



ЮГОЗАПАДЕН УНИВЕРСИТЕТ „НЕОФИТ РИЛСКИ“
ТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
Катедра „Комуникационна и компютърна техника и технологии“
2700 Благоевград, ул. Иван Михайлов 66; www.swu.bg

маг. Давид Руменов Давидков

**Изследване и моделиране на канали
в безжични мрежи,
ориентирани около тялото
на човек**

АВТОРЕФЕРАТ

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

Област:

5. Технически науки

Професионално направление

5.3. Комуникационна и компютърна техника

Докторска програма:

Компютърни системи комплекси и мрежи

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Габриела Лъчезарова Атанасова

Рецензенти:

доц. д-р Фатима Исмаил Сапунджи
проф. д-р инж. Георги Любенов Илиев

Благоевград, 2023 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Комуникационна и компютърна техника и технологии“ към Технически факултет на Югозападен университет „Неофит Рилски“ на редовно заседание, проведено на 08.11.2023 год.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 13.12.2023 г. от 15:00 часа в зала 7407, учебен корпус 7 на Югозападен университет „Неофит Рилски“ на открито заседание на научното жури, определено със заповед №2430/17.11.2023 г. на Ректора на Югозападен университет „Неофит Рилски“ в състав:

1. доц. д-р Фатима Исмаил Сапунджи
2. доц. д-р инж. Иван Иванов Недялков
3. проф. д-р инж. Георги Любенов Илиев
4. доц. д-р инж. Камелия Симеонова Николова
5. доц. д-р инж. Николай Атанасов Шопов

Рецензенти:

1. доц. д-р Фатима Исмаил Сапунджи
2. проф. д-р инж. Георги Любенов Илиев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Технически факултет на Югозападен университет „Неофит Рилски“, учебен корпус 1, кабинет № 1604.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Комуникационни и компютърна техника и технологии“ на Технически факултет на Югозападен университет „Неофит Рилски“. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проект.

Автор: маг. инж. Давид Руменов Давидков

Заглавие: Изследване и моделиране на канали в безжични мрежи, ориентирани около тялото на човек

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Днес, статистическите проучвания показват, че безжичните мрежи и интернет на нещата (Internet of Things - IoT) се разрастват експоненциално и заедно с тях се увеличава използването на носима електроника и обличеми върху тялото на човек сензори и устройства. Наблюдава се не само увеличаване на броя на обличаемите устройства, но също и увеличаване на видовете устройства, както и тяхната функционалност. Това води до появата на нов под клас мрежи към безжичните персонали мрежи, а именно безжични мрежи ориентирани около тялото на човек.

Безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек са комуникационни системи, които позволяват обмен на информация между обличаеми, имплантирани и/или външни устройства [1,2], наричани възли. Тези възли позволяват измервания на физиологичните параметри на човек или други данни от заобикалящата го среда и предаване на данните на отдалечен сървър, ако е необходимо [2]. Възлите, които са разположени вътре в тялото, обикновено се наричат импланти, а тези, разположени върху тялото - обличаеми. Тези комуникационни системи намират приложения в различни области от телемедицината и електронно здравеопазване, през спорт, до приложения свързани със спасителни или военни операции.

Проектирането на една безжична мрежа ориентирана около тялото на човек, както и всяка друга безжична система е предшествано от задълбочен анализ на радиоканалите в желания честотен обхват, среда и сценарий, като се имат предвид, строгите изисквания към приемо-предавателите и антените, видимостта на антените и мобилността на потребителя. Освен това при безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек електромагнитните вълни се разпространяват или като повърхностни вълни или чрез дифракция, като поради сложността и структурата на човешките тъкани и формата на тялото се увеличава сложността при изследване на радиоканалите. Поради тази причина има непрестанна необходимост от разработване и изследване на нови модели на радиоканали за нови видове безжични мрежи ориентирани около тялото на човек, работещи в нови честотни обхвати и/или в нови типове среди.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е **да се разработят нови методи и алгоритми за комплексно изследване на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек**. За постигане на поставената цел въз основа на направения литературен обзор и проведенния анализ е необходимо да бъдат решени следните задачи:

1. Да се анализират съществуващите до момента методи за характеризиране на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек.

2. Да се предложи подход за подобряване характеризирането на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек при прилагане на съществуващи методи за изследване.

3. Да се предложи методология и да се разработи алгоритъм за комплексно изследване на теснолентови off-body радиоканали включително и за влиянието на антените върху параметрите на канала.

Научна новост

Научната новост в настоящия дисертационен труд е свързана с предлагането на нов метод за комплексно характеризиране на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек. Методът отчита влиянието на всеки един от елементи на радиоканала, такива като параметри и характеристики на обличаемите антени, влиянието на човешкото тяло, ориентация на тялото в изследваната заобикаляща среда, както и условия на разпространение, т.е. линия на пряка видимост, на частично пряка видимост и на непряка видимост. На основата на предложения нов метод е:

- 1) разработен алгоритъм на методологията на провеждане на измерванията;
- 2) разработена постановка за провеждане на симулационни и експериментални изследвания;
- 3) апробиран новопредложения метод, посредством експериментални изследвания, като е определено влиянието на отделните елементи на радиоканала.

Допълнително е предложен нов подход за изследване на загубите при разпространение в радиоканала, чрез който се подобрява характеризирането на теснолентовите off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек при прилагане на емпиричния метод. На основата на предложения нов подход е предложена и разработена постановка за изследване на загубите при разпространение в статични и динамични off-body радиоканали чрез емпиричния метод, включително и при използването на различни обличаеми антени.

Оценено е влиянието на обличаемите антени като елемент на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек, като е установено, че ефективността на излъчване, диаграмата на насочено действие и поляризацията на обличаемата антена играят съществена роля при определянето на характеристиките на off-body радиоканала.

Оценено е влиянието на човешкото тяло като елемент на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек и е установено, че то има значителен ефект върху загубите при разпространение.

Практическа приложимост

По тематиката на дисертационния труд е работено в научноизследователски проект по договор КП-06-Н57/11 от 16.11.2021 на тема „Антенни структури за нови източници на захранване в безжични мрежи от следващо поколение“, с ръководител на научния колектив доц. д-р инж. Габриела Лъчезарова Атанасова, по Конкурс за финансиране на фундаментални научни изследвания, 2021 г. към Фонд „Научни изследвания“.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са представени в общо 4 авторски публикации представени на конференции в страната. В две от публикациите докторантът е самостоятелен автор, а в другите две публикации е в съавторство.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 127 страници, като включва увод, 3 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на научните, научно-

приложните и приложните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използваната литература. Цитирани са общо 116 литературни източници, като всички са на английски език. Работата включва общо 56 фигури и 9 таблици. Номерата на фигурите, таблиците и посочените литературни източници в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ПЪРВА ГЛАВА

ОБЗОР НА БЕЗЖИЧНИТЕ ТЕХНОЛОГИИ И РАДИОКАНАЛИ В БЕЗЖИЧНИ МРЕЖИ ОРИЕНТИРАНИ ОКОЛО ТЯЛОТО НА ЧОВЕК

1.1 Безжични технологии приложими за изграждане на безжични мрежи ориентирани около тялото на човек

Безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек са комуникационни системи, които позволяват обмен на информация между обличаеми, имплантирани и/или външни устройства [1, 2], наричани възли.

Тези мрежи са обект на голям интерес в научната и изследователската общност през последните години, поради приложението им в различни области - от електронното здравеопазване (чрез постоянно следене на различни физиологични показатели на пациента с помощта на биосензори поставени в/на или около човешкото тяло и алармиране при възникване на опасна ситуация за здравето) [3, 4], през спорт (чрез постоянно следене на различни показатели на спортиста като кинематика на долните крайници по време на колоездене с помощта на биосензори поставени върху тялото и представяне на информацията на безжично устройство на спортиста или треньора) [5, 6], до приложения във военни и спасителни операции (чрез предаване например на позицията на войниците или спасителите по време на операция) [7].

Независимо от приложението на безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек те най-общо са съставени от следните хардуерни компоненти: сензори (sensors), акуратори (actuators), процесор (processor), радиоприемо-предавател с антена (transvers and antenna) и персонални устройства (personal devices). Сензорният възел е отговорен за регистрирането и записването на информацията. Процесорът може да извърши обработка на данните от сензора, ако е необходимо, преди предаването [8]. Сензори могат да бъдат разположени или върху дрехи [9] или поставени директно върху тялото (напр. при измерване на индекса за кислородно насищане на кръвта SpO₂), или имплантирани вътрешни, като инжектирани под кожата или в кръвния поток (напр. електрически импулси за смекчаване на ефектите от болестта на Паркинсон) [10]. Актуаторът може или да реагира на данни, получени от сензори или на инструкция получена от персоналното устройство на потребителя. Например акуратори се използват за прилагане на лекарства (като инсулин) или за контролиране на биометричните данни на дадено лице (напр. кръвно налягане, телесна температура). Персоналното устройство събира и обработва цялата информация от сензорите и акураторите. Тези устройства обикновено са смартфони, таблети, лични цифрови асистенти или специализирани устройства.

В зависимост от областта на приложение безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек могат да се класифицират на мрежи за медицински и немедицински цели [11], при което към възлите и радиоканалите в мрежата се

дефинират различни изисквания. Мрежите за медицински цели също могат да се разделят на три подкатегории според тяхното предназначение: за мониторинг на жизнените показатели на пациента, за рехабилитация, за контрол и управление на медицински устройства. Мрежите за мониторинг на жизнените показатели (като температура, електрокардиограма (ЕКГ), пулсова вълна, кръвно налягане или движение на крайници) са обект на най-голямо изследване и приложение. Например за следене на различни показатели след тежки ортопедични операции при възстановяване на движението на лакътя [12], наранявания на рамото [13] или увреждане на периферните нерви [14].

1.2 Модели на радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек

Предавателят и приемникът на всеки възел са неразделна част от радиоканала в една безжична мрежа ориентирана около тялото на човек [45]. Съгласно стандарт IEEE 802.15.6 в тези мрежи са дефинирани три вида възли, илюстрирани на фиг. 1.2-1:

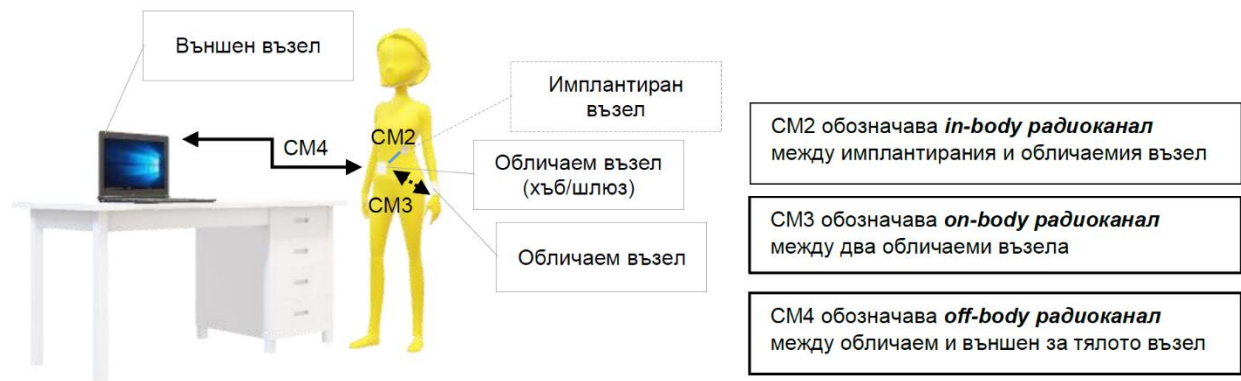
- **Имплантиран възел:** Това е възел, който се поставя вътре в човешкото тяло непосредствено под кожата до няколко сантиметра по-дълбоко в тъканите;
- **Обличаем възел:** Това е възел, който може да се поставя директно на повърхността на човешката кожа или върху дреха, но най-много на 20 mm от тялото на човек;
- **Външен възел (Gateway Node):** Това е възел, който не е в контакт с човешкото тяло. Обикновено се намира на разстояние от няколко сантиметра до най-много 5 метра от тялото на човек.

