



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Електротехника и електроника”

инж. Михаил Георгиос Ангелакис

МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА ИНТЕЛИГЕНТЕН МОНИТОРИНГ И КОНТРОЛ НА РАДИОКАНАЛИ В БЕЗЖИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3 Комуникационна и компютърна техника

Докторска програма: „Комуникационни мрежи и системи“

Габрово, 2026 г.



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „Електротехника и електроника”

инж. Михаил Георгиос Ангелакис

МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА ИНТЕЛИГЕНТЕН МОНИТОРИНГ И КОНТРОЛ НА РАДИОКАНАЛИ В БЕЗЖИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3 Комуникационна и компютърна техника

Докторска програма: „Комуникационни мрежи и системи“

Научен ръководител: проф. д-р инж. Красен Киров Ангелов

Рецензенти: проф. д-р инж. Росен Иванов Пасарелски

проф. д-р инж. Станимир Михайлов Садинов

Габрово, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Комуникационна техника и технологии” към факултет „Електротехника и електроника” на Технически университет – Габрово, проведен на 03.07.2026 г.

Дисертационният труд съдържа 126 страници. Научното съдържание е представено в увод, четири глави и заключение, и включва 64 фигури, 21 таблици и 14 формули. Цитирани са 95 литературни източника. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Разработката на дисертационния труд е извършена в катедра „Комуникационна техника и технологии” към факултет „Електротехника и електроника” на Технически университет – Габрово.

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на 10.09.2026 г. от 13:00 ч. в зала 2215, сграда Учебен корпус №2 „Баждар“ на Технически университет – Габрово.

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

Рецензиите и становищата на членовете на научното жури и авторефератът са публикувани на сайта на университета: www.tugab.bg.

Автор: © Михаил Георгиос Ангелакис

Заглавие Методи и средства за интелигентен мониторинг и контрол на радиоканали в безжични комуникационни мрежи

Тираж: 5 бр. (Бълг. език)

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

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Актуалността на темата се обуславя от няколко ключови фактора, дефиниращи развитието на комуникационните технологии през последните години:

- пренаселеност на честотния спектър – използването на нелицензираните честотни ленти (2.4 GHz, 5 GHz и новоотворената 6 GHz) води до сериозна интерференция (взаимни смущения) между устройствата.
- хетерогенност на мрежите: в едно и също физическо пространство функционират едновременно десетки различни технологии, които се конкурират за ресурсите на етера.
- строги изисквания за латентност и пропускателна способност – редица съвременни критични приложения изискват закъснение под 1 милисекунда и надеждност на връзката над 99.999%.
- динамика на средата – физическите препятствия, многолъчевото разпространение на сигналите, затихването и ефектът на Доплер при мобилни обекти непрекъснато променят характеристиките на радиоканала в реално време.

Настоящият дисертационен труд анализира основните методи и предлага синтез на модели, приложение на интелигентни механизми и практически ориентирани средства и подходи за мониторинг, контрол и решаване на оптимизационни задачи при управлението на радиоканали и осигуряването на QoS в безжичните комуникационни мрежи.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е да се разработят и изследват подходящи методи и средства за интелигентен мониторинг и контрол в реално време на процесите за надеждно и ефективно предаване и приемане на безжични радиосигнали, както и интегрирана интелигентна обработка за потискане на смущенията чрез следене на динамичното състояние на безжичния канал за връзка в безжичните комуникационни мрежи.

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

1. Създаване и описание на методология за моделиране и изследване на процесите на обработка, надеждно и ефективно предаване и приемане на безжични радиосигнали и реакция на влиянието на динамичното състояние на безжичния канал за връзка в безжичните комуникационни мрежи.
2. Синтезиране и разработка на симулационни модели на безжичен канал за връзка с интегриран интелигентен алгоритъм за потискане на смущенията и за изследване на влиянието им върху ефективността на безжичните комуникационни мрежи.

3. Извършване на изследване на параметрите на безжични комуникационни мрежи и на възможностите за подобряване на качеството на предаваната информация, надеждността, ефективността и обхвата на мрежата чрез интелигентен мониторинг и контрол.
4. Разработка и изследване на практически експериментален модел на иновативна универсална система за интелигентен мониторинг и контрол на радиоканали в безжични комуникационни мрежи.

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

Научна новост

Научната новост в дисертационния труд може да бъде сведена до следните по-съществени приноси:

1. Синтез на комплексна методология за многокритериален анализ и оценка на състоянието на безжичните радиоканали и архитектурен модел за проактивен мониторинг на безжични мрежи, базиран на ефективното съвместяване на стандартни телеметрични протоколи с алгоритми за динамично следене на параметрите в разнородна хардуерна инфраструктура.
2. Разработка и изследване на иновативен модел на безжичен канал за връзка с интегриран интелигентен алгоритъм за потискане на шума и смущенията чрез прилагане на специализиран обучим модул за филтрация и прецизно реконструиране на CSI при прогнозиране на канала.
3. Разработка, реализация и експериментално верифициране в реална среда на специализирана платформа за интелигентен мониторинг, осигуряваща надеждно събиране и обработка на данни в реално време за състоянието на безжичната инфраструктура и проактивна реакция чрез автоматизация на процесите на сигнализация, управление на събития и локализиране на проблеми в радиоканала на безжичните комуникационни мрежи.

Приложимост

Приложимостта на дисертационния труд е свързана със създаване на методологии от процедури, свързани с правилни подходи при моделиране, избор и реализация на архитектура, необходимо оборудване и правилно конфигуриране и прилагане на интелигентен мониторинг, контрол и оценка на параметрите на сигналите в безжичните комуникационни

каналы, което ще осигури подобряване на надеждността, ефективността и качеството на услугите в безжичните комуникационни мрежи.

Апробация на дисертационния труд

Основните етапи от разработване на дисертационния труд са представени в осем публикации на международни конференции и научни издания, напълно покриващи минималните изисквания относно разглеждания критерий. Два от трудовете са изнесени на международна научна конференция UNITECH (2022 г. и 2025 г.), четири от трудовете са изнесени на национална конференция TechCo (2024 г. и 2025 г.) и два от трудовете – на Студентка научна сесия на ТУ – Габрово (2024 г.). Две от публикациите са самостоятелни. Публикациите са издадени в сборници с научно рецензиране в периода на обучение 2022-2025 г., като реално представят близо 2/3 от съдържанието на дисертационния труд. В публикациите са представени голяма част от извършените изследвания и са изложени основните изводи от дисертационния труд.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд включва увод, четири глави, заключение, списък на използваните съкращения, списък на публикациите по дисертационния труд и списък на използваната литература. Общият обем е изготвен в общ обем от 126 страници и включва 64 фигури, 21 таблици и 14 формули. Цитирани са 95 литературни източника.

II. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. СЪВРЕМЕННО СЪСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМИ ПРИ ОСИГУРЯВАНЕТО НА МОНИТОРИНГ И КОНТРОЛ В БЕЗЖИЧНИТЕ КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ

За разлика от кабелните преносни среди, радиосредата е силно динамична, непредсказуема и споделена по своята същност. Това изисква разработването и внедряването на съвременни методи и инструменти за постоянно наблюдение на радиоканалите в безжичните комуникационни системи, за да се гарантира стабилност, сигурност и необходимото качество на обслужване (QoS).

Проектирането и експлоатацията на тези системи са изправени пред безпрецедентни предизвикателства, причинени от експоненциалния растеж на броя на свързаните устройства, хетерогенния характер на трафика и критичните изисквания за ултра ниска латентност и висока надеждност.

Основните проблеми при осигуряването на мониторинг и контрол в съвременните безжични компютърни мрежи са свързани с:

- техническите особености в IEEE 802.11 набора от стандарти за безжични компютърни мрежи;
- осигуряването на сигурността в безжичните компютърни мрежи;
- регулаторните ограничения и стандарти, свързани с използваните честоти и предаваната мощност в безжичните комуникации;
- смущенията и интерференцията в радиочестотния спектър, използван от безжичните компютърни мрежи;
- предизвикателства при проектирането на широкообхватни безжични мрежи от точка до много точки (P2MP).

1.6. Анализ и изводи към Глава 1

Съвременната дигитална инфраструктура в голяма степен разчита на безжичните компютърни комуникационни мрежи. С навлизането на стандарти като Wi-Fi 7 (802.11be), петото и шестото поколение мобилни мрежи (5G/6G), както и мащабните архитектури на Интернет на нещата (IoT и Industrial IoT), радиоканалът се превръща в критична и същевременно най-уязвима точка от комуникационната среда.

За разлика от кабелните преносни среди, радиотехническата среда е силно динамична, непредсказуема и споделена. Необходимо е разработването и внедряването на съвременни методи и средства за постоянен мониторинг на радиоканалите, които да гарантират устойчивост, сигурност и необходимото качество на обслужване (QoS - Quality of Service). Това ще осигури реакция и противодействие на основните ограничаващи фактори в безжичните комуникационни

технологии: претоварване на честотния спектър, хетерогенност на мрежата, строги изисквания за латентност и пропускателна способност, както и динамика на околната среда.

Мониторингът на радиоканалите не е спомагателна функция, а фундаментална част от управлението на съвременните безжични мрежи в три основни области: оптимизация на мрежовите ресурси и управление на спектъра, проактивно откриване на повреди и противодействие срещу злонамерени действия. Тя може се дефинира в три основни направления:

1) Оптимизация на мрежовия ресурс и управление на спектъра

Без детайлна информация за състоянието на радиочестотния спектър е невъзможно ефективното динамично разпределение на честотните канали (Dynamic Frequency Selection - DFS) и управлението на излъчената мощност. Мониторингът позволява откриването на "мъртви зони" и зони с висока интерференция, което помага за правилното позициониране на точките за достъп (APs).

2) Проактивно откриване на неизправности (Fault Detection)

Чрез постоянен анализ на параметрите на сигнала мрежовите администратори и автоматизираните системи могат да предвидят влошаването на връзката преди то да е довело до прекъсване на сесиите на потребителите.

3) Киберсигурност и противодействие на атаки

Радиоканалът е отворена среда, което го прави лесна мишена за злонамерени действия. Мониторингът е ключов за идентифициране на:

- За заглушаване на сигнала (Jamming): умишлено генериране на шум с цел прекъсване на комуникацията.
- Нелегитимни точки за достъп (Rogue APs): нападатели, имитиращи легитимна мрежа с цел кражба на данни (атаки от типа Man-in-the-Middle).

Интелигентните методи за мониторинг може да разчитат на софтуерно-информационни подходи и да бъдат:

- пасивни – базирани на следене и анализ на радиочестотния спектър и оценка на качествени показатели като RSSI и SNR
- активни – базирани на генериране на тестов трафик и измерване и оценка на качествени показатели като RTT, BER, пропускателна способност и др.

При пасивните методи (Passive Monitoring) не се генерира допълнителен трафик в мрежата. Устройствата за мониторинг ("скенери" или самите мрежови контролери) работят в режим на "слушане" (promiscuous mode или monitor mode) и извършват:

- измерване на енергийните параметри – следене на нивата на RSSI (Received Signal Strength Indicator) и Noise Floor (ниво на шума);
- изчисляване на качествени метрики – математическо определяне на съотношението сигнал/шум;

- анализ на CSI (Channel State Information) – съвременен метод, който дава информация за това как сигналът се разпространява по всяка отделна подносеща честота при MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) системите.

При Активните методи (Active Monitoring) в радиоканала се инжектира контролиран тестов трафик за оценка на реалното поведение на мрежата чрез:

- измерване на закъснението (Latency & Jitter) – изпращане на ICMP пакети или специализирани UDP потоци за оценка на времето за двупосочно пътуване (RTT);
- оценка на загубите – следене на процента изгубени пакети (Packet Loss Rate) и честотата на грешки в битовете (BER - Bit Error Rate).

Интелигентните методи за наблюдение трябва да се основават на хибридни хардуерно- и софтуерно-информационни подходи и могат да бъдат пасивни или активни: специализирани спектрални анализатори; софтуерно дефинирано радио (SDR - Software Defined Radio) с цифрова обработка на сигналите и софтуерно конфигуриране на честотния диапазон; специализирани хардуерни сензори; пакетоанализатори (Sniffers), които прихващат радиокадри (802.11 frames) и позволяват детайлен разбор на заглавните части (RadioTap headers) за извличане на физическите параметри на връзката; системи за Wi-Fi планиране и анализ за визуализация на покритието и нивата на интерференция в триизмерното пространство; централизирани системи за управление, които интегрират вграден мониторинг, базиран на облачни технологии, който автоматично регулира параметрите на мрежата при влошаване на радиоканала.

Интеграцията на софтуерно дефинирано радио с алгоритми с изкуствен интелект очертава посоката на развитие в тази област - преминаване от реактивно наблюдение (отстраняване на вече възникнали проблеми) към проактивно, самообучаващо се и адаптивно управление на безжичния ресурс.

