от (3.10) следва:  $Pr[P_r(d) > \gamma] = Q\left(\frac{\gamma - P_r(d)}{\sigma_{f1}}\right) = Q(-0.048) = 0.4832 = 48.3\%$

където функцията  $Q(z)$  се определя чрез известния вече израз, включващ функцията на грешката.

а3) Процентно прогнозиране за област със зададен радиус  $d$ , дали приеманата мощност вътре в областта ще е по-голяма от зададен праг  $\gamma$  [dBm].

Вероятността, полученото ниво на сигнала да бъде по-голямо от  $\gamma$  [dBm] е представена чрез уравнение (3.12). За параметъра  $b$  се получава от (3.13)

$$b = (10n_{f1} \cdot \lg(e)) / (\sigma_{f1} \sqrt{2}) = 2.21$$

След заместване се получава  $U(-77 \text{ dBm}) = 58.11\%$ .

б) При честота на предаване  $f_2=2.405 \text{ GHz}$  ( $d=15\text{m}$ ).

б1) Изчисляване на приетата мощност  $P_r(d)$  на конкретно зададено от нас разстояние  $d=15 \text{ m}$ .

От (3.9) следва:  $P_r(d=15\text{m}) = -60 \text{ dBm} - 10(2.1063)\lg(15/1) + 9 \text{ dB} = -75.77 \text{ dBm}$

б2) Пресмятане на вероятността приемания сигнал  $Pr[P_r(d) > \gamma]$ , да бъде по-голям от зададено ниво (праг)  $\gamma$  [dBm].

Задаваме праг  $\gamma = -77 \text{ dBm}$ .

Тогава от (3.10) следва:  $Pr[P_r(d) > \gamma] = Q\left(\frac{\gamma - P_r(d)}{\sigma f_2}\right) = Q(-0.228) = 0.4099 = 40.99 \%$  където функцията  $Q(z)$  изчисляваме чрез (3.11).

б3) Процентно прогнозиране за област със зададен радиус  $d$ , дали приеманата мощност вътре в областта ще е по-голяма от зададен праг  $\gamma$  [dBm].

Вероятността, полученото ниво на сигнала да бъде по-голямо от  $\gamma$  [dBm] е представена чрез уравнение (3.12). За параметъра „b“ се получава

$$b = (10n_{f2} \cdot \lg(e)) / (\sigma f_2 \sqrt{2}) = 1.198$$

а за функцията “U( $\gamma$ )” се получава от (3.11)

$$U(\gamma) = 0.5 \{ 1 + \exp(1/b^2) [1 - \text{erf}(1/b)] \}, \text{ което дава } U(-77 \text{ dBm}) = 35.67 \%.$$

### 3.5. Модел за постъпково (multi-hop) предаване на информацията.

Това е модел, при който информацията от предаващият възел (Т) до приемащият (R) не пристига директно, а чрез постъпково *последователно предаване* (multi-hop).

#### 3.5.1 Модел на загубите.

Моделът на загубите, който се използва, е описан с уравнението:

$$PL(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \propto \alpha \quad (3.16)$$

#### 3.5.2 Резултати от измерванията и изчисленията.

Ще използваме готови резултати от експеримент четвърти т.4.1.2.3, където възел Т е позициониран успоредно на възел R на максимално разстояние  $d=20 \text{ m}$ . Мощността на предаване е  $P_t=0 \text{ dBm}$ , а честотата  $f=2.480 \text{ GHz}$ . Константата на загубите е  $n=2.0092$ .

##### 3.5.2.1 Случай първи: едно-стъпково предаване.

Използвайки (3.16) след заместване за  $d=20 \text{ m}$  получаваме:

$$PL(20\text{m}) \propto \left(\frac{20}{1}\right)^{2.0092} \propto 411.18$$

Тогава при един-хоп на разстояние  $20 \text{ m}$  имаме:  $PL(\text{един-хоп}) \propto 1 \times PL(d=20\text{m}) \propto 411.18$ .

##### 3.5.2.2 Случай втори: пет-стъпково предаване.

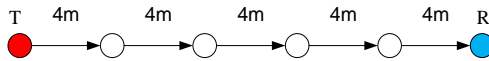
Когато имаме пет-хопа, но при разстояние между тях  $d=4 \text{ m}$ , използвайки отново (3.16), загубите за един хоп се представят по следния начин:

$$PL(4\text{m}) \propto \left(\frac{4}{1}\right)^{2.0092} \propto 16.2$$

Тогава при пет-хопа с разстояние между тях  $d=4 \text{ m}$  (фиг.3.40), за загубите за цялата дистанция от  $20 \text{ m}$  между възел Т и R имаме:  $PL(\text{пет-хопа}) \propto 5 \times$



$PL(d=4m) \propto 5 \times 16.2 \propto 81$ . Когато направим отношението  $PL(\text{един-хоп}) / PL(\text{пет-хопа}) = 411.18 / 81 = 5.1$ , се вижда, че загубите при пет-стъпковото предаване са около *5 пъти по-малко* в сравнение с едно-стъпковото предаване.



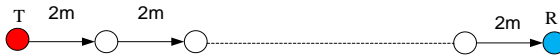
Фиг.3.40 Многостъпково предаване чрез пет хопа

### 3.5.2.3 Случай трети: десет-стъпково предаване.

Използвайки отново (3.16), загубите за един хоп при  $d=2$  m, се представят с формулата :

$$PL(2m) \propto \left(\frac{2}{1}\right)^{2.0092} \propto 4.026$$

Тогава при десет-хопа с разстояние между тях  $d=2$  m (фиг.3.42), за загубите за цялата дистанция от 20 m между възел T и R имаме :  $PL(\text{десет-хопа}) \propto 10 \times PL(d=2m) \propto 10 \times 4.026 \propto 40.26$ .



Фиг.3.42 Многостъпково предаване чрез десет хопа

Когато направим отношението  $PL(\text{един-хоп}) / PL(\text{десет-хопа}) = 411.18 / 40.26 = 10.2$ , се вижда, че загубите при десет-стъпковото предаване са около *10 пъти по-малко* в сравнение с едно-стъпковото предаване.