В безжични мрежи ориентирани около тялото на човек в зависимост от разположението на възлите в/върху или около човешкото тяло са дефинирани три вида радиоканали, съгласно стандарт IEEE 802.15.6:

- **in-body радиоканали (модел на радиоканала CM2 на фиг. 1.2-1)** – поне един от възлите участващи в радиопредаването е имплант (разположен вътре в човешкото тяло), т.е. съществува комуникация между имплант-имплант или имплант–носим върху човешкото тяло възел;
- **on-body радиоканали (модел на радиоканала CM3 на фиг. 1.2-1)** – всички възли участващи в радиопредаването са разположени върху тялото на човека. Например възли поставени директно върху кожата на човека или прикрепени на дрехи носени от него;
- **off-body радиоканали (модел на радиоканала CM4 на фиг. 1.2-1)** – поне единия възел участващ в радиопредаването не е разположен върху или в близост до тялото на човека. Този възел се явява точка за достъп, хъб или шлюз. При този радиоканал комуникацията се осъществява, когато поне един възел е разположен върху тялото комуникира с външен възел.

Днес стандартите [46-49] предвиждат и съвместна работа между две и повече безжични мрежи ориентирани около тялото на човек, както е показано на фиг. 1.2-2, при което се формира и четвърти тип радиоканал body-to-body (B2B) [50]. B2B радиоканалите са подобни на off-body радиоканалите (модел на радиоканала CM4 на фиг. 1.2-1) като при тях допълнително могат да се внесат загуби поради движението на тялото. Например при доближаване или отдалечаване на възлите, при движение на хората, т.е. една промяна на местоположението поради

мобилност на потребителите ще доведе до доста различни ситуации, засягащи не само загубите при разпространение на сигнала, но и изменението на сигнала в следствие на засенчване на някоя от антените и т.н. [51, 52]. Друга важна особеност при този тип радиоканали е, че антените от двете страни в радиоканала се влияят от присъствието на тялото на човека.



Фиг. 1.2-1 Пример за безжична мрежа ориентирана около тялото на човек и видове радиоканали [A1].

Освен това предаването на информация в безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек може да се осъществява в открити пространства или в затворени/закрити пространства. Например откритите пространства могат да включват градска среда, като улица, парк или други. Докато закритите пространства могат да бъдат болнична стая, офис, метростанция, паркинг и т.н.

Следователно, при тези мрежи могат да се разглеждат две различни среди за разпространение на електромагнитните вълни и четири различни вида радиоканали в зависимост от местоположението на възлите, всеки от които може да бъде в линия на пряка видимост LoS или в линия на непряка видимост NLoS. При тези безжични мрежи, разпространението на радиовълните се влияе от околната среда, т.е. сгради, дървета, мебели и също от позициите на възлите (респективно техните антени) върху човешкото тяло.

До настоящия момент в общодостъпната литература са дефинирани няколко модели на радиоканали в безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек въз основа на различните сценарии и ограничения [55-58]. Основно те могат да се разделят на:

- статични модели на радиоканали и
- динамични модели на радиоканали.

Статичните модели на радиоканали са тези, при които няма движение/преместване или се наблюдава незначително движение/преместване на възлите, например при движение на гърдния кош на човек, ако възелът е прикрепен към гърдите [53].

Динамичните модели на радиоканали включват значителни или принудителни движения на тялото [54] например ходене, бягане или друг вид движения рефлектиращи върху възлите, например, когато са поставени върху тялото на велосипедист и т.н.

Радиоканалът в безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек е силно повлиян от няколко аспекта: характеристиките на възлите, местоположението на възлите върху тялото, и най-вече разположението и

ориентацията на антените; използваните честотни обхвати, средата около потребителя (открито или закрито пространство), мобилността на потребителите и много други. Всички тези фактори водят до необходимостта от разработването на модели на радиоканали за голямото разнообразие от случаи, както и нови методи за тяхното изследване.

1.3 Методи за изследване на статични радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек

1.3.1 Методи за изследване на статични on-body радиоканали

В [59] за първи път се представят препоръки за изследване на модели на радиоканали за сценарий CM3, показан на фиг. 1.2-1 за двата честотни обхвата ISM и UWB при линия на пряка видимост между предавателя и приемника и при линия на непряка видимост между предавателя и приемника. Предлага се изследванията да се провеждат в затворено/закрито пространство (в случая в болнична стая). Позициите на антената върху тялото са избрани така, че да съответстват на повечето от приложенията на безжичните мрежи изградени около тялото на човек.

При on-body радиоканалите двете крайни устройства в радиоканала са разположени върху човешкото тяло, което означава, че предаващата (TX-transmitter) и приемащата (RX-receiver) антена са разположени в непосредствена близост или върху тялото [59, 60]. Поради структурата на човешките тъкани, изградени основно от вода, електролити и разтворени органични йони и молекули, човешкото тяло поглъща мощността пренасяна от радиосигналите, което налага разработването на нов вид антени, така наречените обличаеми антени, към които се предявяват специфични изисквания: 1) да имат висока ефективност на излъчване в близост до тялото на човек и 2) излъченото от тях електромагнитно поле да е в границите на пределно допустимите норми за облъчване на човек, определени от международните стандарти и препоръки. За да се задоволят тези изисквания, в достъпната литература са представени микролентови антени с допълнителни елементи, които имат насочена диаграма на насочено действие (ДНД) [2, 61-64].

В [59] са представени модели за изчисляване на загубите при разпространение (PL (path loss)) за два честотни обхвата ISM и UWB, които се явяват една от съществените характеристики на радиоканала. Загубите при разпространение могат да бъдат представени чрез коефициентите на матрицата на разсейване (S_{ij}) [59]. Резултатите показват, че загубите при разпространение, когато предаващата и приемащата антени са върху човешко тяло, достигат 25 dB в безехова камера. В болничната стая, където има отражения от стените, тавана и т.н., загубите при разпространение достигат до 10 dB.

1.3.2 Методи за изследване на статични off-body радиоканали

Един от първите опити за характеризирание на off-body радиоканал е направен от Ziri-Castro и колектив и представен в [65]. Авторите представят сравнение между измерени данни и симулации на теснолентов радиоканал с носеща честота 5,2 GHz за два сценария в затворено пространство (коридор и офис). Измерванията включват един фиксиран предавател и един приемник, поставени на бедрото на човек (наричан тестов обект), който върви по линия на пряка видимост (LoS) и линия на непряка видимост (NLoS) към предавателната антена. Симулациите са извършени с помощта на специализиран софтуерен

продукт базиран на метода на крайната разлика във времевата област. Получените от авторите резултати показват, че статистическият анализ е подходящ за оценка на загубите при разпространение в затворено пространство (коридор и офис).

Изследователската група от Кралския университет в Белфаст в няколко изследвания представени в [66-68] представя характеристики на off-body радиоканал на честота 868 MHz. Измерванията са направени за няколко приемачи антени, поставени върху тялото на човек, при три различни среди (безехова камера, офис и коридор), при две условия на LoS и NLoS.

В работите на Ambroziak и колектив [69-71] се установява, че когато потребителят е неподвижен, разпространението на електромагнитните вълни върху тялото е до голяма степен е независимо от заобикаляща го среда, поради липсата на компонент на затихване в малък мащаб, свързан с движението на тялото на потребителя или липса на промени в позицията на потребителя. Поради тази причина авторите предлагат да се анализират само динамични сценарии, които са много по-сложни по отношение на разпространението на радиовълните.

1.4 Методи за изследване на динамични радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек

1.4.1 Методи за изследване на динамични on-body радиоканали

Едни от първите статистически и теоретични изследвания на динамични on-body радиоканали, включващи различни пози на тялото и ефекти от движенията върху радиоканала за разпространение са представени в [72-77]. В [72] също е представено и числено, чрез прилагане на метода на крайните разлики във времевата област, както и диелектричните параметри на опростен модел на човешко тяло. Моделите и параметрите на радиоканала за разпространение върху тялото се извличат от измерени и анализирани данни.

В изследванията на Smith [73-77] и колектив се използва постановка, която най-общо включва възрастен мъж, който тича на място, като се разглежда сценарий на свързаност предавател (Tx) разположен на гърба и приемник (Rx) разположен на гърдите. Ширината на честотната лента на канала е 10 MHz. Осъществява се свързаност между двата възела чрез предаване на поредица от 2048 бита данни на всеки 2,5 ms за период от 10 s. В изследванията се използват вградените антени в приемопредавателите, монтирани върху тялото на човек.

В [78] са изследвани четиринадесет on-body радиоканали в четири среди (безехова камера, отворена офисна зона, коридор и открито пространство) при общо 56 различни сценария. При провеждане на изследванията се използва микролентова F-антена във всяко от обличаемите устройства. Авторите стигат до заключението, че характеристиките на радиоканала, когато потребителят е неподвижен, както в отворената офис зона, така и в коридора са до голяма степен подобни на тези на безеховата камера, със същото периодично повторение, дължащо се на дишането, насложено върху наблюдавания канал. От представените от авторите резултати се вижда, че когато потребителят е мобилен (подвижен) в силно многопътна среда на радио разпространение, характеристиките на радиоканала имат малка корелация с предишното (стационарно) състояние на радиоканала. Също така, когато потребителят е в открито пространство характеристиките на радиоканала са близки до тези в безеховата камера. От представените от авторите резултати може да се заключи, че когато потребителят

е неподвижен, разпространението на електромагнитните вълни върху тялото е до голяма степен независимо от заобикаляща го среда. Също така, в отворено пространство, когато потребителят е мобилен, отражението от земята и в много по-малка степен от близките сгради може да повлияе на параметрите на радиоканала, като те отново се доближават до тези получени в безеховата камера.

1.4.2 Методи за изследване на динамични off-body радиоканали

В [79] се измерва и анализира 3 – 5 GHz UWB off-body динамичен радиоканал за безжични комуникации в безжични мрежи ориентирани около човешкото тяло. Анализирани са модели на радиоканала при две условия с линия на пряка видимост и без линия на пряка видимост, които са получени, когато предаващата (TX) антена е поставена на различни места на човешко тяло, докато приемащата (RX) антена е поставена далеч от човешкото тяло.

От анализираните характеристики на UWB off-body динамичен радиоканал е показано, че при условия на непряка видимост между приемащата и предаващата антени, каналът има по-големи загуби при разпространение в сравнение с условието, когато и предавателят и приемникът са в линия на пряка видимост. Според експериментални и аналитични резултати за постигане на висока скорост на предаване на данни, UWB off-body динамичен радиоканал в безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек ще изисква условие на пряка видимост между предавателя и приемника. За приложения, при които е необходимо само предаване на данни с малка скорост това ограничение не се налага.