1.7. Цел и задачи на дисертационния труд

Същността на една безжична комуникационна мрежа се състои в това да осигурява необходимата широколентова свързаност до крайните устройства чрез надеждно и сигурно предаване на радиосигнали в безжичния канал за връзка, като това може да се постигне чрез ефективна обработка на сигналите (кодиране и криптиране на източника и на канала), оптимално балансиране на качествените показатели и ефективна оценка на канала за връзка.

Предвид анализираното в Глава 1 състояние и проблеми в безжичните комуникационни мрежи, с настоящия дисертационен труд се поставя за цел да се разработят и изследват подходящи методи и средства за интелигентен мониторинг и контрол в реално време на процесите за

надеждно и ефективно предаване и приемане на безжични радиосигнали, както и интегрирана интелигентна обработка за потискане на смущенията чрез следене на динамичното състояние на безжичния канал за връзка в безжичните комуникационни мрежи.

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

1. Създаване и описание на методология за моделиране и изследване на процесите на обработка, надеждно и ефективно предаване и приемане на безжични радиосигнали и реакция на влиянието на динамичното състояние на безжичния канал за връзка в безжичните комуникационни мрежи.
2. Синтезиране и разработка на симулационни модели на безжичен канал за връзка с интегриран интелигентен алгоритъм за потискане на смущенията и за изследване на влиянието им върху ефективността на безжичните комуникационни мрежи.
3. Извършване на изследване на параметрите на безжични комуникационни мрежи и на възможностите за подобряване на качеството на предаваната информация, надеждността, ефективността и обхвата на мрежата чрез интелигентен мониторинг и контрол.
4. Разработка и изследване на практически експериментален модел на иновативна универсална система за интелигентен мониторинг и контрол на радиоканали в безжични комуникационни мрежи.

ГЛАВА 2. ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА ПОДХОДИ ЗА МОДЕЛИРАНЕ, АНАЛИЗ И КОНТРОЛ НА БЕЗЖИЧНИ РАДИОКАНАЛИ

2.1. Анализ на затихванията и смущенията на сигнала в безжичните радиоканали

Загубите при разпространение преди всичко зависят от загубите на сигнала в свободното пространство.

В градска среда с високи сгради сигналът, излъчен от предавателната антена, ще се разпространява главно чрез ефекта на каньона, а не над сградите. В резултат на такъв тип разпространение се получава т. н. ъглов ефект, което представлява увеличаване на затихването на сигнала с около 20 dB, когато приемната станция е разположена в засенчване (например зад ъгъл на улицата) спрямо предавателната антена.

В резултат на тези ефекти се получава промяна на формата на зоната на покритие, защото мощността на сигнала в напречните улици се определя главно от дифракцията (ъглов ефект), докато в надлъжните улици – надлъжното отражение на уличния каньон.

Моделите с ъглов ефект се основават или на геометричната теория на дифракцията (GTD), или на общата теория на дифракцията (UTD).

Главна причина за възникване на краткотрайното затихване е многопътното разпространение на сигналите, при което сигналите пристигат в мястото на приемаме по различно дълги пътища (следователно с различна фаза). Поради това краткотрайното затихване често се нарича многопътно затихване. В следствие на многопътното разпространение на сигналите се получава времева дисперсия (разсейване), която се проявява като разтягане на сигнала във времето. Времевата дисперсия практически се проявява във времевата област като разширение на сигнала от закъснение (времево разширение), а в честотната област като кохерентна ширина на лентата.

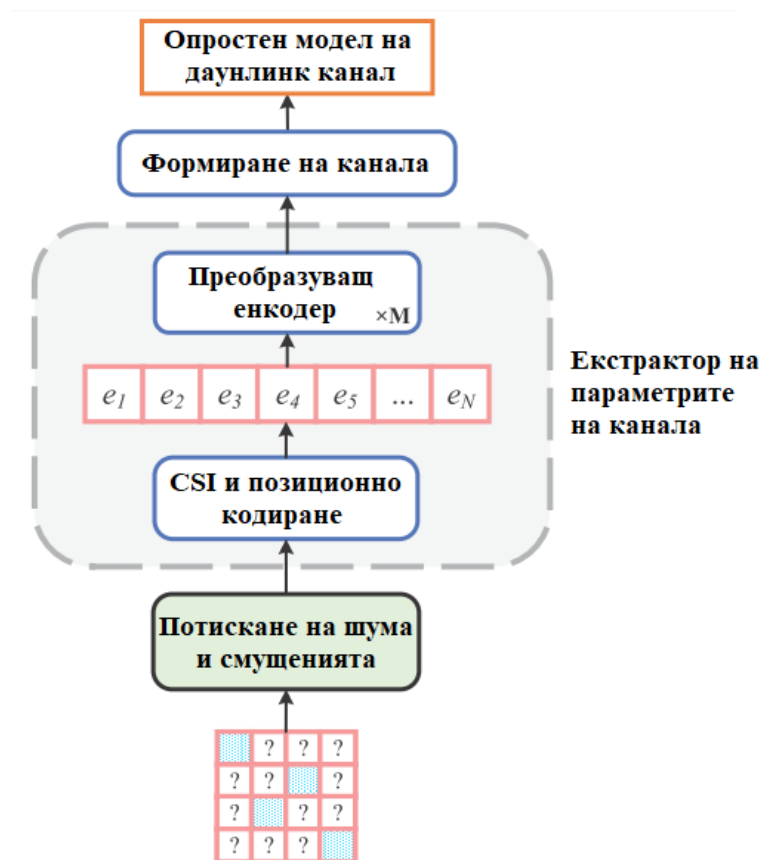
2.2. Разработка и изследване на модел на безжичен канал за връзка с интегриран интелигентен алгоритъм за потискане на смущенията

Изпълнението на редицата изисквания по отношение на надеждността, забавянето и пропускателната способност в съвременните безжични мрежи, зависи до голяма степен от наличието на точни познания за състоянието на безжичния канал за връзка. Получаването на информация за състоянието на канала (CSI – Channel State Information) може да изисква обмяна на голям обем от служебна информация в бъдещите мрежи поради използването на множество антени, по-широки честотни ленти и високата мобилност на потребителските устройства.

За справяне с гореспоменатите предизвикателства се разглежда приложението и изследването на архитектура на модел за безжични канали с вградена възможност за потискане на шума и смущенията (NI – Noise & Interference). В представения дизайн, грубите оценки на каналите първо се получават с помощта на класически алгоритми, като например метода на най-малките квадрати (LS), след което се прилагат два проекционни модула за извличане на NI компонентите съответно в подпространството на канала и неговото ортогонално подпространство. След това се използва мрежа за оценка на NI, който ще бъде допълнително изваден от получените сигнали. Накрая се използва мрежа за прецизиране и допълване на канала, за да се формира по-чиста версия на оценката на канала, която се подава в екстрактор на параметрите на канала, за да се получи представянето на канала. Модулът за потискане на NI може да бъде обучен независимо или съвместно с екстрактора на параметрите на гръбначната мрежа. И в двата случая, изходните представяния на каналите са в състояние да отразяват характеристиките на безжичните канали поточно. Моделът на безжични канали с използваната структура за потискане на NI постига подобрена производителност в сравнение със задачата за прогнозиране на канали.

2.2.1. Структура на системния модел безжичен канал с интегриран алгоритъм за потискане на шума и смущенията

Както е показано на фиг. 2.3, разглежда се модел на безжична мрежа, който се състои от модул за потискане на NI , модул за CSI корекция и позиционно кодиране и няколко блока на преобразуващ енкодер. Модулът за потискане на NI се използва за получаване на чиста стойност на оценените CSI от пилотните сигнали и съответните им приети сигнали. Предаването на пилотните сигнали може да бъде подложено на силни смущения и шумове в канала, което води до изкривяване на приетия сигнал. Модулът за CSI корекция и позиционно кодиране кодира CSI семплите в порции, които се обработват допълнително от блокове на преобразуващия енкодер. Той откриват присъщите взаимовръзки и контекстуални модели в данните и извеждат универсално представяне на канала, което е подходящо за различни задачи в даунлинк канала.



Фиг. 2.3. Модел на безжичен канал със структура за потискане на шума и смущенията

Разглежда се MIMO-OFDM комуникационна система с N предавателни антени и M приемачи антени. Всеки слот се състои от L OFDM символа, като всеки от тях съдържа K подносещи честоти.

Въз основа на известните пилотни сигнали и свързаните с тях получени еквиваленти, първо се прилага LS алгоритъмът, за да се формира първоначална оценка на CSI върху пилотните сигнали. След това се изгражда мрежа за прецизиране на CSI, за да се генерират CSI във всички

сигнали. С контролирано обучение, мрежата за прецизиране на CSI е в състояние да предложи имплицитна способност за потискане на NI, като по този начин се благоприятства последващата обработка.

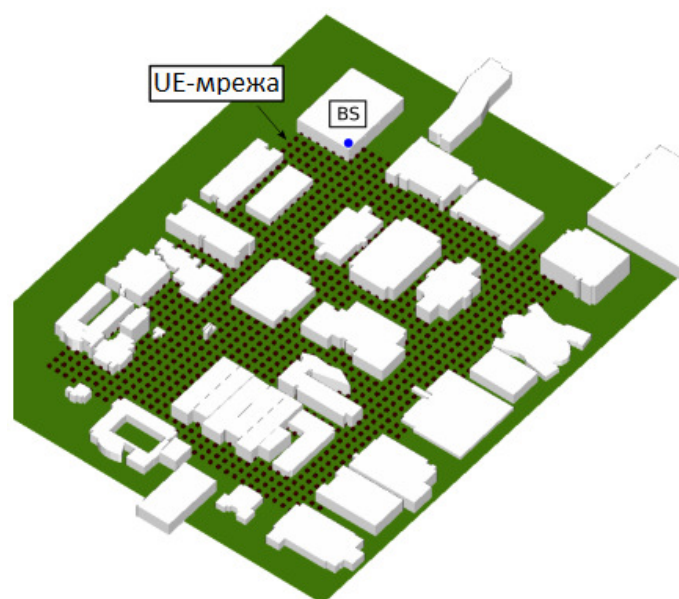
За да се възстанови NI по-точно, се въвежда мрежа за оценка на NI. Тази мрежата използва като входни параметри системната стойност на SINR и NI.

В модела за потискане на NI, мрежата за прецизиране на CSI, мрежата за оценка на NI и SINR изчислителния модул са обучими модули. Мрежата за прецизиране на CSI и SINR изчислителния модул се обучават с помощта на стандартни контролирани методи с нормализирана средноквадратична грешка (NMSE). Мрежата за оценка на NI се обучава на два етапа. В първата стъпка мрежата за оценка на NI се обучава с помощта на маркиран NI, следвайки контролиран метод за обучение, за да се минимизира NMSE. След като мрежата за оценка на NI е обучена в продължение на няколко кръга, този модул ще бъде обучен съвместно с мрежата за CSI, за да се минимизира грешката при реконструкция на CSI върху всички RE.

2.2.2. Конфигуриране на симулационен модел на безжичен канал за връзка с интегриран интелигентен алгоритъм за потискане на смущенията

За създаване на CSI набор от данни както за обучение, така и за оценка, е използван генераторът на безжични канали с отворен код DeerpMIMO. Използват се данни, събрани от сценарии на хипотетична зона на покритие, за да се обучи и оцени модела.

На фиг. 2.5 е показан сценарий, в който „BS“ е базовата станция, а потребителските устройства са разпределени в областта „UE мрежа“ (т.е. мрежа от потребителските устройства).



Фиг. 2.5. Сценарий за оценка в хипотетична зона на покритие

За да се оцени конкретно приносът на модула за потискане на NI, екстракторът на характеристики на канала не е обучен. Вместо това се използват директно параметрите от предварително обучена LWM (Large Wireless Model). Това гарантира, че подобрението в производителността идва от модула за потискане на NI, а не от ефектите на преобучение.

Разглежда се задача за прогнозиране на канали, която има за цел да предскаже CSI върху съседни подносещи честоти въз основа на съществуващия CSI. За сравнение е реализирано симулационно изследване с четири конкуриращи се решения, избрани като еталони:

- 1) LS плюс линейна интерполация (LI) (LS+LI): при този подход, LS оценката на канали се прилага първо за оценка на CSI върху RE, които носят пилотни сигнали, а след това се използва алгоритъм за линейна интерполация за получаване на пълните CSI за всички RE.
- 2) LMMSE: използва се за възстановяване на CSI на всички RE. Това е широко възприет подход в 5G BS и UE.
- 3) Метод, базиран на преобразуване: при този метод, LS алгоритъмът първо се използва за оценка на канала, за да се получат CSI за пилотните RE, след което се разгръща мрежа, базирана на преобразуване, за да се възстанови пълният CSI за всички RE.
- 4) Перфектен CSI: това съответства на идеален случай, при който CSI за пилотните RE са перфектно известни. Този случай се използва за демонстриране на горната граница на производителността.