### 3.5.2.4 Случай четвърти: двадесет-стъпково предаване.

Когато имаме двадесет-хопа, но при разстояние между тях  $d=1$  m, използвайки (3.16), загубите за един хоп се представят по следния начин :

$$PL(1m) \propto \left(\frac{1}{1}\right)^{2.0092} \propto 1$$

Тогава при двадесет-хопа с разстояние между тях  $d=1$  m (фиг.3.44), за загубите за цялата дистанция от 20 m между възел T и R имаме :  $PL(\text{двадесет-хопа}) = 20 \times PL(d=1m) \propto 20 \times 1 \propto 20$ .



Фиг.3.44 Многостъпково предаване чрез двадесет хопа

Когато направим отношението  $PL(\text{един-хоп}) / PL(\text{двадесет-хопа}) = 411.18 / 20 = 20.6$ , се вижда, че загубите при двадесет-стъпковото предаване са около *21 пъти по-малко* в сравнение с едно-стъпковото предаване.

## ГЛАВА ЧЕТВЪРТА. Изследване предаването на сигнали между сензорни възли разположени в отворени пространства.

### 4.1 Увод.

Процедирано е, по същият начин, както в Глава 3 с единствената разлика, че тук възлите са разположени в отворени пространства.

## 4.2 Модел на разпространение и формули за статистическа обработка на данните от получените резултати.

Използван е модел “Log-normal Shadowing Model” (модел на логаритмично-нормално засенчване) и формули за статистическа обработка на данните от получените резултати, описани подробно в Глава 3.

### 4.3 Фактори, които оказват влияние върху RSS и PL.

#### 4.3.1 Фактори свързани с хардуера на сензорните възли.

- 1) Радиочестота
- 2) Антена
- 3) Мощност на предаване

#### 4.3.2 Фактори свързани с разположението на възлите и околната среда.

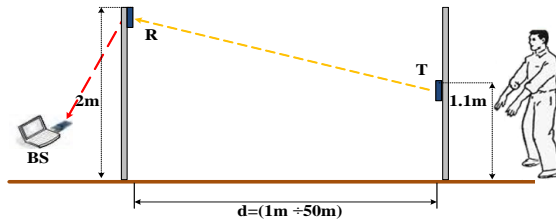
- 1) Фактори свързани с разположението на възлите
- 2) Фактори свързани с околната среда

### 4.4 Експерименти и резултати от симулациите.

Експериментите са направени в Университета в град Патра – Гърция.

4.4.1 Експеримент първи – Фактори свързани с околната среда при комуникация на сензорни възли в маслинова градина с пряка видимост (LoS) и без пряка видимост (NLoS) между тях.

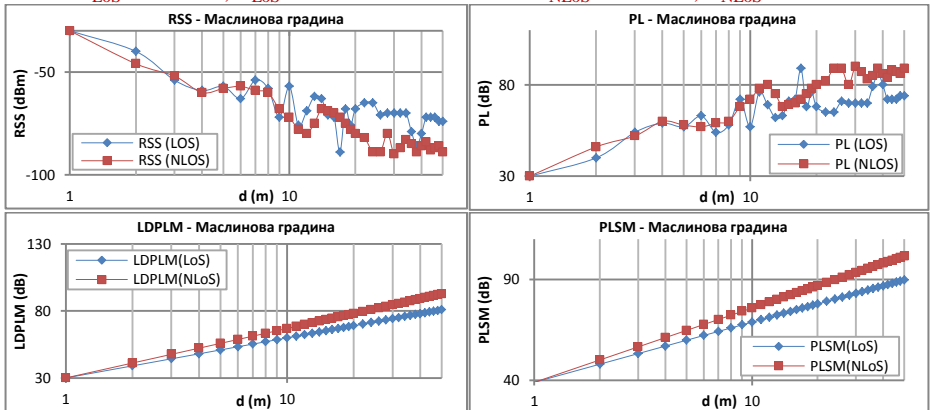
Схема на опитната постановка на експеримента е показана на фиг. 4.2.



Фиг.4.2 Схема на опитната постановка на експеримент първи

$$n_{LoS} = 2.9868 ; \sigma_{LoS} = 6.3849$$

$$n_{NLoS} = 3.6861 ; \sigma_{NLoS} = 4.6209$$



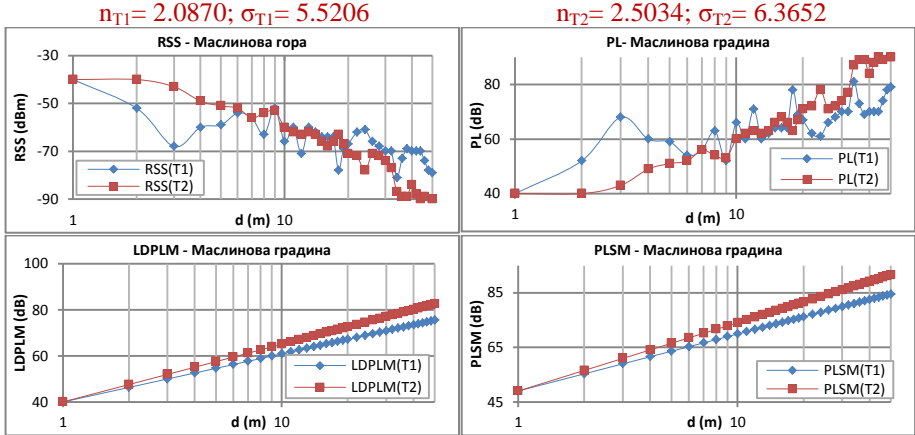
Фиг. 4.5 Получени графики от експеримент първи при  $P_t = 0$  dBm;  $f = 2.480$  GHz;  $d = 50$  m

**4.4.2** Експеримент втори – Фактори, свързани с *разположението на възлите на различна височина в маслинова градина с пряка видимост между тях (LoS)*.

**4.4.2.1** Схема на опитната постановка на експеримент втори.

Схемата на опитната постановка и принципът на работа са същите, както при експеримент първи, с единствената разлика, че предаващите възли тук са два поставени на височина съответно 2 m и 0,08 m, както е показано на фигура 3.7.