В [80-82] е извършен подробен анализ на параметрите на два off-body динамични радиоканала - теснолентов и ултрашироколентов в затворено пространство. Анализът е извършен при две честоти 868 MHz теснолентов канал и 6489 MHz за ултрашироколентов канал, при няколко динамични сценарии, съответстващи на типично човешко поведение в затворено пространство. От извършения статистически анализ на получените параметри на модела на радиоканала е наблюдавано добро съответствие с емпиричните данни.

1.4.3 Методи за изследване на динамични body-to-body радиоканали

В [83-87] се разглеждат и анализират динамични body-to-body радиоканали, които се формират, когато комуникациите се осъществяват между обличаеми устройства на две независимо движещи се тела.

В [83] постановката на изследване включва две тела, които се движат по улица в градска зона (т.е. открито пространство). Микролентова антена, работеща в 2,45 GHz ISM честотен обхват е използвана за осъществяване на връзка и в двете обличаеми устройства.

Трябва да се отбележи, че за първи път в [83] е представено изследване чрез статистически анализ на загубите при разпространение, което се извършва за радиоканали, в зависимост от ориентацията на антените на двете устройства в мрежата. Разглеждат се шест различни сценария на ориентация на антените. Както може да се очаква, най-високо ниво на сигнала се получава за кополяризирани антени в линия на пряка видимост. Освен това, техните резултати показват, че динамиката на тялото има значително влияние върху загубите при разпространение.

1.6. Изводи и приноси към първа глава

Изводи

В резултат от проведенния обзор на литературата и научните изследвания, свързани с безжичните технологии приложими за изграждане на безжични мрежи ориентирани около тялото на човек, моделите на радиоканали и методите за тяхното изследване, могат да бъдат направени следните основни изводи:

1. Дефинирани са четири основни типа (in-body, on-body, off-body, body-to-body) радиоканали в безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек, които допълнително могат да бъдат разделени на статични и динамични.

2. Съществува голямо разнообразие в предложените подходи и методи за тяхното изследване, които зависят най-вече от сценариите на приложение и средата, в която се провежда изследването. В представените до момента резултати има значителна дисперсия, както за контролирана среда (безехова камера), така и в различни открити и закрити пространства (офиси и т.н.) – неконтролирани среди.

3. При статичните радиоканали, които се формират, когато възелът е неподвижен, разпространението на електромагнитните вълни върху тялото до голяма степен е независимо от заобикаляща го среда, поради отсъствието на компонент на затихване в малък мащаб, свързан с движението на тялото на потребителя или отсъствието на промени в позицията на потребителя, върху който е разположен обличаемият възел.

4. До този момент са проведени голям брой статистически и теоретични изследвания на динамични on-body радиоканали, включващи различни позиции на възлите върху тялото, различни пози на тялото, като са изследвани включително и ефекти от движенията на потребителя върху радиоканала за разпространение в различни среди (безехова камера, открито и закрито пространство).

5. Представени са малко на брой статистически набори при изследване на off-body динамични радиоканали, главно за 3 – 5 GHz UWB.

6. В проведените до момента изследвания при характеризиране на радиоканала се отчитат фактори, като позиция на безжичния възел върху тялото на човек, движението на потребителя, върху който е монтиран безжичния възел, както и вида на заобикалящата среда.

7. В повечето проведени до момента изследвания не се отчита вида на използваните антени (включително разстоянието между антената и човешкото тяло, поляризацията на антената, и т.н.), което е фундаментално за правилното и реалистично моделиране на радиоканала.

8. В проведените до момента изследвания при характеризиране на радиоканалите в безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек са използвани основно диполни антени, както и вградени (чип) антени, като не е отчетено влиянието на ефективността на излъчване на антената върху параметрите на радиоканала.

Приноси към първа глава

Разгледани са основните видове радиоканали в зависимост от разположението на възлите в/върху или около човешкото тяло, както и тези формирани при съвместната работа между две и повече безжични мрежи ориентирани около тялото на човек съгласно стандарт IEEE 802.15.6 и ETSI TR 103

394. Направен е задълбочен анализ на основните методи за изследване на радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек.

1.7 Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е да се разработят нови методи и алгоритми за комплексно изследване на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек. За постигане на поставената цел въз основа на направения литературен обзор и проведения анализ е необходимо да бъдат решени следните задачи:

1. Да се анализират съществуващите до момента методи за характеризиране на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек.

2. Да се предложи подход за подобряване характеризирането на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек при прилагане на съществуващи методи за изследване.

3. Да се предложи методология и да се разработи алгоритъм за комплексно изследване на теснолентови off-body радиоканали включително и за влиянието на антените върху параметрите на канала.

ВТОРА ГЛАВА

АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩИТЕ МЕТОДИ ЗА ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ НА ТЕСНОЛЕНТОВИ OFF-BODY РАДИОКАНАЛИ В БЕЗЖИЧНИ МРЕЖИ ОРИЕНТИРАНИ ОКОЛО ТЯЛОТО НА ЧОВЕК

В настоящата глава на дисертационния труд са решени следните поставени задачи:

- Да се анализират съществуващите до момента методи за характеризиране на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек.
- Да се предложи подход за подобряване характеризирането на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек при прилагане на съществуващи методи за изследване.

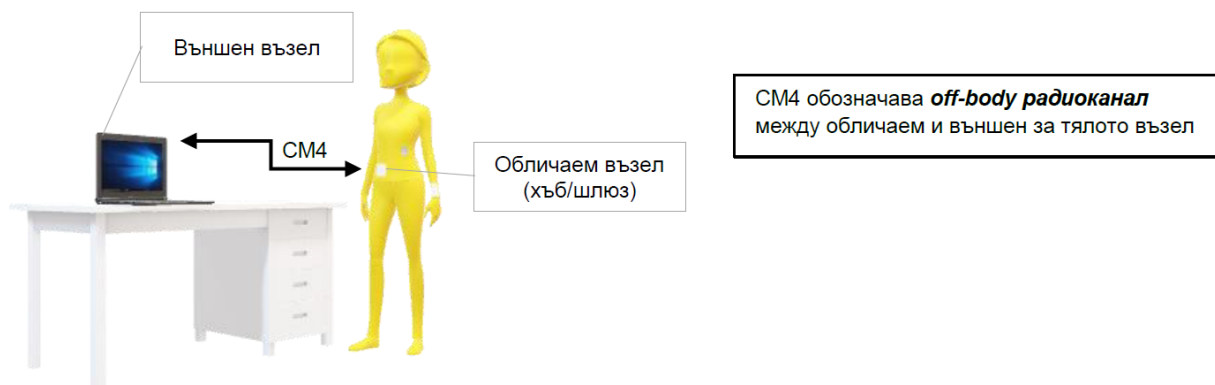
Познаването на свойствата на радиоканалите, използвани в безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек, е необходимо за проектиране на надеждни комуникационни системи, включително разработване на бъдещи комуникационни стандарти и проектиране на ефективни приемо-предаватели.

Въз основа на направения литературен обзор може да се обобщи, че до настоящия момент са представени два метода за характеризиране на радиоканали в безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек: емпиричен и симулационен.

В повечето от публикуваните в литературата изследвания за характеризиране на радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек е използван емпиричен метод [51, 53–55, 58–59, 65–87], докато само няколко използват симулационния [58, 62, 65]. При всички изследвания се прилага сценарийния подход, като се анализират параметрите на радиоканала при две условия с линия на пряка видимост и без линия на пряка видимост в закрити и открити пространства, както и в контролирана среда (безехова камера).

2.1 Емпирични подходи за характеризирание на off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек

Както вече беше споменато в предходната глава има ограничен брой изследвания в достъпната литературата върху теснолентови off-body радиоканали, а този тип канали са важни за да се постигне надеждна комуникация между един шлюзов възел, разположен на тялото и външен възел (напр. точка за достъп), при предаване на информация за физиологични параметри на потребител например, както е показано на фиг. 2.1-1. Както се вижда от фиг. 2.1-1 за off-body радиоканала е характерно, че при него едната страна на радиоканала е разположена върху или в непосредствена близост до човешко тяло, което означава, че предаващата (TX-transmitter) или приемащата (RX-receiver) антена са разположени върху тялото [60].



Фиг. 2.1-1 Пример off-body радиоканала в безжична мрежа ориентирана около тялото на човек

Средата на разпространение до голяма степен се характеризира с модели на загубите от радио разпространение, които описват загубата на мощност на сигнала като функция на някаква променлива (например разстояние между предавател и приемник). Моделите на загубите от разпространение са важни, тъй като се използват за прогнозиране на необходимата мощност на предаване, така че полученият сигнал в приемната страна да е с достатъчно ниво, което да позволи надеждно получаване на данни.

Прогнозирането на затихването при разпространение за радиосистеми, разположени в закрити пространства се различава от това за системите на открито. При прогнозиране на радио покритие за системи в открити пространства се цели, както при системите в закрити/затворени пространства да се осигури ефективно покритие на необходимата зона (или да се осигури надежден път, в случай на системи от точка до точка) и да се избегнат смущения, както в системата така и в други радиосистеми в съседство [88]. При закрито пространство, площта на радио покритие в голяма степен се определя от геометрията на сградата и границите на самата сграда. Поради сложния характер на разпространение на електромагнитните вълни в затворени пространства са необходими подробни познания за конкретното място, напр. геометрия, материали, мебели, очаквани модели на използване и т.н. При първоначално планиране на системата са необходими модели, които най-общо представят характеристиките на разпространение в околната среда [88].

Моделът на загубите от разпространение е съществен при прогнозиране на загубата на мощност на сигнала на известно разстояние между предавателя и приемника за всяка комуникационна мрежа използваща безжично предаване [89]. За безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек моделите на разпространение се извличат за конкретни сценарии. Аналитичните модели при оценяване на загубите при разпространение се основават на математическо представяне. Моделът на загубите при разпространение в свободното пространство е типичен пример за аналитичен модел. Той се базира на Friis Transmission Formula и представена за първи път през 1946 г. [90].

Самият модел е, както следва [91]:

$$P_R(d) = P_T G_T G_R \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right], \quad (3)$$

където P_R е мощността в приемника, P_T е мощността на предавателя, G_T е усилването на предавателната антена, G_R е усилването на приемната антена, а d е разстоянието между приемника и предавателя. Както вече беше казано по-рано, разпространението на електромагнитните вълни особено в затворени пространства е сложно явление, поради което е трудно да се характеризира загубите при радио разпространение в различните среди само с един модел [92]. Поради тази причина, особено в безжичните мрежи ориентирани около тялото на човек се използват емпирични модели, които се основават на реални експерименти и полеви измервания. Обикновено анализът на действителните точки от данни се използва за определяне на определени параметри (т.е. пресечна точка и коефициенти), които формират модела. Предимството на такива емпирични модели е тяхното „имплицитно отчитане на всички фактори на разпространение“, известни и неизвестни, чрез действително измерване на полето [93].