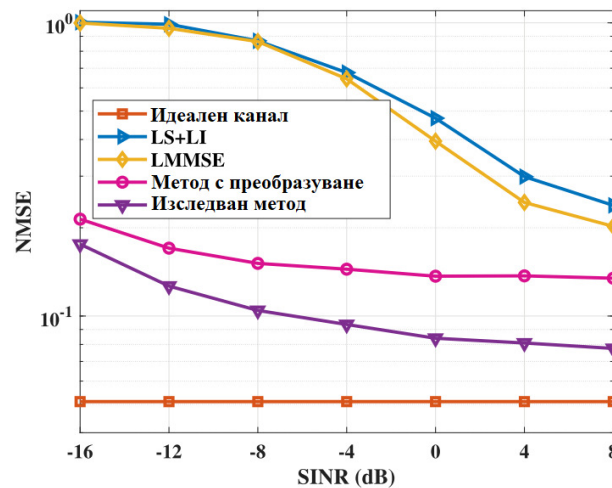
За всички гореспоменати сравнителни изследвания и предложената схема, входните данни са едни и същи, а изходните данни са възстановените CSI за всички RE за всеки слот. Тези изходни данни се подават към екстрактора на характеристики на канала, за да се получи универсално представяне на CSI, което се обработва допълнително от олекотен ResNet модел, за да се получат крайните резултати от прогнозирането на канала.

2.2.3. Изследване и анализ на модел на безжичен канал за връзка с интегриран интелигентен алгоритъм за потискане на смущенията

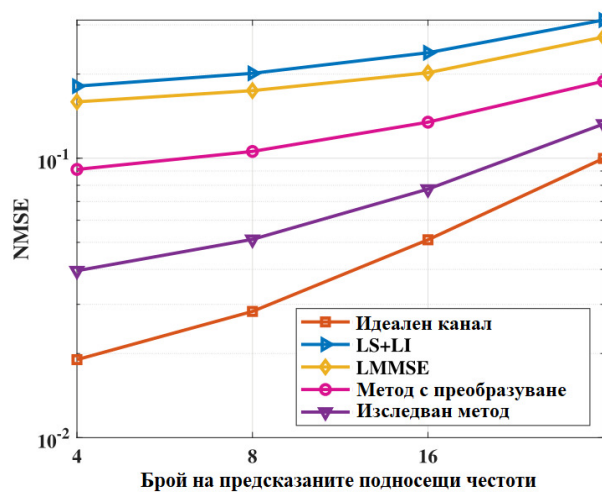
Оценка на производителността при прогнозиране на даунлинк канали, сравняваща разглеждания метод с други решения, е представена на фиг. 2.6, където процентът на обучителни извадки е 50%.

Традиционните методи, базирани на модели (т.е. LS+LI, LMMSE), се представят по-лоши в целия диапазон на изменение на SINR, тъй като предварително зададеният модел не успява точно да съпостави различните условия на канала. За разлика от това, методът, базиран на преобразуване, е в състояние да постигне значително подобряване в производителността в сравнение с методите, базирани на модели, което се постига чрез ефективно извличане на времево-честотно-пространствените корелации, които са критични за завършването на CSI оценката. Независимо от това,

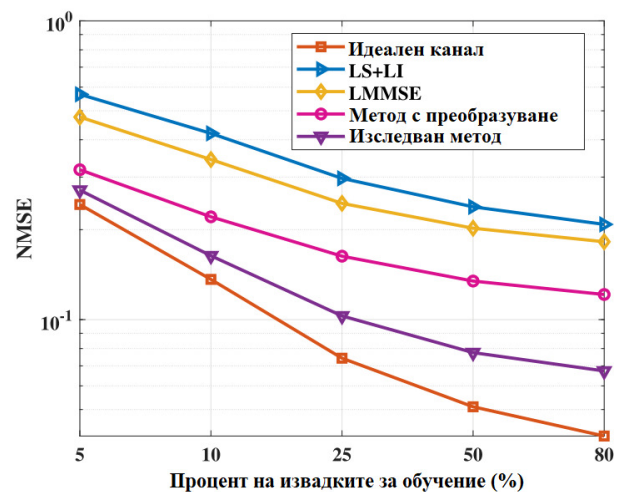
остава значителна разлика в производителността между метода, базиран на преобразуване, и случая с перфектен CSI. Чрез интегриране на механизма „шум с интерференция“ (NI) в оценката на канала, разглежданият метод е в състояние да генерира предсказване на каналите, което добре отразява истинските канали, като по този начин превъзхожда всички други решения в задачата за даунлинк канала.



Фиг. 2.6. Определяне на средноквадратичната грешка (NMSE) в зависимост от SINR



Фиг. 2.7. Определяне на средноквадратичната грешка (NMSE) в зависимост от броя на прогнозираните подносещи честоти



Фиг. 2.8. Определяне на средноквадратичната грешка (NMSE) в зависимост от процента на извадки за обучение

Фиг. 2.7 и фиг. 2.8 представят определяне на NMSE за различни методи по отношение на броя на прогнозираните подносещи честоти и броя на обучителните извадки за даунлинк канала съответно, за стойност на SINR 8dB. Както е показано на двете фигури, разглежданият метод постоянно постига най-ниската NMSE грешка при прогнозиране на канала,

демонстрирайки своята адаптивност. Предсказанията за каналите, получени от предложения метод, съдържат по-богати и по-дискриминационни характеристики на канала, което улеснява по-лесното и по-ефективно откъм данни обучение, като по този начин се минимизира рискът от пренапасване с ограничени етикетирани извадки.

Освен гореспоменатото, разглежданият метод показва по-големи подобрения в производителността при благоприятни условия, като например когато има по-малко подносещи честоти за прогнозиране или когато са налични повече извадки за обучение. Тези резултати подчертават силния потенциал на разглеждания метод за сценарии за високопрецизна комуникация в бъдещи безжични системи, като например ултранадеждна комуникация с ниска латентност (URLLC) и масивно MIMO предаване, където точното познаване на канала е от жизненоважно значение.

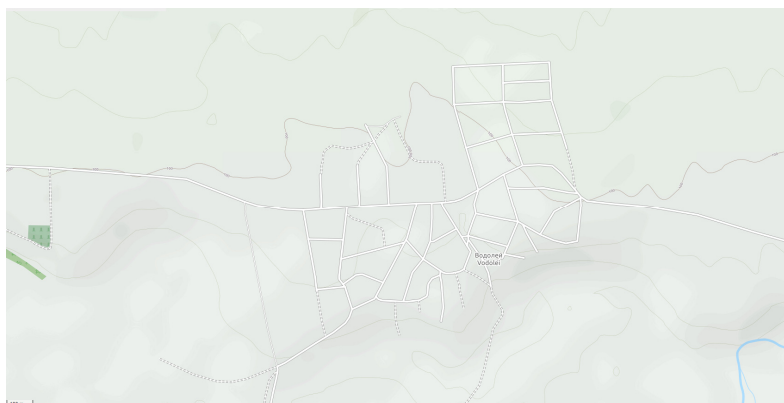
2.3. Планиране на безжичен канал за връзка за реален обект за безжична P2MP комуникационна мрежа

Основната цел е да се планира, изгради, конфигурира, изследва и анализ безжичен канал за връзка за реален обект за безжична P2MP комуникационна мрежа.

Този обект ще бъде използван за извършване на изследване на качествените показатели в реална работна среда в изградената P2MP безжична комуникационна мрежа и за изследване на възможностите за осигуряване на качеството на предаваната информация, надеждността, ефективността и обхвата на мрежата чрез интелигентен мониторинг и контрол.

В допълнение, проектираната и изградена P2MP безжична комуникационна мрежа ще бъде използвана за разработка и изследването на практически експериментален модел на иновативна универсална система за интелигентен мониторинг и контрол на радиоканали в безжични комуникационни мрежи.

2.3.1. Описание на обекта на изследване



Фиг. 2.9. Топографска карта с мащаб на с. Водолей и околностите му

Като реален обект на изследване е избран с. Водолей, намиращо се в Северна България, община Велико Търново, област Велико Търново.

2.3.2. Аналитично изчисляване на радиопокритието

Аналитичното планиране на радиопокритието протича в три стъпки:

- изчисляване на разстоянието на покритие и загубите в свободното пространство;
- изчисляване на енергийния бюджет на линията
- изчисляване на параметрите на приемо-предавателното оборудване.

2.4. Анализ и изводи към Глава 2

1. Извършен е анализ и оценка на степента на влияние на ъгловия ефект, ефекта на каньона, затихването на случайните смущения, затихването, времевата дисперсия и Доплеровото изместване върху разпространението и разпределението на мощността на сигналите в радиоканала, за да се определят ключовите параметри и тяхното взаимодействие при мониторинг в реално време.
2. Разработен и изследван е модел на безжичен комуникационен канал с интегриран интелигентен алгоритъм за потискане на смущенията.
3. Установено е, че традиционните математически модели за определяне на CSI имат ограничения. Класическите методи, базирани на модели (като LS+LI и LMMSE), разчитат на строги и фиксирани априорни предположения за средата, което ги прави силно чувствителни към несъответствия и неефективни в реални динамични условия.
4. Доказано е, че големите безжични и езикови модели (LLM/LWM), обучени само с идеална информация за състоянието на канала (перфектни CSI), извеждат изкривени характеристики в реалността, тъй като практическото предаване винаги е съпътствано от неизбежни шумове и смущения.
5. Идентифицирани са важни предимства на архитектурите за потискане на шума и смущенията (NI). Вграждането на специализиран обучим модул за филтриране на шума и смущенията (NI), съчетан с изчисляване на SINR, позволява по-точна реконструкция на CSI и постига най-ниска средноквадратична грешка (NMSE) при прогнозиране на даунлинк каналите.

ГЛАВА 3. ИЗГРАЖДАНЕ, ИЗСЛЕДВАНЕ, МОНИТОРИНГ И КОНТРОЛ НА БЕЗЖИЧНО РАДИОПОКРИТИЕ НА P2MP КОМУНИКАЦИОННА МРЕЖА

3.1. Планиране и изграждане на безжична P2MP комуникационна мрежа за провеждане на експериментални изследвания

3.1.1. Избор на оборудване за изграждане на безжична P2MP

комуникационна мрежа за провеждане на експериментални изследвания

3.1.1.1. Избор на оборудване за базовата станция

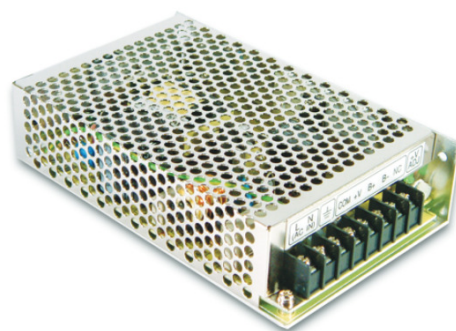


Фиг 3.1. Избор на оборудване за базовата станция (Mikrotik RBGrooveA-52HPnr2)

Избрано е оборудване на производителя Mikrotik и по-точно модел GrooveA-52HPnr. То отговаря на всички изисквания за да може да се осигури покритие в избраното населено място.

3.1.1.2. Избор на захранващ блок с UPS функция

Мониторингът на изградената система трябва да включва и наблюдение на захранващото напрежение.



Фиг. 3.2. Избор на захранващ блок (Meanwell AD-55A)

Избраното оборудване за базовата станция може да работи с широк диапазон от входно напрежение от 9V до 30V. Това ще позволи директно включване на захранващ блок с UPS функция без инвертор, като напрежението ще бъде около 13.6V при наличие на основно захранване, а при отпадането му напрежението ще идва директно от свързан акумулатор и ще бъде от 12.6V, като постепенно ще намалява. Тази допълнителна особеност ще бъде използвана като вход за данни към системата за мониторинг, която ще преценява от тази стойност дали се работи с основно или резервно захранване.

3.1.1.3. Избор на предавателна антена

Пресметнатия коефициент на предавателната антена е 11,18dBm.



Фиг. 3.3. Избор на приемо-предавателна антена (TP-Link TL-ANT2412D)

Пример за антена е моделът TL-ANT2412D, която работи в честотен обхват 2,4GHz~2,5GHz, има коефициент на предаване 12dBi, което е малко над необходимото. Също така има 360° покритие в хоризонталната равнина.

Антената е с N-конектор и може да бъде свързана към базовата станция без свързващи кабели.