**4.4.2.2** Резултати от измерванията и изчисленията от експеримент втори.



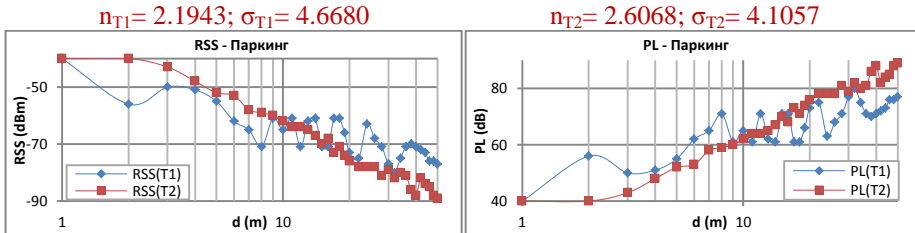
Фиг. 4.7 Получени графики от експеримент втори при  $P_t = 0$  dBm;  $f = 2.480$  GHz;  $d = 50$  m

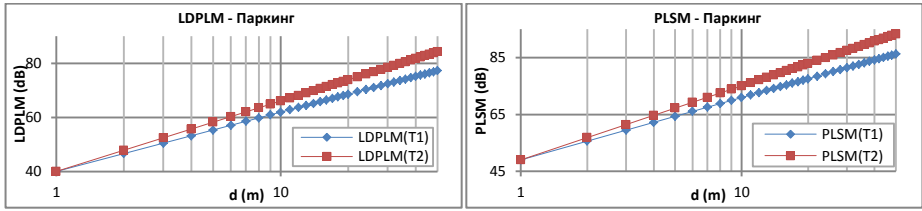
**4.4.3** Експеримент трети – Фактори свързани с *разположението на възлите на различна височина в открит паркинг с пряка видимост между тях (LoS)*.

**4.4.3.1** Схема на опитната постановка на експеримент трети.

Схемата на опитната постановка и принципът на работа са същите, както при експеримент втори. Разликата е само в мястото на провеждане на експеримента.

**4.4.3.2** Резултати от измерванията и изчисленията от експеримент трети.

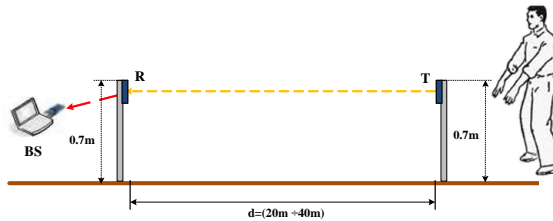




Фиг. 4.9 Получени графики от експеримент трети при  $P_t = 0$  dBm;  $f = 2.480$  GHz;  $d = 50$  m

#### 4.4.4 Експеримент четвърти – Фактори свързани с радиочестотата на предаване в открит паркинг с пряка видимост между възлите (LoS).

##### 4.4.4.1 Схема на опитната постановка на експеримент четвърти.

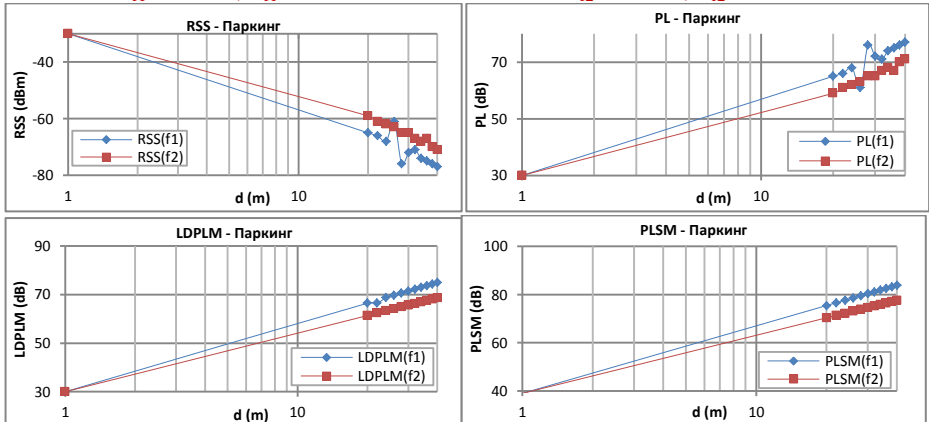


4.10 Схема на опитната постановка на експеримент четвърти

##### 4.4.4.2 Резултати от измерванията и изчисленията от експеримент четвърти.

$$n_{f1} = 2.8010; \sigma_{f1} = 3.1885$$

$$n_{f2} = 2.4098; \sigma_{f2} = 1.3527$$



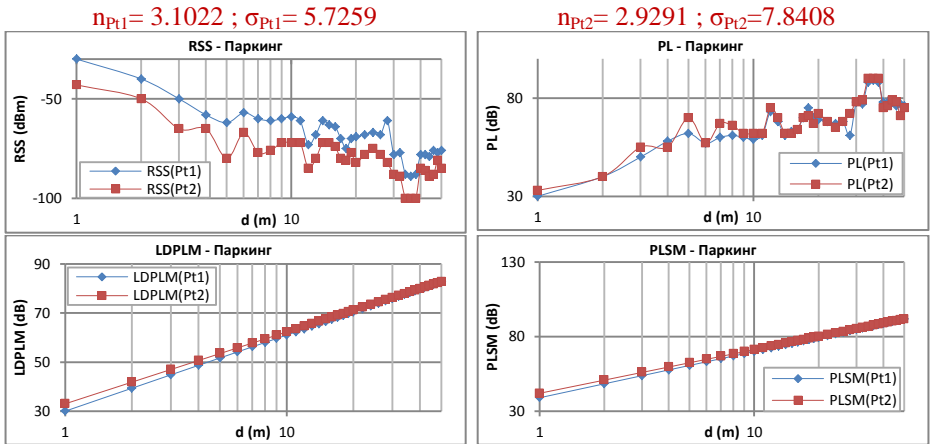
Фиг. 4.11 Получени графики от експеримент четвърти при  $P_t = 0$  dBm;  $f_1 = 2.410$  GHz;  $f_2 = 2.480$  GHz;  $d = 20-40$  m

#### 4.4.5 Експеримент пети – Фактори свързани с мощността на предаване в открит паркинг с пряка видимост между възлите (LoS).