Моделът на логаритмично разстояние е емпиричен модел, който е теоретично надежден. За разлика от модела на свободното пространство, моделът на логаритмично разстояние се прилага за общи среди. Той е общ, обяснявайки загубата на мощност на сигнала като експоненциална връзка с разстоянието [94]. Моделът е следният:

$$P_R(d) = P_R(d_0) G_T G_R \left[\frac{d_0}{d} \right]^n, \quad (4)$$

където $P_R(d_0)$ е мощността при опорно (предварително дефинирано разстояние) d_0 (обикновено се приема $d_0=1$ m), а n е индексът на загубите при разпространение. За разлика от модела на свободното пространство, който определя $n=2$, в общият модел на логаритмично разстояние n варира, в зависимост от средата. Горното уравнение може да бъде представено в следната форма:

$$P_R [dB] = P_0 [dB] + G_T [dB] + G_R [dB] - 10n \log(d), \quad (5)$$

за опорно $d_0=1$ m и опорна посока $\theta=0^\circ$, дефинираща $P_0=P_R(d_0=1)$.

До момента за оценка на загубите от разпространение се предлага подход включващ схемата на постановка на провеждане на измерванията, представена на фиг. 1.4.2-1. Както се вижда от фигурата, тя се състои от векторен анализатор на електрически вериги, като тестова платформа за анализ на информацията в радиоканала в сценарий на динамично движение. При тази постановка на провеждане на изследването едната от антените е монтирана върху тялото на доброволец (мъж или жена), т.е. измерванията за оценка на радиоканалите в

безжични мрежи ориентирани около тялото на човек, включват поставяне на най-малко една антена върху човешко тяло. Има два фактора, които правят тези измервания по-трудни от измерванията на радиоканали в клетъчни мрежи за мобилни комуникации например или в други радиокомуникационни системи. Първо, промените в геометрията, дължащи се на движенията на тялото, водят до драматични промени в свойствата на радиоканала и тези промени трябва да бъдат установени при измерванията. Второ, измерените данни включват, както антена/и, така и свойствата на радиоканала, а премахването на антената от измерения предавателен канал е много трудно или невъзможно. В допълнение, движенията на тялото имат значителен ефект върху измерените данни, но е невъзможно движенията да се повторят точно, дори когато доброволецът извършва периодични движения. Следователно, характеризирането на динамиката на тялото също става важно при характеризирането на радиоканала.

2.2 Симулационни подходи за характеризиране на off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек

Изследването на разпространението на радиовълните около човешкото тяло се осъществява и чрез числени симулации. Предимството на този подход е, че не се изисква скъпо оборудване и продължителни изследвания отнемащи значителен човешки ресурс. Друго предимство на симулационния подход е, че той позволява по-подробно описание на разпространението под формата на разпределения на електрическо поле и триизмерни модели на диаграмите на излъчване на носимите върху тялото на човек антени, които се снемат изключително трудно чрез измервания. Към настоящия момент числените симулации се прилагат най-вече при изследване на in-body радиоканали. Например в [95] се изследват числено два сценария in- to on-body (сценарий 1) и on- to off-body (сценарий 2).

При повечето изследвания е използван специализиран софтуер базиран на метода на крайната разлика във времевата област (Finite-Difference Time-Domain FDTD), като в повечето случаи се прилага xFDTD (xFDTD, Remcom Inc., State College, PA, САЩ) или SEMCAD X (SEMCAD X Matterhorn Team, Zurich, Switzerland). Двата софтуерни продукта осигуряват създаване на точен модел на човешко тяло, като и възможност за точно пресъздаване на плоски или елиптични фантоми на човешко тяло.

Методът FDTD позволява детайлно моделиране, както на антени, така и на човешки модели [98]. Този метод използва крайните разлики като приближения, както на пространствените, така и на времевите производни в уравненията на Максвел (по-специално законите на Ампер и Фарадей) [99]. FDTD алгоритъмът е предложен за първи път от Кане Уее през 1966 г., в който се използват централни разлики от втори ред [100], като позволява решаване на сложни проблеми.

Симулационният подход обаче има някои ограничения и недостатъци. Изчисления изискват голямо количество памет и време за изчисление, тъй като човешкото тяло е електрически голямо при повечето честоти на интерес спрямо дължината на електромагнитната вълна и следователно се изискват прекалено големи ресурси за обработка и памет. Методът на крайните разлики във времевата област изисква внимателно определяне на размера на FDTD клетката при симулации, тъй като ако даден обект е много голям в сравнение с дължина на електромагнитната вълната, може да е необходимо прекалено голям обем памет и

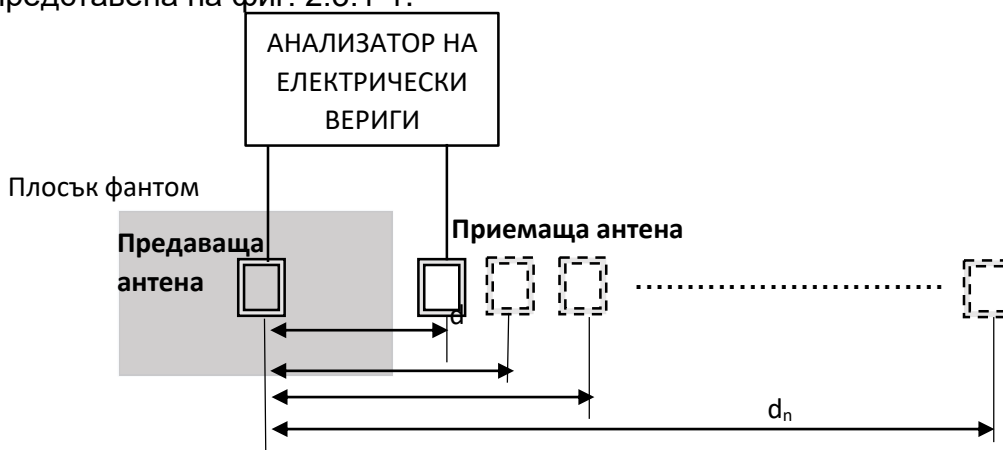
време за изчисление. Следователно, този подход е ограничен, тъй като човешкото тяло е електрически голямо при повечето честоти на интерес и следователно повечето симулационни методи изискват прекалено големи ресурси за обработка и памет.

2.3 Решения за подобряване характеризирането на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек при прилагане на съществуващите методи за изследване

В настоящия раздел на дисертационния труд е представено решение (подход) за подобряване характеризирането на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек при прилагане на съществуващи методи за изследване. За демонстриране на приложимостта на подхода е избран ISM 2,4 GHz диапазон, който се използва в редица стандарти, а именно IEEE 802.15.1 [101], IEEE 802.15.4 [102] и IEEE 802.15.6 [20], които са приложими при изграждане на безжични мрежи ориентирани около тялото на човек.

2.3.1 Методи и модели

За изследване на загубите при разпространение в радиоканала се използва емпиричния метод. За провеждане на изследванията е предложена постановката представена на фиг. 2.3.1-1.

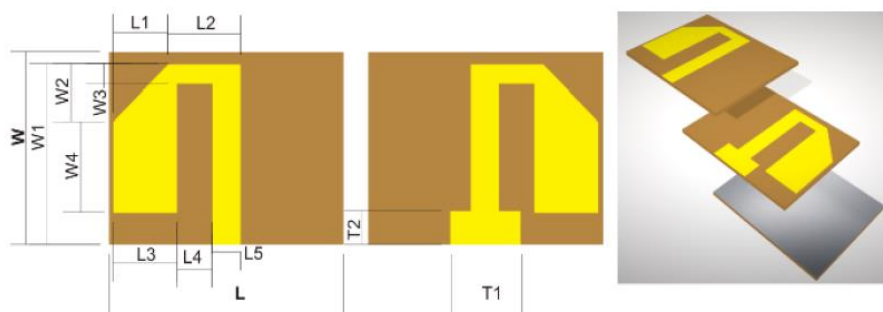


Фиг. 2.3.1-1 Постановка за изследване на загубите от разпространение при off-body радиоканал [A1].

Ключов елемент за характеризиране на радиоканала се явява векторният анализатор на електрически вериги, с който се измерва коефициента на предаване (S_{21}) между предавателната антена и приемаща антена, както е показано на фиг. 2.3.1-1. В настоящето изследване е използван двупортов векторен анализатор на електрически вериги TTR503A от серия Tektronix TTR500 с честотен обхват от 100 kHz до 3 GHz. Използвани са 50-Ω кабели с малки загуби между портовете на анализатора на електрически вериги и антените. За да се елиминира влиянието на кабела върху измерванията на радиоканала, беше извършено пълно калибриране на и между двата порта.

Две обличаеми гъвкави антени, базирани на модифицирана диполна антена с рефлектор са използвани за предаваща и приемаща антена, съответно. Тези антени са избрани, тъй като осигуряват стабилна работа върху тялото на човек и подходящ баланс между малък размер на антената (повърхността на антената е 2214 mm²) и висока ефективност на излъчване (57,73%) [103]. Параметрите на

антените са изследвани и представени в [103]. Геометрията на използваните антени е представена на фиг. 2.3.1-2.

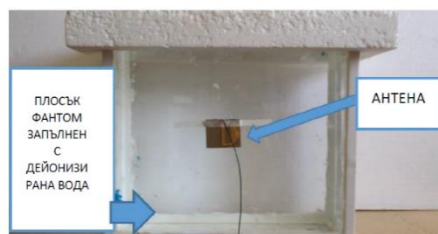


Фиг. 2.3.1-2 Геометрия на използваните антени [103].

Предлага се с цел осигуряване на повторяемост на измерванията и изследване на загубите от разпространение при най-тежките условия, човешкото тяло да бъде заменено с физически фантом.

Физическите фантоми са направени от твърдо вещество, течност или гел и са предназначени за извършване на измервания в контролирана лабораторна среда. Те могат да бъдат класифицирани въз основа на типовете тъкани, които представляват, например могат да представляват тъкани с малка диелектрична проникваемост и малки загуби (напр. кости и мазнини). Също така могат да представляват тъкани с по-голяма диелектрична проникваемост и загуби (напр. мозък, кожа или мускули, които имат голямо съдържание на вода). Въз основа на тяхното крайно състояние на материята те могат да бъдат класифицирани като твърди (сухи), полутвърди (гел) и течни фантоми. Също така, в зависимост от броя тъкани, които представят фантомите могат да бъдат разделени на хомогенни и хетерогенни [2]. След анализ на възможните фантоми е избран плосък хомогенен фантом използван за верифициране на опорни стойности на специфичната погълната мощност (SAR) получени при числени симулации чрез FDTD метод. Фантомът е дефиниран в стандарт БДС EN 62209-1:2017 [104]. Размерите на плоския фантом са съответно 300 mm (височина), 360 mm (ширина) и 150 mm (дебелина) и е запълнен с дейонизирана вода.

При провеждане на изследванията предаващата антена е поставена в центъра на фантома, както е показано на фиг. 2.3.1-1 и 2.3.1-3.



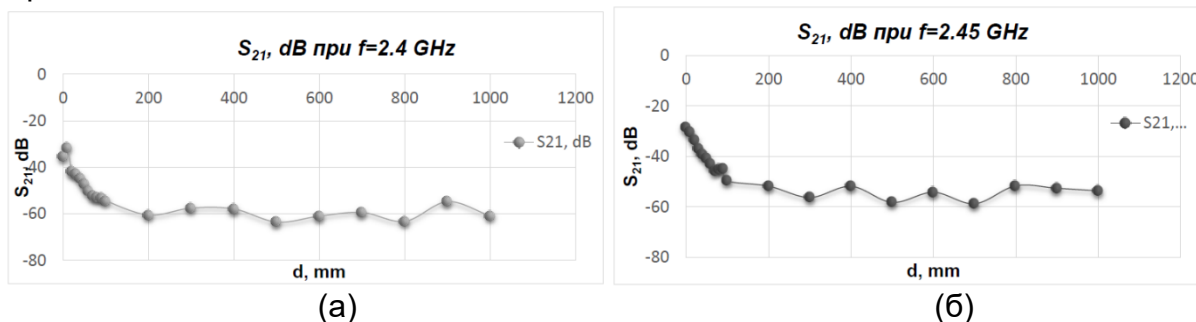
Фиг. 2.3.1-3 Разположение на предаващата антена върху плоския фантом на човешкото тяло.