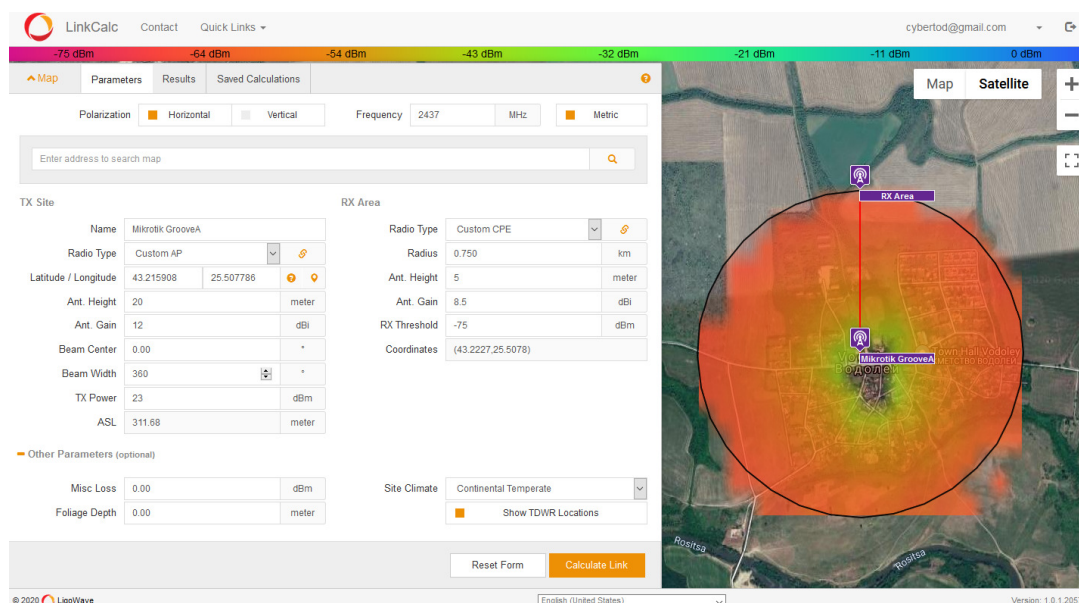
3.1.1.4. Избор на клиентско оборудване

Избран е модел Ubiquiti Loco M2 – той отговаря на всички изисквания за да може да работи във всяка една точка в с. Водолей.



Фиг. 3.4. Избор на клиентско оборудване (Ubiquiti Loco M2)

3.1.2. Софтуерно планиране на радиочестотния канал и радиопокритието на безжична P2MP комуникационна мрежа



Фиг. 3.8. Извеждане на резултати от симулационното планиране на P2MP радиопокритие в безжична комуникационна мрежа чрез софтуерен инструмент LinkCalc за с. Водолей

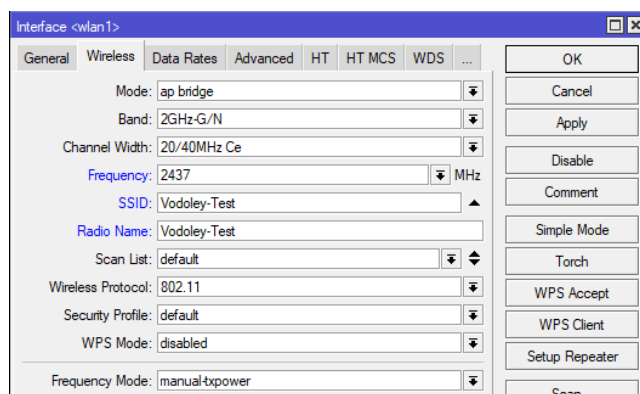
За планиране и симулация на безжичното покритие се използва софтуера LinkCalc на LigoWave.

Както се вижда от фиг. 3.8, планираното покритие отговаря на поставените изисквания. В горната част на фигурата е налична цвetoва скала, която индикира какво е планираното в модела ниво на приетия сигнал.

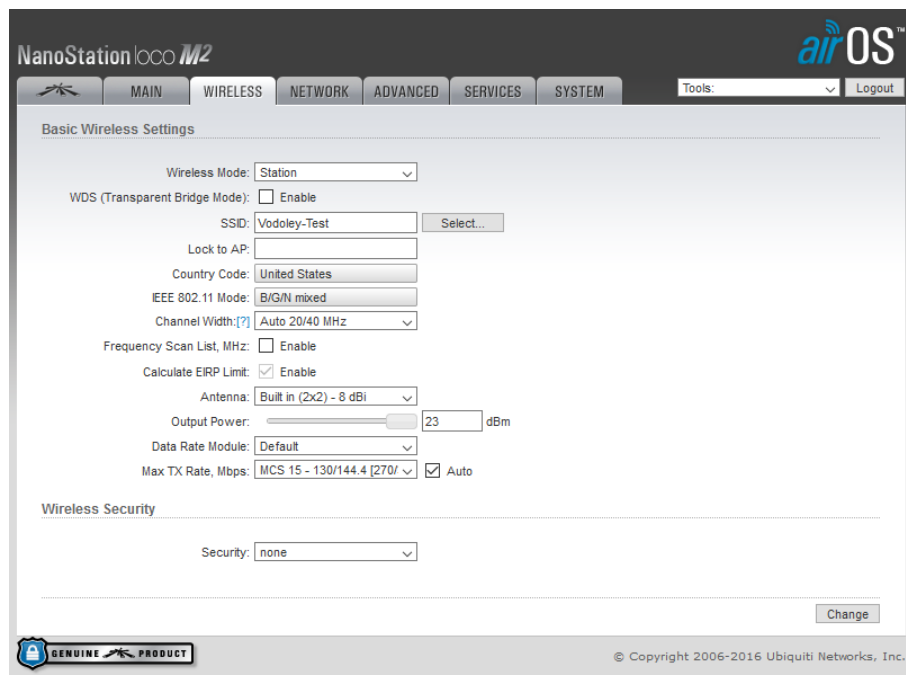
3.1.3. Изграждане и конфигуриране на безжична P2MP комуникационна мрежа

3.1.3.1. Конфигуриране на Mikrotik GrooveA в режим базова станция

На фиг. 3.9 е показан екрана, в който се конфигурират основните параметри на безжичния интерфейс.



Фиг. 3.9. Конфигуриране на безжичния интерфейс на базовата станция

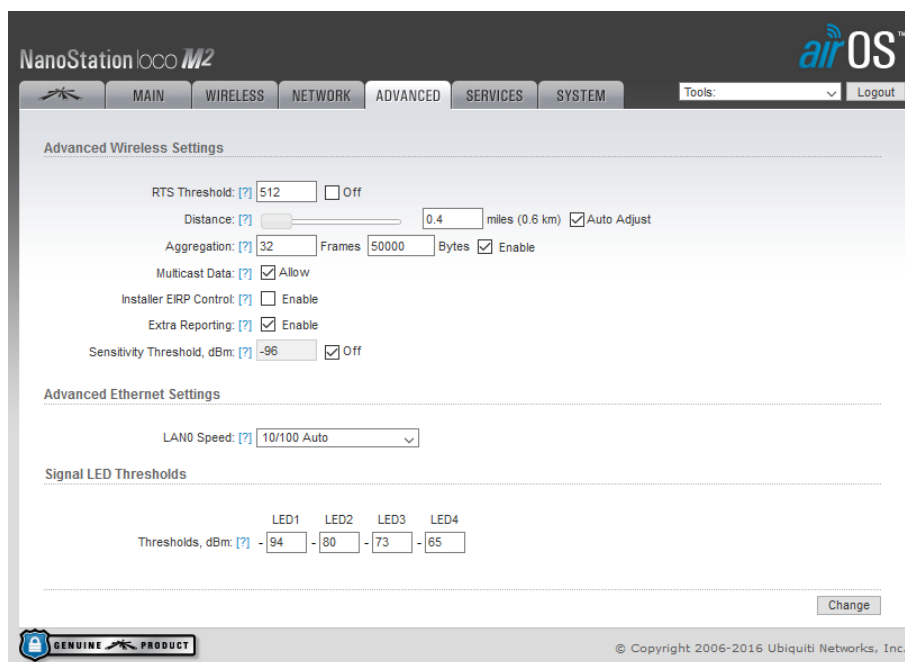


Фиг. 3.11. Конфигуриране на безжичния интерфейс на клиентско устройство

3.1.3.2. Конфигуриране на Ubiquiti Loco M2 в режим клиент

Устройствата на Ubiquiti се конфигурират през уеб браузър. Отново се разглежда само конфигурацията на параметрите на безжичния интерфейс.

Основните параметри в airOS се конфигурират на екрана показан на фиг. 3.11. Друго меню, което съдържа важни настройки на безжичния интерфейс и особено в разглеждания случай при безжична връзка на открито е меню *Advanced* – фиг. 3.12.



Фиг. 3.12. Конфигуриране на разширените параметри на клиентско устройство

3.2. Експериментално изследване и анализ от мониторинг и контрол на безжично радиопокрытие на R2MP комуникационна мрежа

3.2.2. Експериментално изследване на безжичното радиопокрытие покритие на R2MP комуникационна мрежа

Релефът на населеното място е равнинен. Контролните точки за целите на експерименталното изследване са избрани в различни локации от населеното място и на различно разстояние от базовата станция.

Направени са измервания в 12 контролни точки. В повечето точки е налична пряка видимост между клиентското устройство и базовата станция, но при някои от тях има растителност между антените и няма пълна пряка видимост.

Резултатите от измерените стойности на нивото на радиосигналите в съответните контролни точки за мониторинг са представени в таблица 3.1. Измерените нива са от гледна точка на клиентското устройство. Измереното ниво RX е това което е получено в клиента, а ниво TX е това което получава базовата станция от клиента.



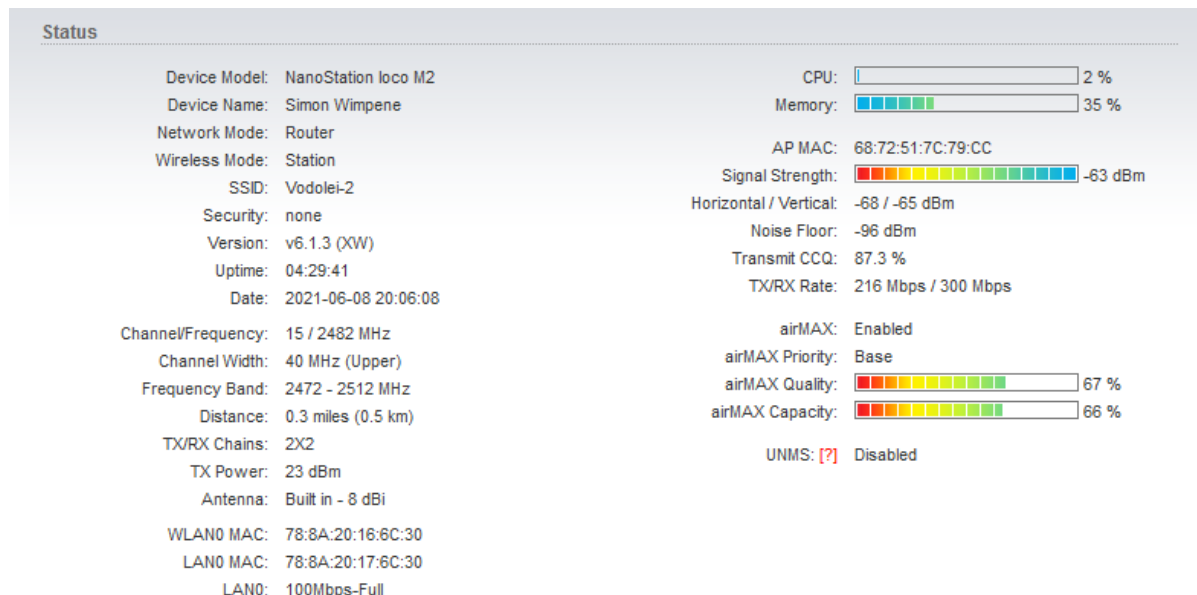
Фиг. 3.15. Контролни точки за мониторинг и изследване на безжичното радиопокрытие

Таблица 3.1. Експериментално измерени нива на радиосигналите в избраните контролни точки