##### 4.4.5.1 Схема на опитната постановка на експеримент пети.

Схемата на опитната постановка е същата, както в експеримент четвърти (фиг. 4.10).

##### 4.4.5.2 Резултати от измерванията и изчисленията от експеримент пети.



Фиг.4.12 Получени графики от експеримент пети при  $P_{t1}=0$  dBm и  $P_{t2}=-10$  dBm,  $f=2.480$  GHz;  $d=50$  m

**4.4.6 Експеримент шести – Фактори свързани с разположението на възлите при хоризонтално и вертикално позициониране на открит паркинг с пряка видимост между тях (LoS).**

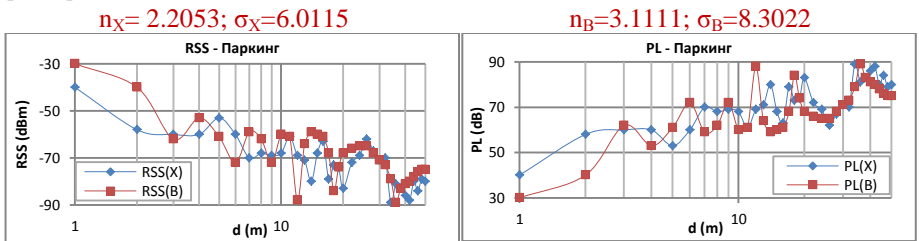
**4.4.6.1 Схема на опитната постановка на експеримент шести.**

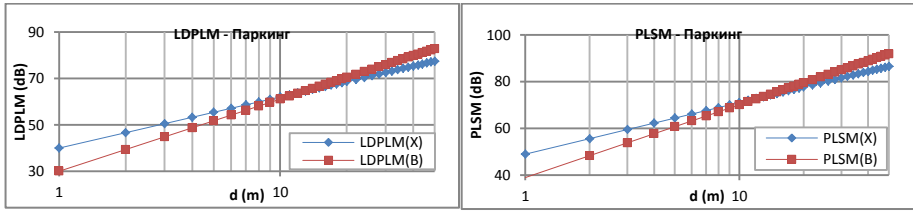
Схемата на опитната постановка е същата от фиг.4.2, с тази разлика, че в едното от измерванията възлите са хоризонтално, а в другото вертикално ориентирани един спрямо друг.

**4.4.6.2 Резултати от измерванията и изчисленията от експеримент шести.**

При изчисленията е използвана същата последователност както в експеримент първи. Освен това обаче, единствено тук са добавени и трите допълнителни изчисления описани в т.3.2 :

- 1) Пресмятане на приетата мощност на определено разстояние.
- 2) Пресмятане на вероятността приемания сигнал  $P_r$ , да бъде по-голям от зададено ниво (праг)  $\gamma$  [dBm].
- 3) Процентно прогнозиране за област със зададен радиус  $d$ , дали приеманата мощност вътре в областта ще е по-голяма от зададен праг  $\gamma$  [dBm].





Фиг.4.14 Получени графики от шести експеримент,  $P_t = 0$  dBm;  $f = 2.480$  GHz;  $d = 50$  m

След като сме намерили константата на загубите ( $n$ ) и стандартното отклонение ( $\sigma$ ) можем да изчислим:

а) При хоризонтално позициониране на възлите ( $d=32$  m)

а1) Изчисляване на приетата мощност  $P_r(d)$  на конкретно зададено от нас разстояние  $d=32$  m

От (3.9) следва:  $P_r(d=32\text{m}) = -40$  dBm -  $10(2.2053)\lg(32/1) + 9$  dB = -64.2 dBm.

а2) Пресмятане на вероятността приемания сигнал  $Pr[P_r(d) > \gamma]$ , да бъде по-голям от зададено ниво (праг)  $\gamma$  [dBm]

Задаваме праг  $\gamma = -77$  dBm.

Тогава от (3.10) следва:  $Pr[P_r(d) > \gamma] = Q\left(\frac{\gamma - P_r(d)}{\sigma_x}\right) = Q(-2.13) = 0.0166 = 1.66$  %  
където функцията  $Q(z)$  изчисляваме чрез (3.11).

а3) Процентно прогнозиране за област със зададен радиус  $d$ , дали приеманата мощност вътре в областта ще е по-голяма от зададен праг  $\gamma$  [dBm].

Вероятността, полученото ниво на сигнала да бъде по-голямо от  $\gamma$  [dBm] е представена чрез уравнение (3.12):  $U(\gamma) = 0.5\{1 + \exp(1/b^2)[1 - \text{erf}(1/b)]\}$  и след заместване се получава  $U(-77$  dBm) = 33.5 %, където  $\text{erf}(x)$  е дефинирана вече функция, а  $b$  е параметър, представен с уравнението (3.13):  $b = (10n_x \lg(e)) / (\sigma_x \sqrt{2}) = 1.128$ .

б) При вертикално позициониране на възлите ( $d=32$  m)

б1) Изчисляване на приетата мощност  $P_r(d)$  на конкретно зададено от нас разстояние  $d=32$  m

От (3.9) следва:  $P_r(d=32\text{m}) = -30$  dBm -  $10(3.1111)\lg(32/1) + 9$  dB = -67.82 dBm

б2) Пресмятане на вероятността приемания сигнал  $Pr[P_r(d) > \gamma]$ , да бъде по-голям от зададено ниво (праг)  $\gamma$  [dBm]

Задаваме праг  $\gamma = -77$  dBm.

Тогава от (3.10) следва:  $Pr[P_r(d) > \gamma] = Q\left(\frac{\gamma - P_r(d)}{\sigma_B}\right) = Q(-1.106) = 0.11 = 11$  %  
където функцията  $Q(z)$  изчисляваме чрез (3.11).