Приемащата антена първоначално е поставена на разстояние $d=1$ mm (т.е. двете антени са доближени една до друга, при случай на кросполяризация), след което приемащата антена е измествана на максимално разстояние $d_n=1000$ mm, през стъпка 10 и 100 mm. Измерванията са извършени за две честоти 2,4 и 2,45 GHz, за да се анализира модела на радиоканала в нелицензирания ISM (Industrial,

Scientific, and Medical) честотен обхват 2,4 - 2,4835 GHz, при условия на пряка видимост. Всички измервания са проведени в затворено пространство, в лабораторията по „Микровълни, антени и разпространение“ в Техническия факултет на Югозападен университет „Неофит Рилски“.

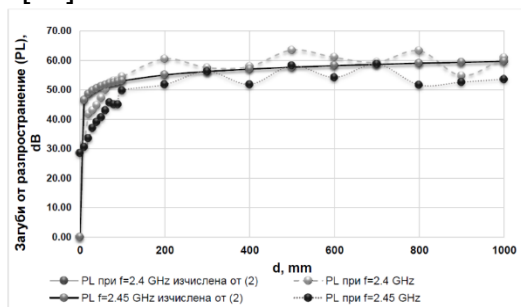
2.3.2 РЕЗУЛТАТИ

На фиг. 2.3.2-1 са представени резултатите от измерване на S_{21} във функция от разстоянието за двете честоти.



Фиг. 2.3.2-1 Резултатите от измерване на коефициента S_{21} във функция от разстоянието за честоти: (а) 2,40 GHz и (б) 2,45 GHz.

На фиг. 2.3.2-2 са представени резултатите за загубите от разпространение при изследвания off-body радиоканал, като същите са сравнени с представения модел на радиоканала в [59].



Фиг. 2.3.2-2 Загубите от разпространение при изследвания off-body радиоканал във функция от разстоянието

От представените резултати на фиг. 2.3.2-2 може да се заключи, че те корелират добре с модела представен в [59]. Освен това, загубите при разпространение за честота 2,45 GHz във всички местоположения на антената са по-малки от тези изчислени съгласно модела в [59] за същата честота. При честота 2,40 GHz, загубите при разпространение са по-малки от предсказаните за разстояние между приемащата и предаващата антена до 100 mm, т.е. до около една дължина на вълната разпространяваща се в свободното пространство. От резултатите също се вижда, че при разстояние до около една дължина на вълната в свободно пространство PL за изследвания радиоканал се изменят от 30 до 50 dB, след което се колебаят около 50 dB (± 10 dB). Наблюдаваните и за двете изследвани честоти спадове и нараствания в загубите от разпространение се дължат на отражението и дифракцията от околните предмети в лабораторията, което е характерно за многопътното разпространение на електромагнитните вълни в реална работна среда в затворено пространство.

2.5. Изводи и приноси към втора глава

Изводи

В резултат от проведените изследвания могат да бъдат направени следните основни изводи:

Предложеният нов подход и постановка за изследване на загубите при разпространение в радиоканала чрез емпиричния метод подобряват характеризирането на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек, тъй като позволяват повторемост на изследване то, а от там и сравнимост на резултатите при измервания на различни честоти.

Предложената постановка за изследване може да се използва за изследване на параметрите и характеристиките на различни обличаеми антени, като позволи съпоставимост между тях.

Приноси към втора глава

1. Предлага се нов подход и постановка за изследване на загубите при разпространение в радиоканала, чрез който се подобрява характеризирането на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек при прилагане на емпиричния метод.

2. На базата на предложения подход е предложена и разработена постановка за изследване на загубите при разпространение в статични и динамични off-body радиоканали чрез емпиричния метод, включително и при използването на различни обличаеми антени.

ТРЕТА ГЛАВА

МЕТОДОЛОГИЯ И АЛГОРИТЪМ ЗА КОМПЛЕКСНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТЕСНОЛЕНТОВИ OFF-BODY РАДИОКАНАЛИ ВКЛЮЧИТЕЛНО И ЗА ВЛИЯНИЕТО НА ПАРАМЕТРИТЕ НА АНТЕНИТЕ

В настоящата глава на дисертационния труд е решена следната поставена задача:

1. Да се предложи методология и да се разработи алгоритъм за комплексно изследване на теснолентови off-body радиоканали включително и за влиянието на антените върху параметрите на радиоканала.

3.1 Влияние на параметрите на антените върху параметрите на радиоканала

Въз основа на направения литературен обзор може да се обобщи, че до настоящия момент са представени резултати от проведени изследвания на параметрите и характеристиките на радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек, които са осъществени основно с канонични (опорни) антени, такива като полувълнови диполи [95, 96] (представени на фиг. 2.2-1 и 2.2.-2) и монополни антени [105, 106], както и вградени (чип) антени [59, 73-77], като не е отчетено влиянието на ефективността на излъчване на антената върху параметрите на радиоканала. Освен това в някои от изследванията не се посочва типа на антената [51, 60]. Също така, повечето от използваните антени са с твърде големи размери и не отговарят на изискването за обличаеми антени, а именно да са леки, гъвкави и с малки размери.

Трябва да се отбележи също, че до този момент са проведени голям брой изследвания с реални обличаеми антени, които са фокусирани предимно върху

ефекта на човешкото тяло върху работата на антената [2, 62, 95, 103, 106-115]. В общодостъпната литература са налични и изследвания на влиянието на човешкото тяло върху загубите при разпространение, индикатора за сила на получения сигнал (RSSI) и загубата на пакети при комуникации в тялото [11, 53, 57, 106, 114]. Освен това само в няколко от проведените до момента изследвания [71, 83] е представен анализ на поляризацията на антената и то само за body-to-body радиоканали.

Следователно, може да се заключи, че характеризирането на радиоканала не включва характеристиките на обличаемите антени в представените модели базирани на статистически радиоканал, в повечето случаи не се изследва засенчването от тялото (т.е. основно се изследват сценарии на пряка видимост между предаващата и приемащата антени), а компонентите на многолъчевото затихване се анализират отделно.

За преодоляване на споменатите ограничения в настоящата работа е предложен метод за комплексно характеризиране на off-body радиоканали, базиран на съчетаването на емпиричен и симулационен подход с отчитане влиянието на параметрите и характеристиките на антените при извършване на изследвания в затворено пространство при условия на многопътно разпространение на електромагнитните вълни. Той взема под внимание статистическото влияние на различните параметри и характеристики на всеки от елементите в off-body радиоканала в безжична мрежа ориентирана около тялото на човек, като влияние на човешкото тяло, ориентация на тялото в изследваната заобикаляща среда, както и условия на разпространение, т.е. линия на пряка видимост, на частично пряка видимост и на непряка видимост.

3.2 Сценарии и измервателно оборудване за провеждане на изследвания за определяне влиянието на параметрите на антените върху параметрите на теснолентови off-body радиоканали

За правилно характеризиране на един off-body канал е необходимо да се вземат под внимание влиянието на всеки от елементите на канала, а именно, антени, среда за разпространение, ориентация на тялото, както и условия на разпространение, т.е. линия на пряка видимост, на частично пряка видимост и на непряка видимост.

В настоящият подраздел се осъществяват изследвания за определяне на влиянието на параметрите и характеристиките на обличаеми антени върху теснолентовите off-body радиоканали в безжична мрежа ориентирана около тялото на човек.

За целта са дефинирани следните сценарии:

- 1) затворено пространство с линията на пряка видимост между предаващата и приемащата антена;
- 2) затворено пространство с линията на частично пряка видимост между предаващата и приемащата антена;
- 3) затворено пространство с линията на непряка видимост между предаващата и приемащата антена.

За провеждане на изследванията са използвани три различни типа обличаеми антени, както следва обличаема текстилна рамкова антена (wearable textile loop antenna - WTLA) [109], обличаема лого текстилна антена (logo wearable textile antenna - LWTA) [62] и обличаема текстилна монополна антена (wearable

textile monopole antenna - WTMA) [110]. Етапите на проектиране, разработване и тестване на обличаемите антени са представени подробно в [62, 109, 110]. Освен това, с цел сравняване на резултатите с други автори, са проведени и допълнителни изследвания с полувълнов резонансен дипол. Размерите на дипола са определени съгласно [104], като той е настроен да работи на разстояние 2 mm от фантома.

По време на измерванията обличаемите антени са поставени върху плосък хомогенен фантом на човешко тяло запълнен с дейонизирана вода, както е показано на фиг. 3.2-1. Размерът и електромагнитните параметри на фантома са представени в [114].



Фиг. 3.2-1 Снимки на използваните обличаеми антени разположени върху плосък хомогенен фантом: (а) текстилна рамкова антена (WTLA), (б) обличаема лого текстилна антена (LWTA) [62] и (в) обличаема текстилна монополна антена (WTMA).

За оценка на теснолентовите off-body радиоканали се предлага изграждането на реална безжична мрежа по стандарт IEEE 802.15.4 и измерване на RSSI между два безжични възела. Провеждането на измерванията между два възела в една реална безжична мрежа има следните предимства, спрямо използването на векторен анализатор на електрически вериги като тестова платформа:

- позволява да се изследват динамични off-body радиоканали при различни сценарии (ходене, бягане и т.н.) в открити и закрити пространства с голямо разстояние между предавателя и приемника;
- провеждането на изследванията е широко приложимо, тъй като не изисква скъпо струващо оборудване;
- позволява оценка освен на загубите от разпространение и на други параметри като например загуба на пакети при предаване.

За оценка на теснолентовите off-body радиоканали е използван стандарт IEEE 802.15.4, тъй като той широко се прилага за изграждане на безжични мрежи ориентирани около тялото на човек с приложения в здравеопазването, както беше представено в литературния обзор.

За изграждане на безжичната мрежа по стандарт IEEE 802.15.4 са използвани два безжични модула XBee S1 на фирмата DiGi International, САЩ и специализиран софтуерен продукт XCTU, чрез който се осъществява установяване на работните режими на радиовъзлите. Работните режими на възлите от гледна точка на местоположението им са локален и отдалечен. При отдалечения режим,

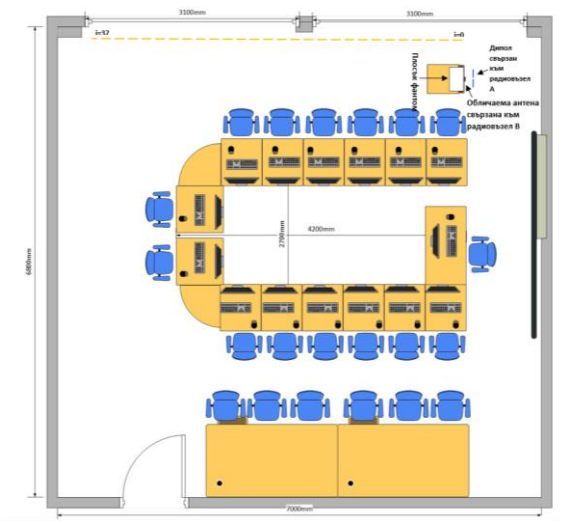
модулът работи в режим на препредаване, свързан като повторител. Възлите са настроени да заемат радиоканал с носеща честота 2,41 GHz, който е най-често заеманият в мрежите изградени по стандарт IEEE 802.15.4.