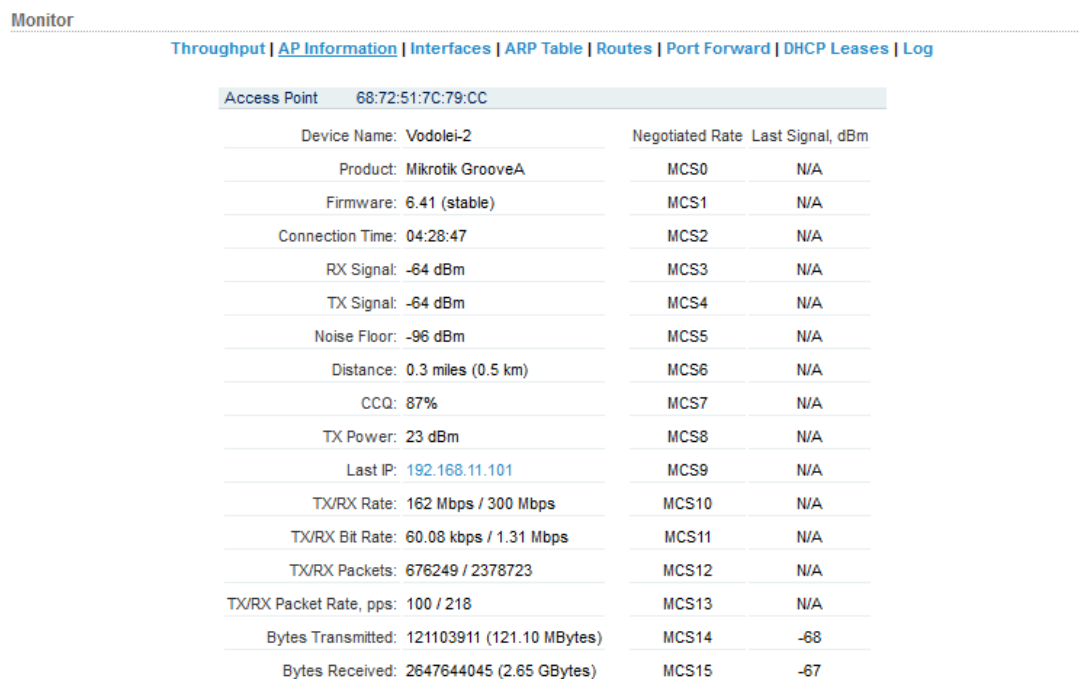
Контролна точка	Разстояние	Измерено ниво RX, dBm	Измерено Ниво TX, dBm
Точка 1	233м	-54	-53
Точка 2	227м	-57	-59
Точка 3	375м	-61	-59
Точка 4	438м	-75	-73
Точка 5	432м	-61	-61
Точка 6	260м	-71	-70
Точка 7	620м	-70	-61
Точка 8	538м	-68	-67
Точка 9	340м	-56	-54
Точка 10	570м	-63	-60
Точка 11	685м	-62	-60
Точка 12	500м	-57	-54

На фиг. 3.16 е изведен мониторинг на клиентското оборудване, който показва статуса и параметри: модела на устройството, режимът му на работа, SSID на базовата станция, софтуерна версия, време от стартиране,

канал, широчина на канала, мощност на предаване, режим на мрежовия порт, натоварване на процесора, заета памет, MAC адрес на базовата станция, сила на приетия сигнал, сила на сигнала за двете поляризации, ниво на шума, качествено коефициент на предаване.



Фиг. 3.16. Основен екран от системата за мониторинг на клиентско устройство (Ubiquiti Loco M2)



Фиг. 3.17. Резултати от мониторинг на свързано към мрежата клиентско безжично устройство

На основния екран няма пълна информация за базовата станция, както и за измереното ниво на TX сигнала. На фиг. 3.17 е изведен мониторингът

на допълнителни параметри, напр. данни през CDP протокол, като например модела на базовата станция, софтуерната и версия, виждат се както приетия така и нивото на изпратения сигнал, вижда се разстоянието така както е засечено от базовата станция, а също и мощността на предаване на базовата станция. В дясната част се показва измерен сигнал за различни модуляции. В случая при достатъчно добър сигнал се работи стабилно само на MCS14 и MCS15.

За да се изследва доколко е стабилен сигналът се извършват няколко измервания през известни интервали от време. Тези тестове се извършват за Точка 11, тъй като тя е най-отдалечена от базовата станция. Резултатите са представени в таблица 3.2. Сигналът остава стабилен и почти без никакви промени.

Таблица 3.2. Отчетени данни за Точка 11 в рамките на няколко дни

Измерване	Дата и час	Измерено ниво RX, dBm	Измерено Ниво TX, dBm
1	08.06.2025 г. 18:50ч.	-61	-62
2	08.06.2025 г. 21:01ч.	-62	-63
3	09.06.2025 г. 07:27ч.	-61	-60
4	09.06.2025 г. 11:22ч.	-61	-62
5	09.06.2025 г. 16:05ч.	-62	-63

За Точка 6 също се извършват няколко допълнителни измервания, защото между базовата станция и клиентското устройство има и растителност и трябва да се установи дали сигнала ще бъде стабилен по всяко време и различни метеорологични условия. Резултатите от тези измервания са описани в таблица 3.3.

Таблица 3.3. Отчетени данни за Точка 6 при различни метеорологични условия

Дата и час	Данни за времето	Измерено ниво RX, dBm	Измерено Ниво TX, dBm
08.06.2025 г. 18:52ч.	слаб дъжд	-75	-73
08.06.2025 г. 21:02ч.	облачно	-74	-71
09.06.2025 г. 07:26ч.	облачно	-74	-71
09.06.2025 г. 11:22ч.	слънчево	-73	-71
09.06.2025 г. 16:05ч.	слънчево	-71	-70

3.2.3. Анализ на получените резултати

Както може да се види от резултатът на фиг. 3.8, получен при софтуерното планиране и резултатите от таблица 3.1, получени при реалното изследване на безжичното покритие, резултатите са добри и при сравнение приблизително съвпадат. Това до голяма степен е подпомогнато

от равнинния релеф на населеното място и липсата на препятствия. Все пак в някои точки има ниско ниво на сигнал, което основно се дължи на растителност, която блокира част от първата Френеловата зона.

От допълнителните измервания в Точка 11 описани в таблица 3.2 се вижда, че сигнала почти не се променя и остава постоянен. Това се дължи на стационарност на устройствата и на пряката видимост. Качеството на връзката в един такъв случай е напълно предвидимо.

Интересен е резултатът в Точка 6, където ниския измерен донякъде се дължи на препятствия между антените. От направените допълнителни измервания, които са представени в таблица 3.3 е видно, че нивото на сигнала се променя в известни граници, но остава достатъчно стабилно за да работи нормално. В допълнение, ниското ниво на сигнала може да се отдаде и на факта, че за да се получи голям коефициент на предаване в хоризонталната равнина, ъгъла на излъчване във вертикалната равнина е сравнително малък. Тук разстоянието е малко, предавателната антена е монтирана на високо, а измерването с клиентското оборудване е направено от сравнително по-малка височина.

При тези получени добри нива на сигнала е възможно клиентското оборудване на част от обектите да не бъде на покривите на къщите, а да бъде на по-ниско място, като например тераса или зад прозорец.

3.3. Анализ и изводи към Глава 3

1. Постигната е висока степен на съответствие между разгледания теоретичен модел и приложената на практика методология. Реално измерените нива на радиосигнала в контролните точки в голяма степен съвпадат с предварителните резултати от софтуерната симулация с инструмента LinkCalc.
2. Оптималното планиране и проектиране са ключови фактори за ефективната работа и качеството на безжичното радиопокритие. Разработената P2MP тестова мрежа в реална среда и проведените експериментални изследвания установяват степента на единично и комплексно влияние на фактори като терен, пряка видимост, наличие на препятствия в първата Френелова зона, стационарност на устройствата и метеорологични условия.
3. Софтуерните оптимизации на комуникационното оборудване са от съществено значение за оптималното му конфигуриране. Активирането на механизма RTS/CTS (чрез RTS Threshold) и автоматичната настройка на ACK timeout са критични за елиминиране на проблема със „скритата точка“ и поддържането на стабилна връзка на големи разстояния.
4. Предвид на установената динамично променяща се степен на влияние на различни фактори, системата за мониторинг има за цел проактивно да наблюдава и реагира, за да осигури адаптивност, непрекъсната висока ефективност на мрежата и качество на предоставяните услуги.

ГЛАВА 4. РЕАЛИЗАЦИЯ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН МОДЕЛ НА УНИВЕРСАЛНА СИСТЕМА ЗА ИНТЕЛИГЕНТЕН МОНИТОРИНГ И КОНТРОЛ НА БЕЗЖИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ

Етапите на разработване на системата за интелигентен мониторинг и контрол на безжични комуникационни мрежи са следните:

- 1) Дефиниране на структурата на мрежов оперативен център за мониторинг на телекомуникационни мрежи.
- 2) Избор на софтуерна платформа за внедряване на система за интелигентен мониторинг и управление на безжични комуникационни мрежи.
- 3) Добавяне на допълнителни модули за разширяване на функционалността на системата за интелигентен мониторинг и управление на безжични комуникационни мрежи.
- 4) Добавяне на шаблони за лесно и гъвкаво конфигуриране на системата.
- 5) Добавяне на източници на данни и графики за визуализация на параметрите на мониторинг в реално време.
- 6) Създаване на интерактивна карта за визуализация на данни в центъра за управление и мониторинг.
- 7) Симулация на събития за експериментално тестване на системата за интелигентен мониторинг и управление на безжични комуникационни мрежи.

Основни функционални характеристики на проектираната система за мониторинг и управление са следните:

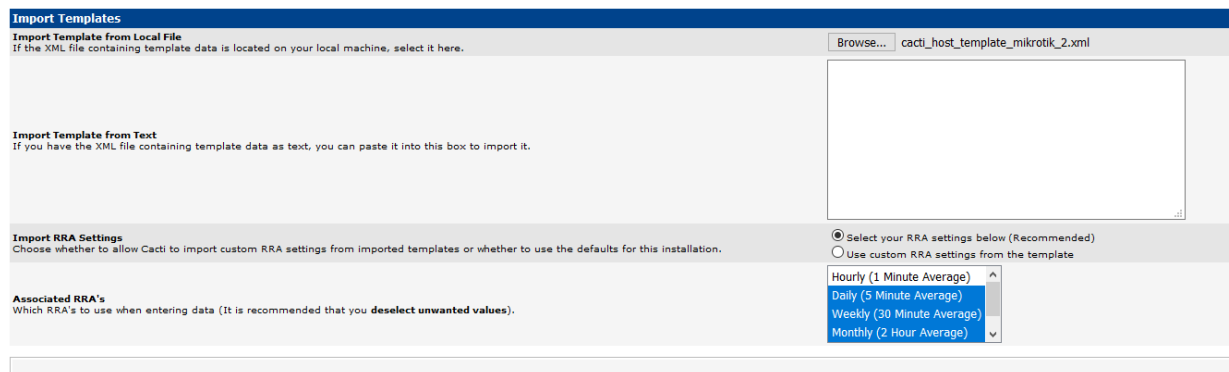
- 1) Системата за наблюдение и управление на радиоканалите в реално време на изградената безжична мрежа е базирана на софтуер с отворен код – Cacti.
- 2) Допълнителните софтуерни модули WeatherMap и Thold бяха използвани за разширяване на функционалността на системата, за осигуряване на интерактивна визуализация в реално време на данни и графики в центъра за управление и мониторинг и за сигнализиране при аварийни събития.
- 3) Добавени са специализирани шаблони за по-лесно конфигуриране на различни видове мрежови устройства и за конфигуриране на инструментариума за визуализация на широкия набор от данни за състоянието на безжичната свързаност и мрежата като цяло.
- 4) Системата наблюдава и визуализира данни в реално време за състоянието на всички мрежови устройства: състояние на точката за достъп; информация за свързани клиентски устройства; информация за активни връзки и производителност на мрежата за оптимизация на ресурсите; управление на безжичните

радиоканали; управление, прогнозиране и сигнализиране при аварийни условия.

4.4. Добавяне на шаблони за улеснено и гъвкаво конфигуриране на системата

Разработени са шаблони за мониторинг на мрежови устройства, които улесняват въвеждането на информация за различните по вид устройства.

На фиг. 4.10 е показан екрана от които става добавянето на шаблони.