б3) Процентно прогнозиране за област със зададен радиус  $d$ , дали приеманата мощност вътре в областта ще е по-голяма от зададен праг  $\gamma$  [dBm]

Вероятността, полученото ниво на сигнала да бъде по-голямо от  $\gamma$  [dBm] е представена чрез уравнение (3.12):  $U(\gamma) = 0.5\{1 + \exp(1/b^2)[1 - \text{erf}(1/b)]\}$  и след заместване се получава  $U(-77$  dBm) = 39.33 %, където за параметъра  $b$  се получава от уравнението (3.13):

$$b = (10n_B \lg(e)) / (\sigma_B \sqrt{2}) = 1.15$$

#### 4.5. Модел за постъпково предаване (multi-hop) на информацията.

Това е модел, при който информацията от предаващия възел (Т) до приемащия (R) достига чрез постъпково последователно предаване (multi-hop).

#### 4.5.1 Модел на загубите.

Моделът на загубите, който се използва, е описан с уравнението:

$$PL(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \propto \alpha \quad (4.16)$$

#### 4.5.2 Резултати от измерванията и изчисленията.

Ще използваме готови резултати от измерванията на експеримент шести при хоризонтално и вертикално позициониране на възлите.

##### 4.5.2.1 При хоризонтално позициониране на възлите.

Константата на загубите в този случай е:  $n=2.2052$ .

##### 4.5.2.1.1 Случай първи: едно-стъпково предаване.

Използвайки (4.16) след заместване за  $d=50$  m получаваме:

$$PL(50m) \propto \left(\frac{50}{1}\right)^{2.2052} \propto 5579.16$$

Тогава при един-хоп на разстояние 50 m имаме :  $PL(\text{един-хоп}) \propto 1 \times PL(d=50m) \propto 5579.16$ .

##### 4.5.2.1.2 Случай втори: пет-стъпково предаване.

Когато имаме пет-хопа, при разстояние между тях  $d=10$  m, използвайки отново (4.16), загубите за един хоп се представят по следния начин :

$$PL(10m) \propto \left(\frac{10}{1}\right)^{2.2052} \propto 160.4$$

Тогава при пет-хопа с разстояние между тях  $d=10$  m (фиг.4.18), за загубите за цялата дистанция от 50 m между възел Т и R имаме :  $PL(\text{пет-хопа}) \propto 5 \times PL(d=10m) \propto 5 \times 160.4 \propto 801.99$ .



Фиг.4.18 . Многостъпково предаване чрез пет хопа

Когато направим отношението  $PL(\text{един-хоп}) / PL(\text{пет-хопа}) = 5579.16 / 801.99 = 6.96$ , се вижда, че загубите при пет-стъпковото предаване са около 7 пъти по-малко в сравнение с едно-стъпковото предаване.

##### 4.5.2.1.3 Случай трети: десет-стъпково предаване.

Използвайки отново (4.16), загубите за един хоп при  $d=5$  m, се представят с формулата :

$$PL(5m) \propto \left(\frac{5}{1}\right)^{2.2052} \propto 34.78$$

Тогава при десет-хопа с разстояние между тях  $d=5$  m (фиг.4.20), за загубите за цялата дистанция от 50 m между възел Т и R имаме :  $PL(\text{десет-хопа}) \propto 10 \times PL(d=5m) \propto 10 \times 34.78 \propto 347.8$ .



Фиг.4.20 . Многостъпково предаване чрез десет хопа

Когато направим отношението  $PL(\text{един-хоп}) / PL(\text{десет-хопа}) = 5579.16 / 347.8 = 16$ , се вижда, че загубите при десет-стъпковото предаване са *16 пъти по-малко* в сравнение с едно-стъпковото предаване.

#### 4.5.2.1.4 Случай четвърти: двадесет и пет-стъпково предаване.

Когато имаме двадесет и пет-хопа, но при разстояние между тях  $d=2$  m, използвайки (4.16), загубите за един хоп се представят по следния начин

$$PL(2m) \propto \left(\frac{2}{1}\right)^{2.2052} \propto 4.6$$

Тогава при двадесет и пет-хопа с разстояние между тях  $d=2$  m (фиг.4.22), за загубите за цялата дистанция от 50 m между възел Т и R имаме :  $PL(\text{двадесет и пет-хопа}) = 25 \times PL(d=2m) \propto 25 \times 4.6 \propto 115.3$ .



Фиг.4.22 . Многостъпково предаване чрез двадесет и пет хопа

Когато направим отношението  $PL(\text{един-хоп}) / PL(\text{двадесет и пет-хопа}) = 5579.16 / 115.3 = 48.4$  се вижда, че загубите при двадесет и пет-стъпковото предаване са *около 48 пъти по-малко* в сравнение с едно-стъпковото предаване.

#### 4.5.2.1.5 Случай пети: петдесет-стъпково предаване.

Когато имаме петдесет-хопа, но при разстояние между тях  $d=1$  m, използвайки (4.16), загубите за един хоп се представят по следния начин :

$$PL(1m) \propto \left(\frac{1}{1}\right)^{2.2052} \propto 1$$

Тогава при петдесет-хопа с разстояние между тях  $d=1$  m (фиг.4.24), за загубите за цялата дистанция от 50 m между възел Т и R имаме :  $PL(\text{петдесет-хопа}) = 50 \times PL(d=1m) \propto 50 \times 1 \propto 50$ .



Фиг.4.24 . Многостъпково предаване чрез петдесет хопа

Когато направим отношението  $PL(\text{един-хоп}) / PL(\text{петдесет-хопа}) = 5579.16 / 50 = 111.6$ , се вижда, че загубите при петдесет-стъпковото предаване са *около 112 пъти по-малко* в сравнение с едно-стъпковото предаване.

#### 4.5.2.2 При вертикално позициониране на възлите.

Константата на загубите в този случай е:  $n=3.1111$ .

##### 4.5.2.2.1 Случай първи: едно-стъпково предаване.

Използвайки (4.16) след заместване за  $d=50$  m получаваме:

$$PL(50m) \propto \left(\frac{50}{1}\right)^{3.1111} \propto 193048.12$$

Тогава при един-хоп на разстояние 50 m имаме :  $PL(\text{един-хоп}) = 1 \times PL(d=50m) \propto 193048.12$ .