При провеждане на изследванията единият от възлите, означен като възел А (в локален режим) на фиг. 3.2-2, беше свързан към диполна антена. Другият възел, маркиран като възел В (в отдалечен режим), беше свързан първо с обличаемата текстилна рамкова антена (WTLA), след това с обличаемата лого текстилна антена (LWTA), обличаема текстилна монополна антена (WTMA) и накрая с полувълнов резонансен дипол.

Измерванията са извършени в затворено пространство - на шестия етаж на корпус 1 на Югозападен университет "Неофит Рилски", Благоевград, България, стая 610. На фиг. 3.2-2 е представено оформлението на вътрешната среда и местоположенията на безжичните възли, плоския фантом и антените. По време на измерванията в помещението няма хора, а само оператор в седнало положение зад лаптоп, за да записва стойностите на RSSI и броят грешно приети пакети.

На фиг. 3.2-3 са представени снимки на част от постановката на измерване.

Параметрите на антените, разположени върху полутвърд фантом оценени чрез числени симулации са представени и обобщени в таблица 3.2-1. Тъй като в изследванията в дисертационния труд обличаемите антени се предлага да бъдат разполагани върху плосък хомогенен фантом, запълнен с дейонизирана вода са проведени числени симулации с метода на крайната разлика във времевата област (FDTD). При тези симулации, обличаемите антени бяха поставени на повърхността



Фиг. 3.2-2 Оформление на вътрешната среда и местоположенията на безжичните възли, плоския фантом и антените при провеждане на изследванията.



Фиг. 3.2-3 Снимки на постановката на измерване.

на хомогенен числен фантом. Необходимостта от провеждане на тези изследвания се налага, тъй като резултатите на други автори [103] показват, че ефективността на носима върху тялото на човек антена се променя в зависимост от типа на фантома, върху който е разположена – хомогенен полутвърд, многослоен полутвърд или хомогенен плосък запълнен с дейонизирана вода. Резултатите от

проведените числени изследвания на трите обличаеми антени върху плосък хомогенен фантом запълнен с дейонизирана вода са представени в таблица 3.2-2.

Таблица 3.2-1 Параметри на антените, разположени върху полутвърд фантом оценени чрез числени симулации

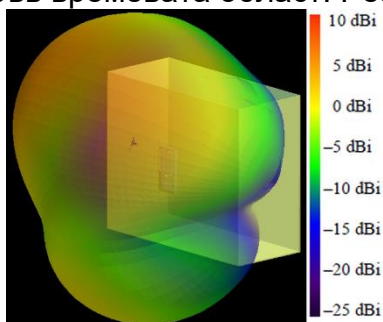
	Антени		
	WTLA [109]	LWTA [62]	WTMA [110]
Ефективност на излъчване, %	6.5	24.0	73.0
Максимално усилване, dBi	-4.5	1.9	8.7
Размер на обличаемата антена, mm	62×32	85×43	150×150

Таблица 3.2-2 Параметри на антените разположени върху плосък хомогенен фантом запълнен с дейонизирана вода

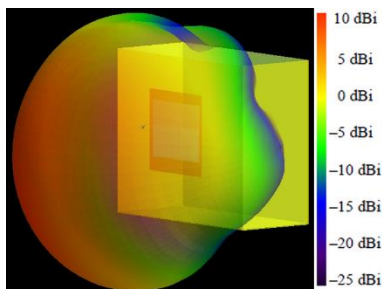
	Антени		
	WTLA	LWTA	WTMA
Ефективност на излъчване, %	7.7	28.4	74.0
Максимално усилване, dBi	-3.6	2.8	8.8

Резултатите показват, че ефективността на обличаемите антени варира в широки граници - приблизително 8% за WTLA и 28 % за LWTA, когато са поставени в центъра на плосък хомогенен фантом запълнен с дейонизирана вода. Освен това ефективността на излъчване на WTMA достига 74% при същите условия. При сравняване на ефективността на излъчване на обличаемите антени върху хомогенен полутвърд фантом (Таблица 3.2-1) и хомогенен плосък фантом запълнен с дейонизирана вода (Таблица 3.2-2), се наблюдава изменение на ефективността на излъчване между 1% и 4% в зависимост от типа на антената. Промяната в ефективността на излъчване се дължи главно на различните диелектрични свойства на фантомите, като получените резултати съответстват на тези в [103].

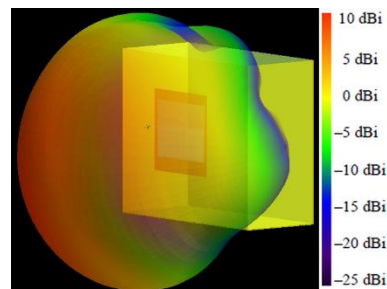
За да се оцени посоката на излъчване и коефициентът на усилване на всяка от обличаемите антени, която е поставена в центъра на плосък хомогенен фантом бяха проведени допълнителни числени симулации с метода на крайните разлики във времевата област. Резултатите са представени на фиг. 3.2-4 до 3.2-6.



Фиг. 3.2-4 Триизмерна диаграма на насочено действие на обличаема лого текстилна антена (LWTA)



Фиг. 3.2-5 Триизмерна диаграма на насочено действие на обличаема монополна антена (WTMA).



Фиг. 3.2-6 Триизмерна диаграма на насочено действие на обличаема текстилна рамкова антена (WTLA).

3.3. Методология на измерване

Методологията на измерване е представена като опростен алгоритъм на фиг. 3.3-1.

Преди започване на измерванията всеки от безжичните възли се конфигурира с помощта на специализирания софтуерен продукт XCTU, чрез който се осъществява установяване на работните режими на радиовъзлите, локален и отдалечен съответно, както е описано на фиг. 3.3-1. След това се преминава към установяване на безжична мрежа по стандарт IEEE 802.11.4. След изграждане на мрежата и установяване на връзка между двата възела, възел В се поставя в първото избрано местоположение (положение $i=0$ на фиг. 3.2-2). Провежда се тест чрез изпращане на определена битова последователност между двата възела и се измерват RSSI и загубата на пакети. Резултатите от теста се записват и възелът се премества в следващото избрано местоположение.

Съгласно представената методология на измерване описана чрез алгоритъма на фиг. 3.3-1 са проведени последователни експерименти за измерване на RSSI и загубите на пакети за всяка от обличаемите антени (WTLA, LWTA и WTMA) поставени върху фантома, както и за полуълновата диполна антена в сценарий на линия на пряка видимост за два случая на ориентация на диполната антена, свързана към външния безжичен възел А:

Кополяризиращи (Co-Directed (CD)) антени - диполната антена, свързана към външния безжичен възел А, е във вертикална ориентация, както е показано на снимката на фиг. 3.2-3. Всички носими антени са ориентирани, както е показано на фиг. 3.2-1.

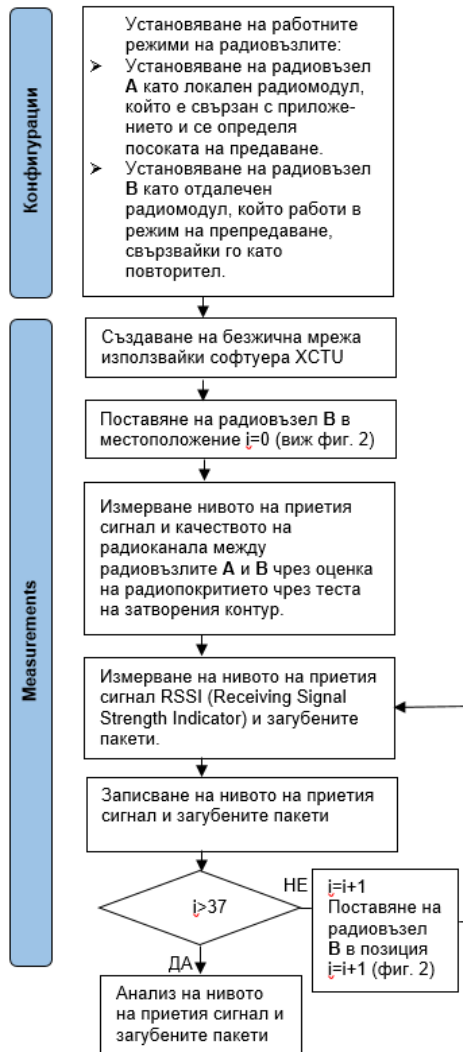
Кросполяризиращи (Cross-Directed (XD)) антени - диполната антена, свързана към външния безжичен възел А, е в хоризонтална ориентация. Всички носими антени са ориентирани, както е показано на фиг. 3.2-1.

Диполната антена, свързана към външен безжичен възел А, беше фиксирана на статив (на височина 95 cm) по време на измерванията (виж. 3.2-3). Фантомът с монтираната върху него антена се поставя в позиция $i=0$ (няма разстояние между двете антени), след което се отдалечава от диполната антена със стъпка от 12,5 cm (съответстващо на приблизително една дължина на вълната в свободното пространство при избраната честота). По време на всички експерименти външният безжичен възел А беше свързан към персонален компютър със софтуер XCTU, отговорен за програмиране, създаване и извършване на тестове за обхват.

3.4. Резултати от проведените изследвания за определяне влиянието на параметрите на обличаемите антените върху параметрите на теснолентови off-body радиоканали

3.4.1 Зависимост на RSSI от разстоянието за кополяризиращи (Co-Directed (CD)) и кросполяризиращи (Cross-Directed (XD)) антени при линия на пряка видимост (LoS)

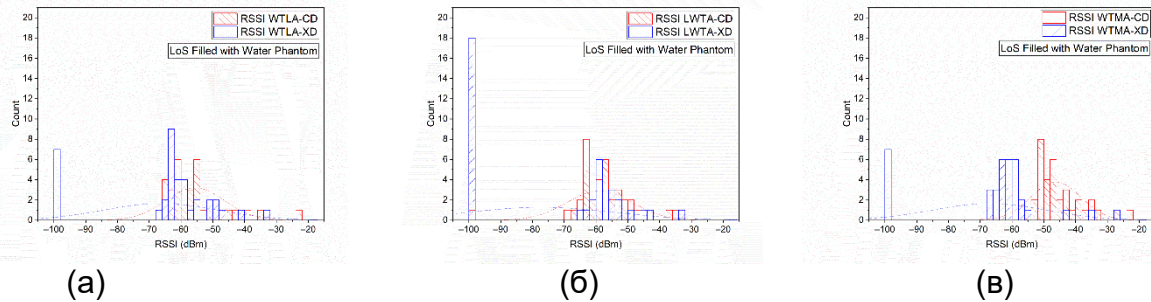
Резултатите от проведените изследвания за определяне на зависимостта на RSSI от разстоянието за кополяризиращи (CD) и кросполяризиращи (XD) антени при линия на пряка видимост (LoS), когато обличаемите антени са разположени върху хомогенен плосък фантом запълнен с дейонизирана вода са представени под формата на хистограми фиг. 3.4.1-1.