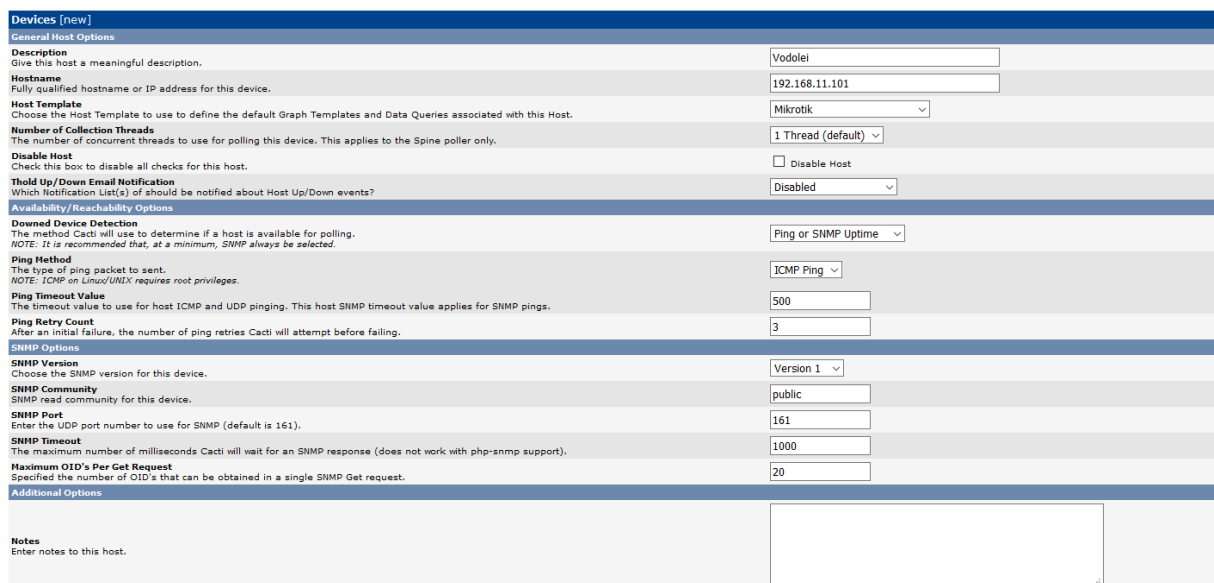
Фиг. 4.10. Добавяне на шаблон в системата за мониторинг

4.5. Добавяне на източници на данни и графики за визуализация на параметрите от мониторинга в реално време

4.5.1. Добавяне на визуализация за параметрите на базовата станция

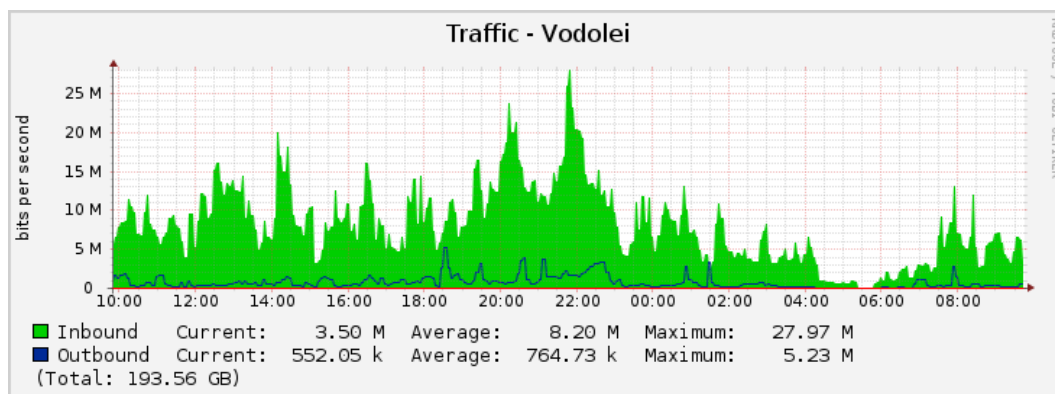
За да може да се добавят графики, първо трябва да се добави самото устройство, както е описано в документацията на Cacti.

На фиг. 4.12 е показан екрана за добавяне на ново устройство.

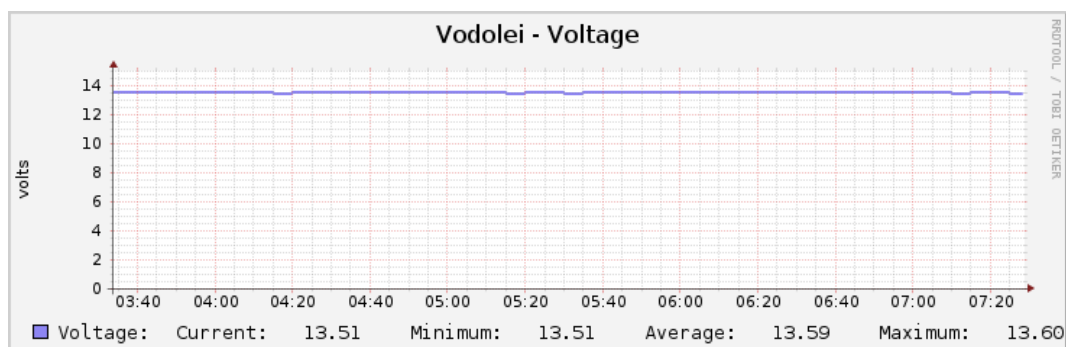


Фиг. 4.12. Екран за добавяне на мрежово устройство

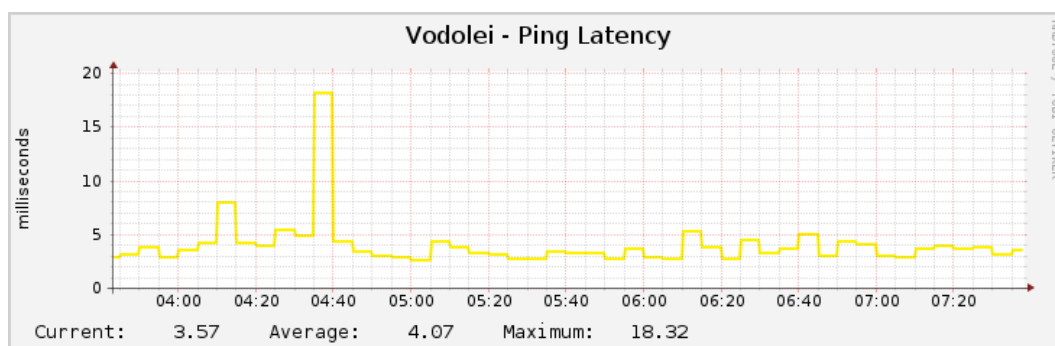
На фиг. 4.15. е показан резултатът от добавено мрежово устройство в системата за мониторинг.



Фиг. 4.18. Визуализация на трафичното натоварване на безжичния интерфейс на точката за достъп



Фиг. 4.19. Визуализация на изменението на захранващото напрежение на точката за достъп



Фиг. 4.20. Визуализация на времето закъснение на сигнала до точката за достъп

Последната визуализация, показана на фиг. 4.20, извежда изменението на времезакъснението на сигнала между сървър с мониторинговата система и базовата станция. Средното закъснение е 4.07 ms, което е добра стойност като се има предвид, че Sacti-сървър не се намира в същото населено място, а интернет свързаността също се получава с безжична радиовръзка.

4.5.2. Добавяне на визуализация за параметрите на клиентско оборудване

Мониторингът на клиентските устройства ще даде възможност да се следи мощността на приемания от тях радио сигнал. Ще се добавят и

графики за визуализация на трафичното натоварване, както и за времезакъснението.

На фиг. 4.22 е представен механизмът за добавяне на визуализация за параметрите на клиентско устройство.

Tochka 10 (88.87.22.16) Ubiquiti AiROS 5.6 (CPE)

Host: Tochka 10 (88.87.22.16) Graph Types: All

[*Edit this Host](#)
[*Create New Host](#)
[*Auto-create thresholds](#)

Graph Template Name	
Create: AiROS 5.6 - AP/Client - Airmax	☐
Create: AiROS 5.6 - AP/Client - CPU	☐
Create: AiROS 5.6 - AP/Client - Signal (alt)	☐
Create: AiROS 5.6 - AP/Client - Uptime	☐
Create: Ubnt AiROS 5.6 - AP/Client - Signal	☐
Create: zAiROS 5.6 - AP/Client - Air Rate	☐
Create: zAiROS 5.6 - AP/Client - Signal	☒
Create: Unbr - Ping Latency	☐

RadioIndex	RadioNode	RadioCode	RadioFreq	RadioDfsEnabled	RadioTxPower	RadioDistance	RadioChainTask	RadioAntenna	WlStatSsid	WlStatApMac	WlStatSecurity	WlStatChanWidth
5	1	511	2482	2	23	450	3	450	Vodafone-2	hQjYhM	none	40

Select a graph type: AiROS 5.6 - Client - Link Details

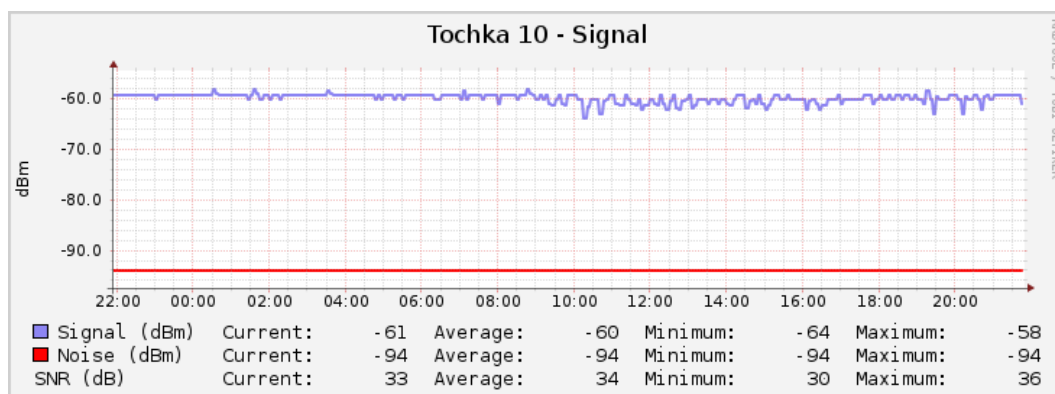
Index	Status	Description	Type	Speed	Hardware Address
1	Up	lo	softwareLoopback(24)	0	
2	Up	eth0	etherenCCmac(6)	1000000000	78:BA:20:E1:80:95
3	Down	eth1	etherenCCmac(6)	0	7A:BA:20:E1:80:95
4	Up	wifi0	etherenCCmac(6)	0	78:BA:20:E0:80:95
5	Up	eth0	etherenCCmac(6)	0	78:BA:20:E0:80:95

Select a graph type: In/Out Bits

Cancel Create

Фиг. 4.22. Добавяне на визуализация за параметрите на клиентско устройство

На фиг. 4.23 е представен резултатът от мониторинга и визуализацията на нивото на сигнала, приет от безжичния интерфейс на клиентско оборудване за контролна Точка 10. Освен нивото на получения сигнал се отчита и нивото на шума, а в легендата на графиката от тяхната разлика е пресметнато и съотношението сигнал-шум SNR.

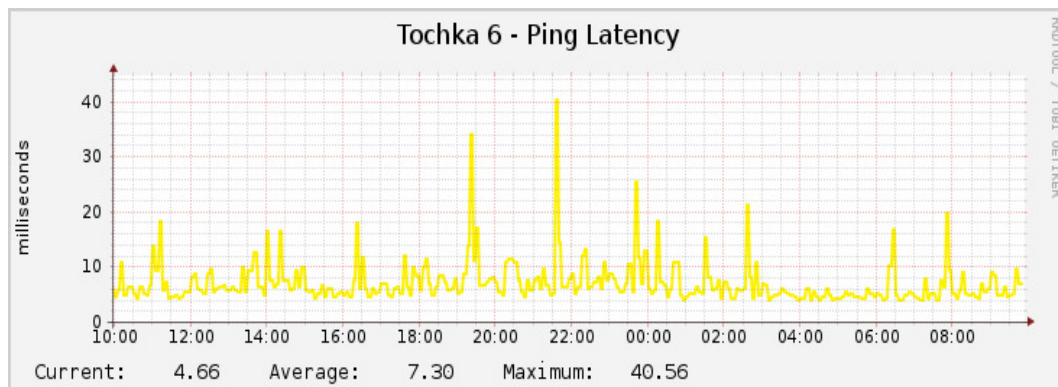


Фиг. 4.23. Визуализация на нивото на сигнала в безжичния интерфейс на клиентско оборудване

Добавената графика за измерване на закъснението с ping тук вече също може да се използва

За оценка на качеството на безжичната връзка е добавена и визуализация на времето закъснение на сигнала до клиентско оборудване. Като пример за това е показаната на фиг. 4.24 графика за безжичния интерфейс на клиентско оборудване за контролна Точка 6. Като

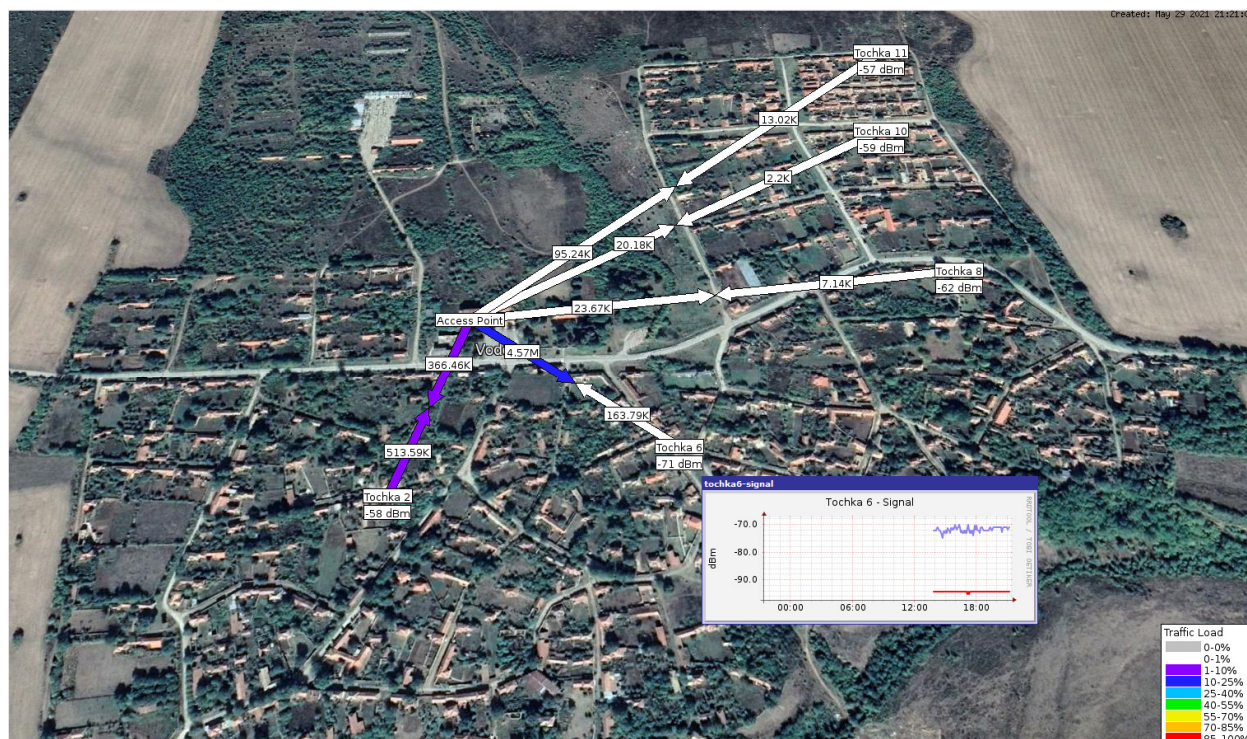
недостатък може да се отбележи, че този шаблон за графика показва закъсненията, но не и загубите в процентно отношение.