##### 4.5.2.2.2 Случай втори: пет-стъпково предаване.

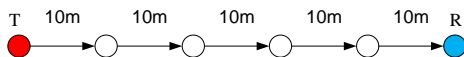
Когато имаме пет-хопа, но при разстояние между тях  $d=10$  m, използвайки отново (4.16), загубите за един хоп (фиг.4.26) се представят по



следния начин :

$$PL(10m) \propto \left(\frac{10}{1}\right)^{3.1111} \propto 1291.5$$

Тогава при пет-хопа с разстояние между тях  $d=10$  m (фиг.4.27), за загубите за цялата дистанция от 50 m между възел Т и R имаме :  $PL(\text{пет-хопа}) = 5 \times PL(d=10m) = 5 \times 1291.5 \propto 6457.5$ .



Фиг.4.27. Многостъпково предаване чрез пет хопа

Когато направим отношението  $PL(\text{един-хоп}) / PL(\text{пет-хопа}) = 193048.12 / 6457.5 = 29.9$  , се вижда, че загубите при пет-стъпковото предаване са около 30 пъти по-малко в сравнение с едно-стъпковото предаване.

#### 4.5.2.2.3 Случай трети: десет-стъпково предаване.

Когато имаме десет-хопа, но при разстояние между тях  $d=5$  m, използвайки отново (4.16), загубите за един хоп се представят по следния начин :

$$PL(5m) \propto \left(\frac{5}{1}\right)^{3.1111} \propto 149.5$$

Тогава при десет-хопа с разстояние между тях  $d=5$  m (фиг.4.29), за загубите за цялата дистанция от 50 m между възел Т и R имаме :  $PL(\text{десет-хопа}) \propto 10 \times PL(d=5m) \propto 10 \times 149.5 \propto 1495$ .



Фиг.4.29.. Многостъпково предаване чрез десет хопа

Когато направим отношението  $PL(\text{един-хоп}) / PL(\text{десет-хопа}) = 193048.12 / 1495 = 129.13$  , се вижда, че загубите при десет-стъпковото предаване са около 129 пъти по-малко в сравнение с едно-стъпковото предаване.

#### 4.5.2.2.4 Случай четвърти: двадесет и пет-стъпково предаване.

Когато имаме двадесетипет-хопа, но при разстояние между тях  $d=2$  m, използвайки (4.16), загубите за един хоп се представят по следния начин :

$$PL(2m) \propto \left(\frac{2}{1}\right)^{3.1111} \propto 8.64$$

Тогава при двадесет и пет-хопа с разстояние между тях  $d=2$  m (фиг.4.31), за загубите за цялата дистанция от 50 m между възел Т и R имаме :  $PL(\text{двадесет и пет-хопа}) = 25 \times PL(d=2m) \propto 25 \times 8.64 \propto 216$ .



Фиг.4.31. Многостъпково предаване чрез двадесет и пет хопа

Когато направим отношението  $PL(\text{един-хоп}) / PL(\text{двадесет и пет-хопа}) = 193048.12 / 216 = 893.7$ , се вижда, че загубите при двадесет и пет-стъпковото предаване са около 894 пъти по-малко в сравнение с едно-стъпковото предаване.

#### 4.5.2.2.5 Случай пети: петдесет-стъпково предаване.

Когато имаме петдесет-хопа, но при разстояние между тях  $d=1$  m,

използвайки (4.16), загубите за един хоп се представят по следния начин :

$$PL(1m) \propto \left(\frac{1}{1}\right)^{3.1111} \propto 1$$

Тогава при петдесет-хопа с разстояние между тях  $d=1\text{ m}$  (фиг.4.33), за загубите за цялата дистанция от 50 m между възел Т и R имаме :  $PL(\text{петдесет-хопа}) = 50 \times PL(d=1m) \propto 50 \times 1 \propto 50$ .

Когато направим отношението  $PL(\text{един-хоп}) / PL(\text{петдесет-хопа}) = 193048.12 / 50 = 3860.96$ , се вижда, че загубите при петдесет-стъпковото предаване са около 3861 *пъти по-малко* в сравнение с едно-стъпковото предаване.



Фиг.4.33. Многостъпково предаване чрез петдесет хопа

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В Глава 1 беше направен теоретичен анализ и теоретично изследване на различни видове безжични сензорни мрежи. Систематизиране на влияещите фактори и анализиране на основните предимства и недостатъци при приложението им в различни области. Въз основа на проведенния теоретичен анализ на основните характеристики на безжичните сензорни мрежи (БСМ) се установи, че те подлежат на оптимизиране в три направления: а) *връзка с околната среда* - включва засичане факторите на средата и отчитане на техните стойности, както и откриването на съседни възли и определяне на координатите им; б) *изчисления* - включва анализа, обработката и обобщаването на получената информация; в) *комуникация* – включва приемане и предаване на получените данни.

Тъй като беше установено, че за предаването на данните се изразходва между 100 и 1000 пъти повече енергия отколкото за обработката им, беше взето решение в настоящата дисертация фокусът да бъде насочен към *оптимизация при комуникацията между сензорните възли*.

2. Познаването на радиоразпространението на вълните и тяхното адекватно моделиране е от съществено значение за разгръщане на безжичните сензорни мрежи по начин, който гарантира енергийната ефективност и надеждната комуникация между възлите в мрежата. Ето защо в Глава 2 беше направен анализ на различни модели за външно и вътрешно разпространение на радиовълните. Подробно бяха разгледани факторите, които влияят върху функционирането на безжичните комуникационни системи. След направения задълбочен анализ на различни модели за разпространение беше избран моделът „*Path-Loss Shadowing Model*“ (PLSM), т.е. „*модел на изчисление на загубите с отчитане на засенчването*“. Той беше избран, защото при него освен математическото изразяване на нелинейното затихване на сигнала във функция от разстоянието, се отчитат още и случайното затихване от засенчването в средата, а така също и влиянието на конкретни параметри, като мощност и честота на предаване. Това го прави достатъчно реалистичен и достоверен, за да бъдат изпълнени поставените в дисертацията цели.

3. В Глава 3 бяха разгледани различни случаи за предаване на данни между БСМ, разположени в *затворени пространства*. В направените експерименти се измерва Силата на Приетия Сигнал (RSS). Посредством избрания теоретичен модел, а също и с помощта на създадените софтуерни програми за симулации са намерени: 1) Загубите при предаване на сигналите (PL); 2) Константата на загубите ( $n$ ); 3) Стандартното отклонение ( $\sigma$ ); 4) Приетата мощност във функция от разстоянието –  $P_r(d)$ ; 5) Вероятността приемания сигнал да бъде по-голям от зададено ниво (праг  $\gamma$ ); 6) Процентно прогнозиране на това, дали приеманата мощност вътре в областта със зададен радиус ще е по-голяма от зададения праг.