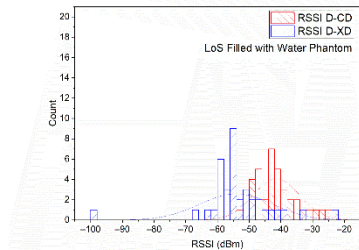
Фиг. 3.3-1 Опростен алгоритъм, представящ методологията на измерване,

В таблица 3.4.1-1 е представена статистиката за случаите на кополяризиранни (CD) и кросполяризиранни (XD) антени. Резултатите показват, че стойностите на RSSI при кополяризиранни антени в сценарии с линия на пряка видимост (LoS) за обличаемата текстилна рамкова антена (WTLA) и за обличаемата лого текстилна антена (LWTA) са много сходни. Това може да се обясни факта, че като площ двете антени са много близки. Също така и двете имат ефективност на излъчване съответно 7,7% за WTLA и 24,8% LWTA, съответно. Освен това средният RSSI за обличаемата текстилна монополна антена (WTMA) е с около 10 dB по-голям, което е свързано с по-голямата ефективност на тази антена, както и с по-голямата повърхност на антената в сравнение с останалите две обличаеми антени. От таблица 3.4-1 също може да се установи, че при кросполяризиранни антени нараства стандартната девиация в сравнение със случаите на кополяризиранни антени.

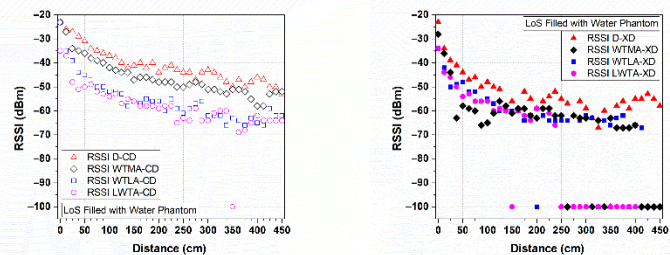
На фиг. 3.4.1-2 са представени резултатите, когато полувълновата диполна антена е поставена върху фантома. На фиг. 3.4.1-3 са представени зависимостите на RSSI във функция от разстоянието за кополяризиранни и кросполяризиранни антени, съответно.



Фиг. 3.4.1-1 Хистограми на RSSI за кополяризиран (CD) и кросполяризиран (XD) антени при линия на пряка видимост (LoS), когато обличаемите антени са разположени в центъра на хомогенен плосък фантом запълнен с дейонизирана вода: (а) обличаема текстилна рамкова антена, (б) обличаема текстилна лого антена и (в) обличаема текстилна монополна антена



Фиг. 3.4.1-2 Хистограма на RSSI случаите на кополяризиран (CD) и кросполяризиран (XD) антени при линия на пряка видимост (LoS), когато полуълновата диполна антена (D) е разположена в центъра на хомогенен плосък фантом запълнен с дейонизирана вода.



Фиг. 3.4.1-3 RSSI във функция от разстоянието за кополяризиран (CD) и кросполяризиран (XD) антени при линия на пряка видимост (LoS).

От представените резултати се вижда, че няма съществена разлика между медианата на RSSI за трите обличаеми антени WTLA, LWTA и WTMA, когато се разглеждат случаите на кросполяризация. Освен това средният RSSI за WTLA в случай на кополяризиран антени е с около 10 dB по-голям от този на кросполяризираните. Средната стойност на RSSI за WTMA и LWTA за случая на кополяризиран антени е с около 20 dB по-голяма от тази на кросполяризираните антени. Това може да се обясни с максималното усилване и диаграмата на излъчване на антените. Освен това, в off-body радиоканалите за случаите на XD антена, разпространението е главно чрез отражения и дифракция върху фантома и/или околната среда, което също води до намаляване на RSSI.

Таблица 3.4.1-1 Резултати от описателна статистика за случаите на кополяризиранни (CD) и кросполяризиранни (XD) антени

		N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
			dBm	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm
LoS Filled Phantom	RSSI D-CD	37	-41,4054	7,26659	-1532	-53	-43	-23
	RSSI D-XD	37	-54,1351	11,43378	-2003	-100	-55	-23
LoS Filled Phantom	RSSI WTLA-CD	37	-55,5946	9,23598	-2057	-66	-57	-23
	RSSI WTLA-XD	37	-66,3784	17,87666	-2456	-100	-63	-34
LoS Filled Phantom	RSSI LWTA-CD	37	-58,8919	10,20017	-2179	-100	-59	-35
	RSSI LWTA-XD	37	-77,2703	23,08517	-2859	-100	-66	-34
LoS Filled Phantom	RSSI WTMA-CD	37	-46,2162	7,84267	-1710	-58	-48	-23
	RSSI WTMA-XD	37	-67,0811	17,91396	-2482	-100	-63	-28

Освен това от фиг. 3.4.1-3 може да се види, че с увеличаване на разстоянието RSSI намалява. Може да се види, че при WTMA RSSI намалява с 20 dB, тъй като разстоянието между антените се увеличава от 0 до около 10λ в случая на CD антени. В случаите на XD антени, RSSI намалява с 20 dB, когато разстоянието между антените се промени от 0 до 2λ. За WTLA и LWTA, за случаи на CD и XD, се наблюдава намаление с 20 dB в RSSI, когато разстоянието между антените се увеличава от 0 до около 10λ. Освен това, тенденциите на RSSI кривите на off-body радиоканалите, формиращи се с помощта на антени WTLA и LWTA, са много сходни, независимо от ориентацията на антените.

От резултатите можем да заключим, че повърхността, ефективността на излъчване и диаграмата на излъчване на обличаемата антена играят съществена роля при определянето на характеристиките на off-body канала при LoS.

3.4.2 Зависимост на RSSI от разстоянието за кополяризиранни (Co-Directed (CD)) и кросполяризиранни (Cross-Directed (XD)) антени при линия на непряка видимост (NLoS)

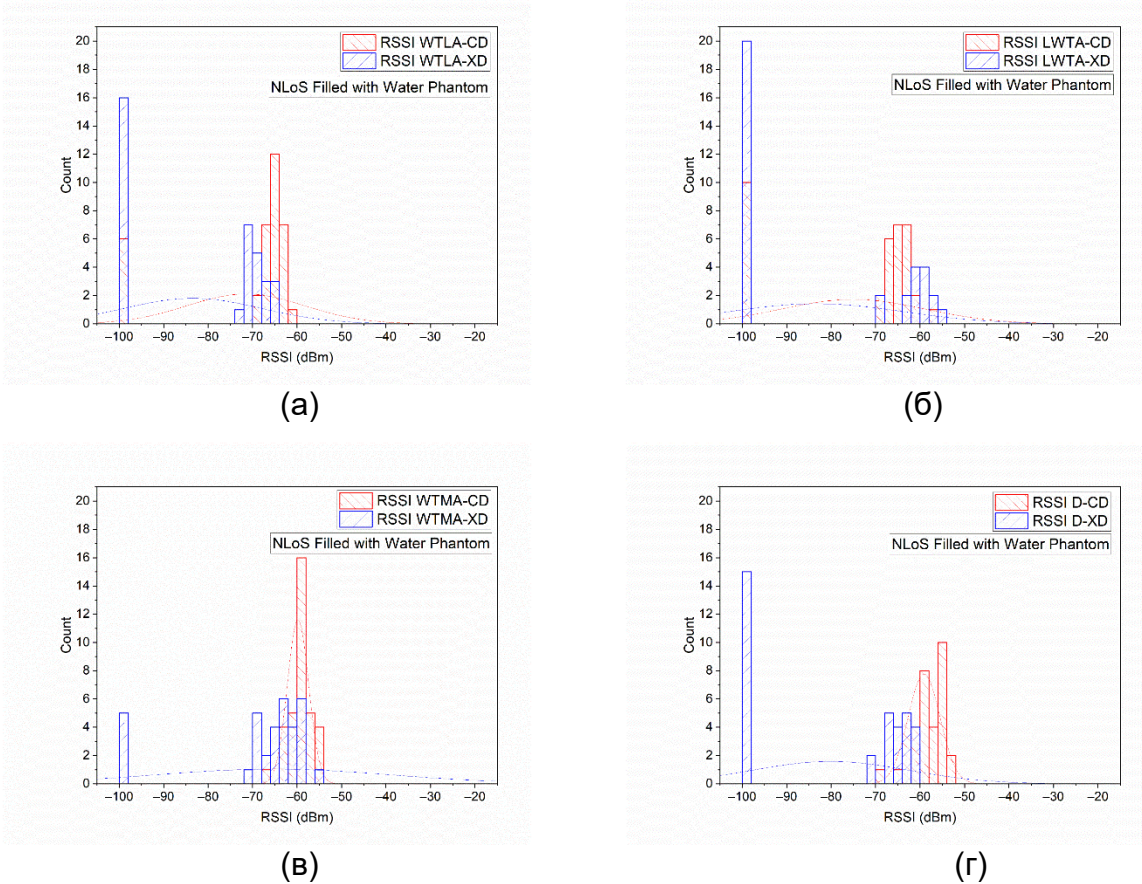
Резултатите от проведените изследвания за определяне на зависимостта на RSSI от разстоянието за кополяризиранни (CD) и кросполяризиранни (XD) антени при линия на непряка видимост (NLoS), когато обличаемите антени са разположени върху хомогенен плосък фантом запълнен с дейонизирана вода са представени под формата на хистограми фиг. 3.4.2-1. На същата фигура са представени резултатите и за диполната антена.

На фиг. 3.4.2-2 са представени зависимостите на RSSI във функция от разстоянието за кополяризиранни и кросполяризиранни антени, съответно. В таблица 3.4.2-1 е представена статистиката за случаи на кополяризиранни (CD) и кросполяризиранни (XD) антени.

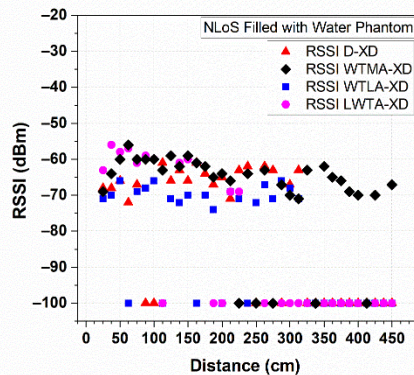
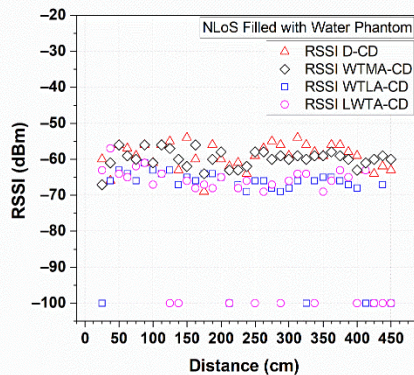
Сравнявайки резултатите представени на фигури 3.4.1-1, 3.4.1-2 (LoS) и 3.4.2-1 (NLoS) очаквано при всички антени за линия на непряка видимост максималните измерени стойности на RSSI намаляват приблизително с 25 dB. Средната стойност на RSSI при кополяризиранни антени в сценарий на пряка видимост намалява най-отчетливо с 18 dB при диполна антена, 16 dB за две от

Таблица 3.4.2-1 Резултати от описателна статистика за случаите на кополяризираны (CD) и кросполяризираны (XD) антены

		N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
			dBm	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm
NLoS Filled Phantom	RSSI D-CD	35	-59,1143	3,59552	-2069	-69	-59	-54
	RSSI D-XD	35	-80,1429	17,60204	-2805	-100	-68	-61
NLoS Filled Phantom	RSSI WTLA-CD	35	-71,5429	13,24729	-2504	-100	-66	-61
	RSSI WTLA-XD	35	-83,4857	15,46414	-2922	-100	-72	-66
NLoS Filled Phantom	RSSI LWTA-CD	35	-75,0571	16,16995	-2627	-100	-67	-57
	RSSI LWTA-XD	35	-83,4	19,59922	-2919	-100	-100	-56
NLoS Filled Phantom	RSSI WTMA-CD	35	-59,8	2,41076	-2093	-67	-60	-56
	RSSI WTMA-XD	35	-65,4	26,7188	-2289	-100	-64	68



Фиг. 3.4.2-1 Хистограми на RSSI за кополяризираны (CD) и кросполяризираны (XD) антены при линия на непряка видимость (NLoS), когато обличаемите антены са разположена в центъра на хомогенен плосък фантом запълнен с дейонизирана вода: (а) обличаема текстилна рамкова антена, (б) обличаема текстилна лого антена (в) обличаема текстилна монополна антена и (д) полувълнова диполна антена.