Фиг. 4.24. Визуализация на времето закъснение на сигнала до клиентско оборудване

4.6. Създаване на карта с модул WeatherMap за визуализация на данни в центъра за управление и мониторинг

За създаване на интерактивна карта за динамична визуализация на данни в центъра за управление и мониторинг е използван модул WeatherMap. Резултатите от конфигурирането и изпълнението на тази задача е екранът, представен на фиг. 4.27.



Фиг. 4.27. Екран на системата за мониторинг и управление за интерактивна визуализация на общото състояние на безжичната комуникационна мрежа

На фиг. 4.27 е представен основният екран за интерактивна визуализация на общото състояние на безжичната комуникационна мрежа в разработената система за мониторинг. Екранът показва интерактивна карта в реално време на свързаните и активни устройства и състоянието на безжичните радиоканали в мрежата. Допълнителна подробна информация може лесно да бъде извикана чрез избиране на съответния елемент от мрежата. На този екран се визуализира и информация за аварийни събития или отклонения във функционирането и производителността на мрежата.

4.7. Симулация на събития за експериментално тестване на системата за интелигентен мониторинг и контрол на безжични комуникационни мрежи

С добавянето на модула Thold системата за мониторинг получава възможност да сигнализира при настъпване на аварийни събития в реално време. Ще бъдат извършени няколко теста за такива събития. Единият тест ще бъде нарушаване на захранващото напрежение на базовата станция и преминаване към резервното захранване. Другият тест ще бъде имитиране на голямо затихване на сигнала и разпад в комуникацията чрез завъртане на клиентска антена, така че сигналът и да падне под някакъв определен праг. За да може да се изпращат тези сигнали, трябва да се зададат необходимите прагове за алармиране.

Data Source Item [voltage] - Current value: [175.9267]

Template settings

Template Propagation Enabled
Whether or not these settings will be propagated from the threshold template. ☐ Template Propagation Enabled

Template Name
Name of the Threshold Template the threshold was created from. None

Mandatory settings

Threshold Name
Provide the THold a meaningful name.

Threshold Enabled
Whether or not this threshold will be checked and alerted upon. ☒ Threshold Enabled

Weekend Exemption
If this is checked, this Threshold will not alert on weekends. ☐ Weekend Exemption

Disable Restoration Email
If this is checked, Thold will not send an alert when the threshold has returned to normal status. ☐ Disable Restoration Email

Threshold Type
The type of Threshold that will be monitored.

Re-Alert Cycle
Repeat alert after this amount of time has passed since the last alert.

Warning High / Low Settings

Warning High Threshold
If set and data source value goes above this number, warning will be triggered.

Warning Low Threshold
If set and data source value goes below this number, warning will be triggered.

Warning Breach Duration
The amount of time the data source must be in breach of the threshold for a warning to be raised.

Alert High / Low Settings

High Threshold
If set and data source value goes above this number, alert will be triggered.

Low Threshold
If set and data source value goes below this number, alert will be triggered.

Breach Duration
The amount of time the data source must be in breach of the threshold for an alert to be raised.

Data Manipulation

Data Type
Special formatting for the given data.

Other Settings

Warning Notification List
You may specify choose a Notification List to receive Warnings for this Data Source.

Alert Notification List
You may specify choose a Notification List to receive Alerts for this Data Source.

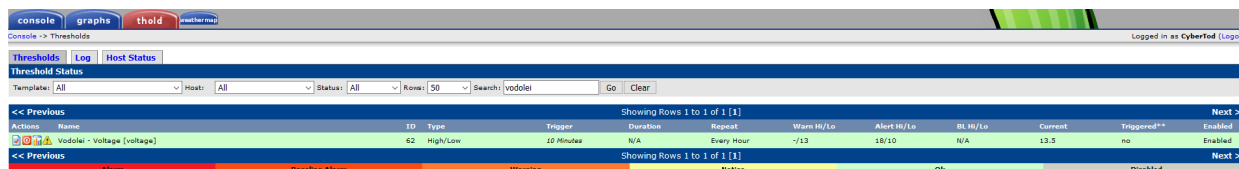
Alert Emails
You may specify here extra Emails to receive alerts for this data source (comma separated).

Warning Emails
You may specify here extra Emails to receive warnings for this data source (comma separated).

Фиг. 4.29. Дефиниране на стойности за създаване на праг за реакция

Може да се създаде праг само за един източник на данни или да се направи шаблон, който да се ползва за еднотипни източници с еднакъв праг на критична стойност. Възможно е също така да се добави сигнализация за повече от един източник от дадена графика.

Задават се минимални и максимални прагови стойности, като може да се изпраща уведомление при отклонения над или под тяхната стойност. Задава се интервал, през който се извършва проверка. Освен точно определена стойност може да се изпрати предупреждение при отклонение с определен процент от стандартните стойности на източника. Избира се един или повече адреси на електронна поща, на които да се прати уведомлението. Както адресите, така и стойностите са разделени на предупреждение и критична стойност.



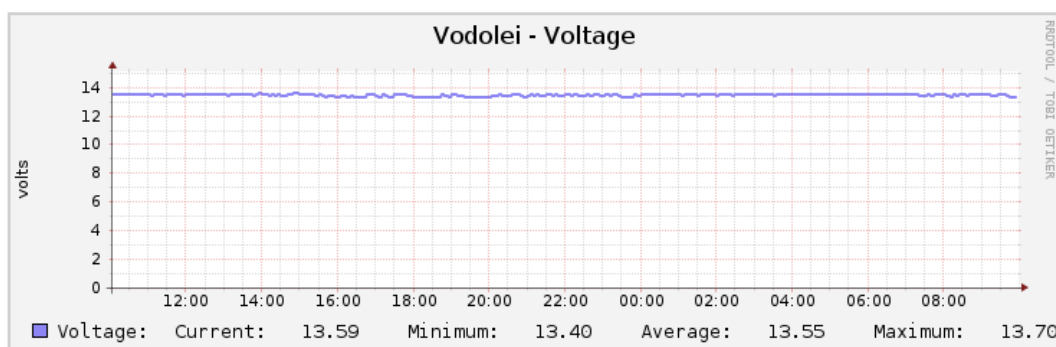
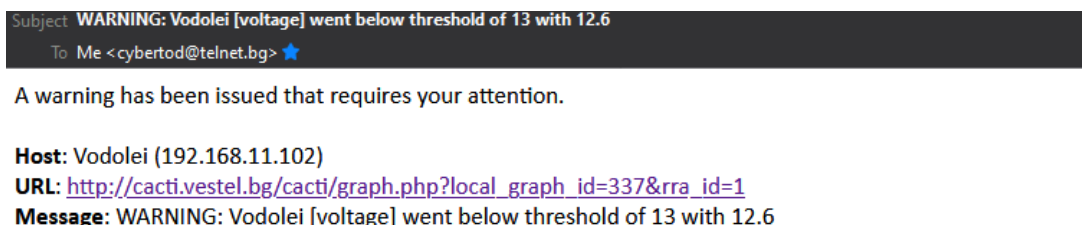
Name	ID	Type	Trigger	Duration	Repeat	Warn Hi/Low	Alert Hi/Low	BL Hi/Low	Current	Triggered	Enabled
Vodolei - Voltage [voltage]	62	High/Low	10 Minutes	N/A	Every Hour	<13	18/10	N/A	13.5	no	Enabled

Фиг. 4.30. Визуализация на добавени прагове на стойности

4.7.1. Тестване на системата при отпадане на захранващо напрежение

След като вече е създаден праг за стойността на напрежението, пристъпва се към самото симулиране на събитието:

- 1) Изключва се захранващия блок от електрическата мрежа. Базовата станция продължава да работи. Захранващия блок е превключил захранването към свързания акумулатор. След няколко минути на електронната поща, която е въведена в настройките на праг, се получава сигнал за предупреждение, че текущата стойност на напрежението е 12.6V при минимален праг 13V.



Фиг. 4.31. Сигнализация за спад на зададената стойност под дефинирания праг

- 2) Изчаква се определено време, през което се оставя захранването изключено. Базовата станция продължава да работи стабилно. Използвания акумулатор е 7Ah. Малко след като се включи захранването отново се получава уведомление на електронната поща, че стойността на захранващото напрежение отново е възстановена в зададените норми.

Subject **NORMAL: Vodolei [voltage] Restored to Normal Threshold with Value 13.1**

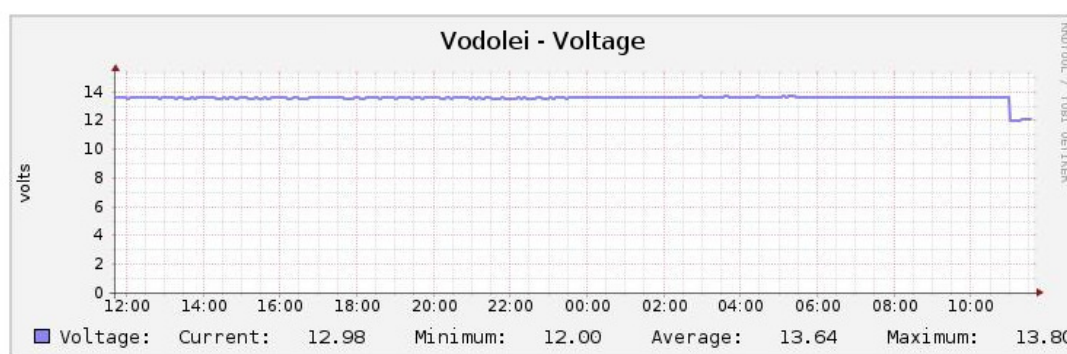
To Me <cybertod@telnet.bg> ★

A warning has been issued that requires your attention.

Host: Vodolei (192.168.11.102)

URL: http://cacti.vestel.bg/cacti/graph.php?local_graph_id=337&rra_id=1

Message: **NORMAL: Vodolei [voltage] Restored to Normal Threshold with Value 13.1**



Фиг. 4.32. Сигнализация за възстановяване на параметрите в норма

4.7.2. Тестване за влошена безжичната връзката с клиентско оборудване

По подобие на предходния тест, тук ще бъде симулирано намаляване на нивото на сигнал в клиентско оборудване до стойност, която би пречила за нормално използване на радиовръзката. Най-лесния начин за това е като се завърти приемо-предавателната антената. Тук е зададен по-голям интервал, през който да се извършва проверката, защото нивото на сигнала може да се променя в някакви граници в следствие на дъжд или други фактори и не е необходимо да се изпращат излишни уведомления.

Получава се уведомлението с известно забавяне каквато и беше целта. На фиг. 4.33 е показан резултат, при който след завъртане на антената с 60 градуса, нивото наприетият сигнал спада с около 10dB. В едно реално изградено радиопокрытие по този начин в центъра за управление ще се получава информация навреме и ще може да се реагира преди абонатите на мрежата да останат без услуга за по-дълго време.