4. Както е известно силата на приетия сигнал RSS и загубите при разпространението на сигнала PL са *случайни величини* и се влияят от различни фактори. Ето защо при изграждането на реалистичен модел, който включва тези величини, тези фактори е нужно да бъдат отчетени и взети под внимание. В Глава 3 те са описани както следва: 1) Фактори свързани с хардуера на сензорните възли (това са радиочестота, антена и мощност на предаване); 2) Фактори свързани с околната среда и разположението на възлите (това са мястото и начинът на позициониране на сензорните възли).

Чрез направените изчисления в тази глава се показва, че може за всеки един конкретно зададен случай в затворени пространства (в коридори, офиси, между различни етажи) да се изчислят различни параметри на една БСМ и да се определи нейната ефективност при различни среди, позиции на възлите, мощности и честоти на предаване. По този начин можем да оптимизираме мрежата.

5. В т.3.5 от Глава 3 беше представен модел за постъпково предаване на информацията при безжични сензорни мрежи. Основната цел бе да се покаже, че загубите за предаване на информацията между два крайни възела, разположени в затворени пространства, могат да бъдат значително намалени чрез използване на междинни ретранслатори. Експериментално и чрез математически симулации беше установено, че загубите са най-големи при едностъпково (пряко предаване) и намаляват с увеличаване броя на хоповете (ретранслаторите). От примера в т.3.5.2.4 се вижда, че когато имаме предаване с 20 хопа загубите намаляват повече от 20 пъти. С това значително се увеличава ефективността и живота на мрежата.

Трябва да се има в предвид, че този модел не взема в предвид загубите в ретранслаторите. Все пак той недвусмислено дава отговор на въпроса как да бъде *повишена енергийната ефективност* и животът на една безжична сензорна мрежа, разположена в закрити пространства. Все пак трябва да се очаква, че с увеличаване на възлите на мрежата се *оскъпява* БСМ.

6. В Глава 4 са разгледани различни случаи за предаване на данни между безжични сензорни възли, разположени в *отворени пространства*. В направените експерименти се измерва отново Силата на Приетия Сигнал (RSS). След това чрез изчисления са намерени същите параметри: 1) Загубите при предаване на сигналите (PL); 2) Константата на загубите ( $n$ ); 3) Стандартното отклонение ( $\sigma$ ); 4) Приетата мощност във функция от разстоянието  $P_r(d)$ ; 5) Вероятността приемания сигнал да бъде по-голям от зададено ниво (праг  $\gamma$ ); 6) Процентно прогнозиране на това, дали приеманата мощност вътре в областта със зададен радиус ще е по-голяма от зададения праг.

За по-точно и достоверно представяне на загубите PL при тези условия могат да се използват два модела: 1) „Log-distance Path Loss Model” – (LDPLM) и 2) „Path-loss Shadowing Model” – (PLSM). По-добър и реалистичен за тази цел се оказва вторият, тъй като при него са взети под внимание и загубите от засенчване. Това определя избора на този модел при обработка на експерименталните данни в глави 3 и 4.

7. Както вече бе споменато в предишната глава силата на приетия сигнал RSS и загубите при разпространението на сигнала PL са случайни величини и се влияят от различни фактори. Ето защо при изграждането на горепосочения модел, тези фактори са взети под внимание. В Глава 4 те са описани както следва: 1) Фактори свързани с хардуера на сензорните възли (това са радиочестота, антена и мощност на предаване); 2) Фактори свързани с околната среда и разположението на възлите (това са мястото и начинът на позициониране на сензорните възли).

Чрез използваните алгоритми и направените изчисления в тази глава се показва, че може за всеки един конкретно зададен случай (на паркинг и в маслинова градина) да се изчисли капацитетът на една БСМ и да се определи нейната ефективност при различни среди, позиции на възлите, мощности и честоти на предаване. По този начин можем да оптимизираме мрежата.

8. В т.4.5 от Глава 4 беше представен подобен модел за постъпково предаване на информацията при безжични сензорни мрежи. Основната цел бе да се покаже, че загубите при предаване на информацията в отворени пространства между два крайни възела могат да бъдат значително намалени чрез използване на междинни ретранслатори. Експериментално и чрез математически симулации беше установено, че загубите са най-големи при едностъпково (пряко предаване) и намаляват с увеличаване броя на хоповете (ретранслаторите). От примера в т.4.5.2.2.5 се вижда, че когато имаме предаване с 50 хопа загубите намаляват повече от 3800 пъти. Това значително увеличава ефективността и живота на мрежата. Разбира се, в същото време това води до оскъпяване на изградената БСМ.

Както беше отбелязано, въпреки, че този модел не взема в предвид загубите в ретранслаторите, все пак той недвусмислено дава отговор на това *как да бъде повишена енергийната ефективност и живота на една безжична сензорна мрежа*, разположена в отворени пространства.

#### **Возможности за приложение на изследваните комуникации при безжични сензорни възли:**

- В различни безжични комуникационни системи при локализацията и проследяването на обекти като елемент на оборудването на тези системи с оглед ефективно използване на наличния енергиен запас без да е нужно използването на GPS.
- В софтуерни симулатори като модел за проектиране на комуникацията при различна дистанция, среда, работна честота, мощност на приемо-предаване, и позициониране на възлите в мрежата.
- В безжични системи, които използват постъпково (multi-hop) предаване на данните на различна дистанция.
- В безжични сензорни мрежи, където е необходимо точно да се определи енергийният капацитет на мрежата и е нужно да се повиши нейната

ефективност още преди тя да бъде изградена.

#### **Основни насоки за бъдещи изследвания:**

1. Приложение на получените резултати като база при проектирането на безжични сензорни мрежи в затворени и отворени пространства.
2. Изследване на специфични конфигурации на сензорни възли с оглед постигане на оптимални конструктивни резултати.
3. Подобряване на постъпковия (multi-hop) модел за предаване на данни, като се вземат в предвид и загубите в ретранслаторите.
4. Подобряване на разработените в програмна среда Matlab и Excel алгоритми за оптимизиране на използвания математически апарат и изследване на допълнителни параметри и характеристики на БСМ.