Фиг. 3.4.2-2 RSSI във функция от разстоянието за кополяризирани (CD) и кросполяризирани (XD) антени при линия на пряка видимост (LoS).

обличаемите антени (WTLA и LWTA) и най-слабо с 13 dB за WTMA. Сравнявайки средните стойности на RSSI при линия на пряка видимост с тези на непряка видимост за случаите на кросполяризация, се наблюдава следната зависимост – средната стойност на RSSI на диполната антена намалява приблизително с 26 dB от -54,14 dBm до -80,14 dBm. При WTLA изменението е с 16 dB, докато при LTWA то е с 6 dB. При WTMA разликата в средните стойности на RSSI за случаите на пряка видимост и непряка видимост при кросполяризираните антени е само 2 dB.

От резултатите може да се заключи, че обличаемите антени с по-голяма ефективност (респективно по-голяма площ) са по-подходящи за комуникации при непряка видимост, тъй като почти не изменят параметрите на off-body радиоканала. Каноничните антени не са подходящи за изграждане на комуникации в линия на непряка видимост и кросполяризираните антени, тъй като при тях измененията на средната стойност на RSSI са повече от 25 dB.

3.4.3 Зависимост на RSSI от разстоянието за кополяризирани (Co-Directed (CD)) и кросполяризирани (Cross-Directed (XD)) антени при преминаване от линия на пряка към частично пряка и от непряка видимост към частично пряка

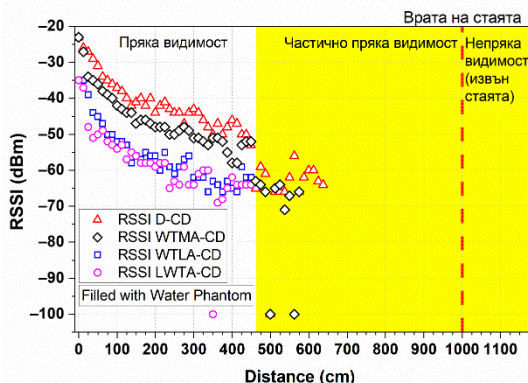
Резултатите от проведените изследвания за определяне на зависимостта на RSSI от разстоянието за кополяризирани (CD) и кросполяризирани (XD) антени при линия на пряка видимост, частично пряка видимост и непряка видимост, когато обличаемите антени са разположени върху хомогенен плосък фантом запълнен с дейонизирана вода като и двете антени са насочени една към друга са представени фиг. 3.4.3-1 и 3.4.3-2.

На фиг. 3.4.3-3 и 3.4.3-4 са представени зависимостите на RSSI във функция от разстоянието за кополяризираните и кросполяризираните антени, съответно в случаите на преминаване от непряка видимост, частично пряка видимост и непряка видимост.

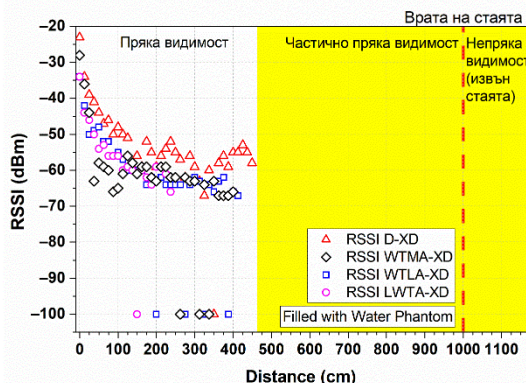
От фигура 3.4.3-1 се вижда, че за всички изследвани антени нивото на RSSI намалява с увеличаване на разстоянието. Очаквано, нивото при частично пряка видимост е по-малко спрямо това при пряка видимост, тъй като в този случай върху загубите в радиоканала ефект оказва, както разстоянието, така и засенчването от фантома.

При преминаване от непряка към частично пряка видимост (фигура 3.4.3-3) не се наблюдават съществени изменения в нивото на сигнала в радиоканала, тъй

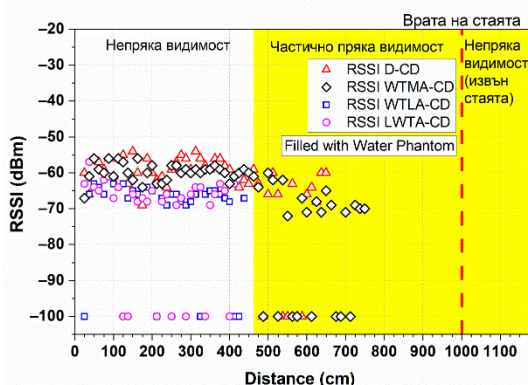
като в двата случая се разчита основно на многократни отражения от стените и предметите в затвореното пространство.



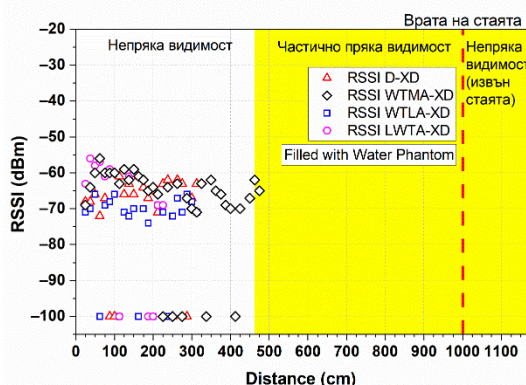
Фиг. 3.4.3-1 RSSI във функция от разстоянието за кополяризирани (CD) антени при последователно преминаване от линия на пряка видимост към линия на частично пряка видимост.



Фиг. 3.4.3-2 RSSI във функция от разстоянието за кросполяризирани (XD) антени при последователно преминаване от линия на пряка видимост към линия на частично пряка видимост.



Фиг. 3.4.3-3 RSSI във функция от разстоянието за кополяризирани (CD) антени при последователно преминаване от линия на непряка видимост към линия на частично пряка видимост.



Фиг. 3.4.3-4 RSSI във функция от разстоянието за кросполяризирани (XD) антени при последователно преминаване от линия на непряка видимост към линия на частично пряка видимост.

НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. Предложен е нов метод за комплексно характеризиране на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек, отчита влиянието на всеки един от елементи на радиоканала, такива като параметри и характеристики на обличаемите антени, влиянието на човешкото тяло, ориентацията на тялото в изследваната заобикаляща среда, както и условия на разпространение, т.е. линия на пряка видимост, на частично пряка видимост и на непряка видимост.

НАУЧНО ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

2. Предложен е нов подход за изследване на загубите при разпространение в радиоканала, чрез който се подобрява характеризиранието на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек при прилагане на емпиричния метод.

3. На основата на предложени нов метод за комплексно характеризиранието на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек е разработен алгоритъм на методологията на провеждане на измервания.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. На основата на предложени нов подход е предложена и разработена постановка за изследване на загубите при разпространение в статични и динамични off-body радиоканали чрез емпиричния метод, включително и при използването на различни обличаеми антени.

2. На основата на предложени нов метод за комплексно характеризиранието на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек е разработена постановка за провеждане на симулационни и експериментални изследвания.

3. Посредством експериментални изследвания е апробиран новопредложения метод за комплексно характеризиранието на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек, като е определено влиянието на отделните елементи на радиоканала.

4. Оценено е влиянието на обличаемите антени като елемент на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек, като е установено, че ефективността на излъчване, диаграмата на насочено действие и поляризацията на обличаемата антена играят съществена роля при определянето на характеристиките на off-body радиоканала.

5. Оценено е влиянието на човешкото тяло като елемент на теснолентови off-body радиоканали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек и е установено, че то има значителен ефект върху загубите при разпространение.

СПИСЪК С ПУБЛИКАЦИИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

A1. Д. Давидков, Г. Атанасова, Изследване на канали в безжични мрежи ориентирани около тялото на човек предназначени за медицински цели, XXVIII Международна научна конференция за млади учени, 24 и 25 септември 2020 г., Благоевград, България.

A2. Д. Давидков, Безжични технологии приложими при мрежи около човешкото тяло, XXIX Международна научна конференция за млади учени, 13 и 14 юни 2019 г., Благоевград, България.

A3. D. Davidkov, G. Atanasova and N. Atanasov, "Characterization of Narrowband Off-Body Channels in an Indoor Environment for Body Area Network Applications," 2022 30th National Conference with International Participation (TELECOM), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELECOM56127.2022.10017318.

A4. Д. Давидков, Изследване върху характеристиките на две диполни антени в off-body BAN, XXXI Международна научна конференция за млади учени, 6 и 7 октомври 2022 г., Благоевград, България.

SUMMARY

Research and Modeling of Channels in Wireless Body Area Networks,

David Rumenov Davidkov, M. Sc.

Abstract of Ph.D. Thesis

Today, statistical studies show that wireless networks and the Internet of Things (IoT) are growing exponentially, and the use of wearable electronics and body-worn sensors/devices. There is not only an increase in the number of wearable devices but also an increase, in the types of devices, as well as their functionality. That leads to the emergence of a new subclass of networks to wireless personal networks, namely wireless networks oriented around a person's body.

Wireless body area networks are communication systems that enable information exchange between wearable, implanted, and/or external devices [1, 2], called nodes. These nodes allow measurements of a person's physiological parameters or other data from the surrounding environment and data transmission to a remote server if necessary [2]. Nodes placed inside the body are usually called implants, and those on the body are called wearables. These communication systems find applications in various fields telemedicine and e-health (for example, monitoring and transmission of physiological data for a specific patient), through sports (for instance, monitoring the physical condition of athletes when performing certain activities) to applications related to rescue or military operations (for data file transfer, video/audio streaming, etc.).

The design of a wireless body area network, like any other wireless system, is preceded by a thorough analysis of the radio channels in the desired frequency range, environment and scenario, taking into account the stringent requirements for the transceivers and antennas, the visibility of the antennas and user mobility. In addition, in wireless body area networks, electromagnetic waves propagate either as surface waves or by diffraction, and due to the complexity and structure of human tissues and body shape, the complexity of radio channel research increases. For this reason, there is a constant need to develop and research new radio channel models for new types of human body-oriented wireless networks operating in new frequency ranges and/or for new types of environments.