Subject **WARNING: Tochka 6 - Signal** [signalStrengthValue] went below threshold of -80 with -81

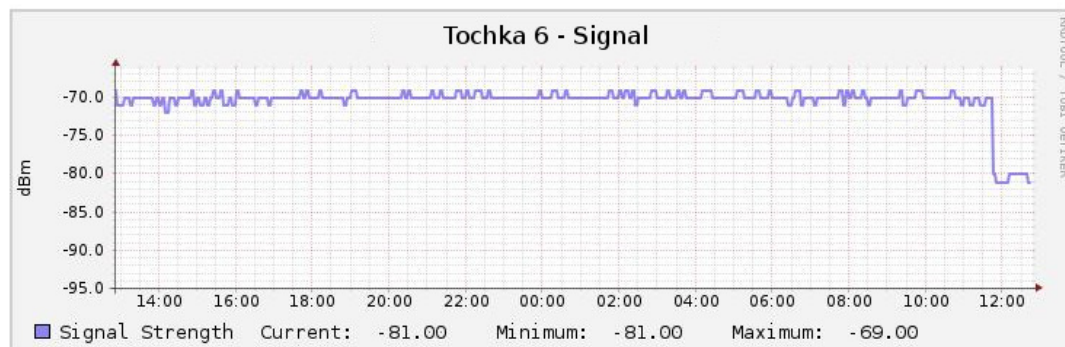
To Me <cybertod@telnet.bg> ★

A warning has been issued that requires your attention.

Host: Tochka 6 (212.50.89.214)

URL: http://cacti.vestel.bg/cacti//graph.php?local_graph_id=344&rra_id=1

Message: WARNING: Tochka 6 - Signal [signalStrengthValue] went below threshold of -80 with -81



Фиг. 4.33. Сигнализация при слаб сигнал на клиентско устройство

4.8. Анализ и изводи към Глава 4

1. Разработената система: позволява гъвкавост и разширяемост при събирането на данни; има внедрен механизъм за контрол на сигурността чрез детайлно управление на правата; позволява лесно и безпроблемно интегриране или премахване на външни допълнителни модули, с помощта на които се добавят функционалности; притежава гъвкави и мощни механизми за интуитивна и интерактивна визуализация на данни на видео стени в оперативни центрове; може успешно да интегрира и извлича технически данни от физически устройства, използвайки класическия SNMP протокол.
2. Разработената система осигурява многокомпонентна оценка на безжичната връзка. Интелигентният мониторинг на радиоканалите се осигурява чрез едновременно проследяване на различни показатели - общ мрежов трафик (downlink и uplink), забавяне (ping latency), нива на получения радиосигнал и съотношение сигнал-шум (SNR) и др.
3. Разработен е интелигентен механизъм за преминаване от пасивно наблюдение към активно сигнализиране. Чрез внедряване на допълнителни интелигентни модули, системата се превръща в инструмент за управление на аварии, който автоматично анализира входящите данни и изпраща известия при преминаване на предварително определени критични прагове.
4. Разработената интелигентна система осигурява проактивна реакция преди прекъсване на услугата за абонатите. Експериментални симулации (прекъсване на основното захранване и влошаване на радиосигнала) доказват, че системата открива отклонения в

параметрите незабавно, което позволява на персонала да реагира навреме, преди потребителите да загубят връзка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бързият растеж на безжичните комуникации в глобален мащаб и навлизането на технологии от ново поколение (като Wi-Fi 7, 5G и бъдещите 6G архитектури) извеждат на преден план необходимостта от преминаване от конвенционално (реактивно) управление към системи за интелигентен мониторинг в реално време. Разработената методология успешно адресира критичните предизвикателства, свързани с поддържането на качеството на услугата (QoS), надеждността на преноса и стабилността на връзките в мащабни мрежови структури (WPAN, WLAN, WWAN).

Основен научно-приложен принос на разработката е внедряването на холистичен подход за оценка на безжичната връзка. Реализиран е многокомпонентен анализ и средства за събиране на данни. Вместо изолирано проследяване на единични метрики, предложените средства реализират едновременно и паралелен мониторинг на комплекс от ключови технически показатели:

- Мрежов трафик: систематичен и диференциран анализ на капацитета и натоварването в направленията даунлинк (downlink) и ъплинк (uplink).
- Времеви закъснения: прецизно проследяване на закъснението (ping latency), което е критичен фактор за функционирането на приложения в реално време.
- Качество на радиоканала: измерване на нивата на приемания радиосигнал и съотношението сигнал-шум (SNR), осигуряващи точна оценка на физическата среда за разпространение.

За осигуряване на максимална съвместимост с разнородна хардуерна инфраструктура, средствата за събиране на данни успешно интегрират класическия протокол SNMP. Това позволява ефективно извличане на нисколатентна техническа информация директно от физическите устройства, независимо от техния производител (multi-vendor среди).

Практическата приложимост на методите се разширява чрез разработването на мощни софтуерни механизми за интуитивно представяне на данните чрез интелигентна визуализация и ситуационна осведоменост:

- Изграждане на интерактивни логически карти върху реален географски фон, които се анимират в реално време с текущите данни за статуса и натоварването на мрежата.
- Адаптиране на визуализационните интерфейси за работа в оперативни центрове чрез видео стени, което гарантира незабавна реакция на администраторите при локализиране на аномалии.

Научно-практическата стойност на труда се материализира в разработения интелигентен механизъм за преминаване от пасивно наблюдение към активна сигнализация и проактивно реагиране. Чрез внедряването на допълнителни интелигентни модули, системата се трансформира в завършен инструмент за управление на аварии, който:

- Автоматично анализира входящите потоци от телеметрични данни.
- Идентифицира отклоненията и незабавно изпраща нотификации при преминаване на предварително дефинирани критични прагове.
- Предотвратява прекъсването на услугите за крайните абонати, като позволява на операторите да реагират преди настъпването на фатална деградация на сигнала.

Проведените експериментални симулации (включително тежки експлоатационни сценарии като спиране на основното захранване и изкуствено влошаване на параметрите на радиосигнала) категорично потвърждават стабилността и надеждността на предложените решения. Системата демонстрира висока чувствителност и улавя и най-малките отклонения от нормалния режим на работа, което доказва нейната зрялост за внедряване в критични корпоративни, индустриални и градски безжични мрежи.

Разработените методи и средства за интелигентен мониторинг успешно затварят цикъла между теоретичното математическо моделиране на радиоканалите и приложното софтуерно управление на съвременната дигитална инфраструктура. Те осигуряват технологична база за повишаване на сигурността, капацитета и отказоустойчивостта на безжичните комуникационни мрежи в епохата на интензивна дигитализация.

ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научно-приложни приноси:

1. Разработена е комплексна методология за многокритериален анализ и оценка на състоянието на безжичните радиоканали и архитектурен модел за проактивен мониторинг на безжични мрежи, базиран на ефективното съвместяване на стандартни телеметрични протоколи (като SNMP) с алгоритми за динамично следене на параметрите в разнородна хардуерна инфраструктура (multi-vendor среди).
2. Формулирани са критерии и алгоритмични правила за автоматична идентификация на аномалии и пред аварийни състояния, които позволяват математически обосновано прогнозиране на деградацията на връзката преди настъпването на реален срив в комуникацията.
3. Предложен и изследван е новаторски модел на безжичен канал за връзка с интегриран интелигентен алгоритъм за потискане на шума и смущенията. Моделът успешно решава критичния проблем с липсата на коректна информация за състоянието на канала (CSI) чрез прилагане на специализиран обучим модул за филтрация. Това позволява по-точно реконструиране на CSI и постигане на значително по-ниска средноквадратична грешка (NMSE) при прогнозиране спрямо прилагането на традиционни алгоритми.

Приложни приноси:

4. Проектирана, софтуерно реализирана и експериментално верифицирана е специализирана платформа за интелигентен мониторинг, която осигурява надеждно събиране и обработка на данни в реално време за състоянието на безжичната инфраструктура.
5. Разработени са софтуерни решения за графични интерфейси за повишаване на ситуационната осведоменост, включващи интерактивни логически карти върху реален географски фон и оптимизирани визуализации за видео стени в диспечерски и оперативни мрежови центрове (NOC).
6. Разработен е автоматизиран модул за сигнализация и управление на събития, който автоматизира процеса по откриване и локализиране на проблеми в радиоканала на безжичните комуникационни мрежи. Чрез провеждане на серии от тестове в реални условия и симулирани критични сценарии, експериментално е верифицирана високата точност, бързодействие и отказоустойчивост на разработеното решение.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [A.1] Ангелов К., Н. Манчев, С. Садинов, **М. Ангелакис**, Приложение на LoRa за изграждане на платформа за домашна автоматизация в Интернет на нещата. Международна научна конференция UNITECH 2022, 18-19 ноември 2022, Габрово, България, стр. I-228 - I-233, 2022 (ISSN: 2603-378X). (Конференция в НАЦИД)
- [A.2] **Ангелакис М.**, Кипреос Е, Ангелов К., Учебна демонстрационна платформа за IP-видеопоточно предаване и мониторинг на телевизионно съдържание, Сборник доклади: VIII Национална научна конференция с международно участие ТК Ловеч „TechCo 2024”, 28 юни 2024, гр. Ловеч, ISSN 2535-079X, с.112-116. (Конференция в НАЦИД)
- [A.3] **Ангелакис М.**, Кипреос Е., Ангелов К., Универсална интегрирана система за мониторинг в комуникациите, Сборник доклади: VIII Национална научна конференция с международно участие ТК Ловеч „TechCo 2024”, 28 юни 2024, гр. Ловеч, ISSN 2535-079X, с.117-122. (Конференция в НАЦИД)
- [A.4] Попов В., Е. Кипреос, **М. Ангелакис**, Внедряване на 3D обекти при видеообработка, чрез Blender, Студентската научна сесия 2024, 18.10.2024 г. Габрово, ISSN: 1313-3055 (Конференция в НАЦИД)
- [A.5] Тодоров Н., Е. Кипреос, **М. Ангелакис**, Мониторинг на нивото на течност при бутилиране, чрез обработка и анализ на изображения, Студентската научна сесия`2024, 18.10.2024 г. Габрово, ISSN: 1313-3055 (Конференция в НАЦИД)
- [A.6] **Ангелакис М.**, Приложение на технологията за пасивна оптична мрежа с разделяне по дължина на вълната (WDM-PON) за мрежи за достъп, Сборник доклади: IX Национална научна конференция с международно участие ТК Ловеч „TechCo 2025”, 27 юни 2025, гр. Ловеч, ISSN 2535-079X, (под печат). (Конференция в НАЦИД)
- [A.7] Кипреос Е., С. Садинов, **М. Ангелакис**, К. Ангелов, Изследване на ефективността от прилагане на WDM-DCF компенсация във влакнесто-оптични комуникационни системи, Сборник доклади: IX Национална научна конференция с международно участие ТК Ловеч „TechCo 2025”, 27 юни 2025, гр. Ловеч, ISSN 2535-079X, с. 151-156.
- [A.8] **Ангелакис М.**, Изследване на модел на безжичен канал за връзка с интегриран интелигентен алгоритъм за потискане на смущенията, Сборник доклади: Международна научна конференция UNITECH 2025, 20-21 ноември 2025, Габрово, България, ISSN: 2603-378X, стр. 1-7. (Конференция в НАЦИД)

TITLE: “METHODS AND MEANS FOR THE INTELLIGENT MONITORING AND CONTROL OF RADIO CHANNELS IN WIRELESS COMMUNICATION NETWORKS”

Author: Michail Georgios Angelakis

ABSTRACT

In Chapter 1, an analyzes of the current state and areas of research and development in the field of monitoring and control of wireless radio channels in wireless communication networks is conducted. The main problems of the communication environment in this type of networks are analyzed and summarized. As a result, the main goal and objectives of the dissertation work are formulated and motivated.

In Chapter 2, a generalized approach for analyzing signal attenuation and interference in wireless radio channels is presented and developed and studied on a model of a wireless channel for communication with a proposed innovative integrated intelligent algorithm for suppressing interference. The proposed algorithm is analyzed, and its effectiveness is proven through a study with synthetically generated input data for training the model and a comparative analysis of the results obtained with classical algorithms.

In Chapter 3, software planning and construction in a real environment of a wireless P2MP communication network for testing purposes are performed. An experimental study and analysis of the behavior of radio channels is carried out through monitoring and control of wireless radio coverage of the constructed test network. As a result, an approach for optimal planning and optimization of the parameters of wireless radio channels in wireless communication networks is synthesized.

In Chapter 4 of the dissertation, a conceptual design, practical implementation and research of an experimental model of a universal system for intelligent monitoring and control of wireless communication networks are presented. The software architecture of the system, the configuration of its key components and its effective implementation in a real environment for a site - the village of Vodoley are presented. Functional testing and verification of the system in various scenarios and conditions have been carried out, and the experimental results of the measurements carried out are duly presented, discussed and analyzed.

Keywords: wireless communication network, radio channel, channel state information, noise and interference suppression system, intelligent monitoring and control system