#### **Благодарности**

Изказвам благодарност към своя научен ръководител доц. д-р инж. Сава В. Савов за оказаната помощ и внимание. Също така изказвам благодарности на доц. д-р инж. Тодор Ганчев от ТУ-Варна и на д-р инж. Ценка Стоянова и другите колеги от Лабораторията – APEL (Applied Electronics Laboratory) в Департамента по Електроника и Компютърна Техника към Университета в град Патра, Гърция за оказаното съдействие и помощ при провеждане на експериментите.

#### **Научно-приложни и приложни приноси**

В резултат на проведените изследвания и получените резултати в дисертационния труд, според автора могат да се формулират следните основни научно-приложни и приложни приноси:

##### **Научно-приложни приноси:**

1. Доказано е, че за увеличаване на живота и енергийната ефективност на безжичните сензорни мрежи е необходимо да се използва подходящ подход за проектиране на комуникацията между сензорните възли.
2. Предложен е адекватен модел, отразяващ основните фактори при процеса на проектиране на комуникацията в БСМ, носещ вероярностен характер.
3. Доказани са предимствата от приложението на модела “*Path-loss Shadowing Model*” (PLSM) пред останалите, поради което той е избран за изчисленията в дисертацията.
4. Предложени са техники за *постъпково* (multi-hop) предаване на данните между сензорните възли за намаляване на загубите при комуникацията. Предложени са и няколко специфични конфигурации при които значително се повишава енергийната ефективност и живота на мрежата.
5. Експериментално са потвърдени резултатите от теоретичното и виртуално изследване на безжични сензорни мрежи, както и на друг тип мрежи (като например клетъчните комуникационни мрежи), работещи със сходни модели за комуникация.

##### **Приложни приноси:**

1. Определени са основните фактори, които влияят на точността и надеждността при измерване и изчисление на конкретни величини, оказващи влияние при комуникацията между безжични сензорни възли, разположени в затворени и отворени пространства.
2. На база предложените методи за оптимизация са разработени алгоритми в програмната среда Matlab за виртуално изследване на специфични

конфигурации на безжични сензорни възли при различна работна честота, мощност на приемо-предаване, среда и начин на позициониране.

3. Установено е, че концептуалният модел за проектиране на комуникацията в БСМ е приложен като базисен инструментариум при инженерна разработка на адекватен и прецизен модел за оптимизация на безжични системи, осигуряващ желани енергийни характеристики и параметри.

### **Списък на публикациите по темата на дисертационния труд:**

- [1] **Ганев З.**, Димова Р., „Безжични сензорни мрежи“, *Годишник на ТУ- Варна*, 2011г., том 2, стр.134 – 138.
- [2] **Ганев З.**, Савов С., „Приложение на безжични сензорни мрежи“, *Юбилеен конгрес с международно участие „Наука и образованието в бъдещето“*, 50 години ТУ Варна, 4-6 октомври 2012г., Варна.
- [3] **Ganev Z.**, „Topologies of Wireless Sensor Networks“, *ICEST 2013*, Conference Proceedings, vol.1 pp.399-401, Ohrid, Macedonia.
- [4] **Ganev Z.**, „Methods of Coordinates Determination in Wireless Sensor Networks“, *ICEST 2013*, Conference Proceedings, vol.1 pp.409-411, Ohrid, Macedonia.
- [5] Savov S., **Ganev Z.**, „Indoor Propagation Path Loss Modeling for Wireless Sensor Networks“, *ICEST 2014*, Conference Proceedings, Vol.2, pp.341-342, June 25-27, Nis, Serbia.
- [6] **Ganev Z.**, „Multi-hop data transmission in wireless sensor networks“, *International Scientific Symposium – Electrical Power Engineering, Conference Proceedings*, pp.121-123, 11-13 September, 2014, Varna, Bulgaria.
- [7] **Ganev Z.**, Savov S., „Isotropic multi-hop model for Wireless Sensor Networks“, *CEMA 2014*, 16-18 October, Conference Proceedings, pp.58-60, Sofia, Bulgaria.
- [8] **Ganev Z.**, Savov S., „Log-normal shadowing model for Wireless Sensor Networks“, *CEMA 2014*, 16-18 October, Conference Proceedings, pp.61-64, Sofia, Bulgaria
- [9] **Ganev Z.**, Savov S., „Propagation of electromagnetic waves between wireless sensor nodes in one corridor“, *ELMA 2015*, Conference Proceedings, pp.270-273, 1-3 October, Varna, Bulgaria.
- [10] **Ganev Z.**, „Outdoor propagation of electromagnetic waves between wireless sensor nodes“, *ELMA 2015*, Conference Proceedings, pp.274-277, 1-3 October, Varna Bulgaria.

### **Optimized energy model of wireless sensor networks**

by Zlatan Kolev Ganev

(ABSTRACT)

Wireless Sensor Networks (WSN) quickly found their application in different areas of the surrounding life. Rational methods to increase their energy efficiency, lifetime, safety are being searched. There's no universal solution! The approach is individual and is consistent with the specific tasks and goals. For instance, if we want to build more secure network we should consider, that with this increases the energy consumed. With sensor nodes size reduction their energy resource is being reduced (because of the work with individually-autonomous power supply). Similarly, in the selection of the transmission medium (optical or radiowaves) and nodes positioning in WSN, a very important role is played by the WSN-topology and the characteristics of the environment. We should also pay attention of the fact that the communication participants, as well as the barriers that obstruct it, could be static or mobile. Therefore in radiochannels random processes occur which vary over time. Generally speaking, the theory of stochastic processes should be applied. Furthermore, the channels in radio broadcasting are frequency dependent as well (as we know the processes of reflection, diffraction and scattering are directly dependent on wavelength), which causes extra difficulties for the developers.

Despite the difficulties that occur, it could be said that the fast wireless sensor networks development will continue, especially in places where the work is in inaccessible regions and where infrastructure construction and use of people is inappropriate or impossible.