



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ ФИЛИАЛ ПЛОВДИВ

**Факултет „Електроника и автоматика”
Катедра „Компютърни системи и технологии”**

Маг. инж. Стефан Николаев Лишев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА ОТДАЛЕЧЕНО ИЗМЕРВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

Област: 5. Технически науки

**Професионално направление: 5.3 Комуникационна и компютърна
техника**

**Научна специалност: Автоматизирани системи за обработка на
информация и управление**

**Научни ръководители: проф. д-р Петя Павлова и проф. д-р Гриша
Спасов**

ПЛОВДИВ, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Компютърни системи и технологии“ към Факултет „Електроника и автоматика“ на ТУ-София-Филиал-Пловдив на редовно заседание, проведено на 10.06.2026 г..

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 25.09.2026 г. от 11,00 часа в зала 3206 на Технически университет – София, филиал Пловдив на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.3-54 / 24.06.2026 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Доц. д-р инж. Николай Каканаков – председател
2. Доц. д-р инж. Дияна Будакова – научен секретар
3. Проф. д-р Росица Донева
4. Проф. д-тн инж. Никола Вичев Колев
5. Доц. д-р инж. Борислав Миленков

Рецензенти:

1. Доц. д-р Николай Каканаков
2. Проф. д-тн инж. Никола Вичев Колев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет „Електроника и автоматика“ на ТУ-София, филиал Пловдив, кабинет № 4242.

Дисертантът е на самостоятелна подготовка докторант към катедра „КСТ“ на факултет ФЕА. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Стефан Лишев

Заглавие: Методи и средства за отдалечено измерване параметрите на атмосферния въздух

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Мониторингът на качеството на атмосферния въздух е от първостепенно значение, поради няколко взаимосвързани причини, оказващи влияние върху човешкото здраве, околната среда и икономическата стабилност. Замяряването на въздуха може да доведе до респираторни заболявания при населението, някои от които са астма, бронхит, рак на белия дроб. Често срещани замърсители на атмосферния въздух са фините прахови частици (PM_{2,5}, PM₁₀), озон (O₃), азотен диоксид (NO₂), серен диоксид (SO₂). Те допринасят пряко за развитието и на сърдечно-съдови заболявания като повишават риска от инфаркти, инсулти и др. Някои групи от населението са особено уязвими и податливи на неблагоприятните ефекти от замърсяването на въздуха – това са децата, възрастните хора и тези със съществуващи здравословни проблеми.

Влиянието на замърсителите на въздуха обхваща също така и околната среда. Те могат да увредят екосистемите като подкиселяват почвите и водните басейни, и да навредят на растителния и животинския свят. Влиянието обхваща освен промяната на рН индекса до вредни стойности, така и запрашването и затрудняването на обмяната на газове и фотосинтезата при растенията. Това може да застраши биоразнообразието като наруши естествените местообитания и въздейства върху оцеляването на видовете. Наред с това някои замърсители на въздуха като въглероден диоксид (CO₂) и метан (CH₄) се явяват като парникови газове, които допринасят за изменението на климата.

Изброените до тук фактори имат и икономическо влияние, тъй като водят до повишени разходи за здравеопазване, поради заболявания и хоспитализации. Друго икономическо въздействие е намалената производителност. Тя се проявява в случаи на понижена работоспособност и загуба на учебни дни в следствие на лошото качество на въздуха. Също така замърсителите на въздуха могат да увредят посевите и да намалят селскостопанските добиви, което води до пряко икономическо въздействие. Замърсеният въздух може да доведе и до щети на инфраструктурата. Те се изразяват в увеличаване на степента на разпадане на сгради и други съоръжения.

Традиционните станции за мониторинг, макар и точни, предлагат ограничена пространствена разделителна способност. За тях е предизвикателство да представят точни данни за замърсяването, поради динамичния характер на разсейването на замърсителите. Сателитите и лидарите имат ниска резолюция на измерванията, което означава, че те не могат да открият фини вариации в замърсяването на въздуха, особено в градска среда. Това затруднява определянето на горещи точки с висока концентрация на вредни вещества в атмосферния въздух. Честотата, с която сателитите „посещават“ определено място е ограничена, поради специфичния им характер на действие.

За преодоляване на тези предизвикателства е необходимо извършване на измервания *in situ*, използвайки мобилни сензорни платформи, базирани на превозни средства и дронове, оборудвани със сензори за измерване на различни параметри на атмосферния въздух. Също така е възможно да се използват преносими устройства, които могат да се местят, за да наблюдават различни зони в града. Отдалеченото измерване на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух предлага множество възможности за подобряване на разбирането и управлението на замърсяването. Чрез комбиниране на различни технологии и методи, може да се постигне по-точно и ефективно наблюдение,

което да подпомогне взимането на информирани решения за опазване на околната среда и здравето на населението.

Тази дисертация се занимава с предизвикателството за постигане на мониторинг на качеството на атмосферния въздух с висока разделителна способност в широка зона чрез разработване и валидиране на нови методи и средства за дистанционно наблюдение, базирани на по-евтини сензорни мрежи, работещи в реално време.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е да се изследват и развият методите и средствата за реализиране на системи за локални и отдалечени измервания на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух като се използват Интернет на нещата (IoT) и облачни изчисления (Cloud Computing).

За постигане на тази цел в настоящия труд се поставят следните задачи:

1. Изследване на методите и средствата за събиране, предаване, обработка и съхранение на данни в системи за измерване на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух, както и средствата за тяхното реализиране.

2. Да се проектира и да се моделира концептуално адаптирана архитектура на IoT базирана система за измерване на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух.

3. Да се изследва приложението на LoRaWAN при реализиране на системи за отдалечено измерване на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух.

4. Да се интегрира система за измерване на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух към облачна среда и да се изследва нейното мащабиране.

Изследванията в дисертационния труд са насочени към методите за събиране, предаване, обработка и съхранение на данни в системите за измервания на параметри на качеството на атмосферния въздух. Наред с това са анализирани методите и средствата за интегриране на тези системи посредством облакова среда.

Научна новост

Научната новост на дисертационния труд се състои в предложения 5-слоен IoT модел, който е адаптиран за целите и нуждите на екологичния мониторинг. Въвеждането на „периферен“ слой позволява оптимизирането на трафика и първичната обработка на данните. Предложена е хибридна мрежова топология, комбинираща локални сензорни клъстери, работещи на 433MHz LoRa, с магистрална връзка към глобалната мрежа чрез 868MHz LoRaWAN. Този подход осигурява висока гъвкавост при разполагане на сензорите в градска среда с труден радиорелеф. Това нововъведение подобрява мащабирането на безжични сензорни мрежи за наблюдение на параметрите на атмосферния въздух, отразяващи неговото качество. Предложен е йерархичен модел на облачна интеграция, базиран на разделяне на функциите за управление на мрежата (The Things Network), от функциите за приложен анализ и визуализация (ThingSpeak).

Проведено е аналитично изследване, на чиято база са направени ключови изводи за приложимостта на предложената система при разгръщане на плътни сензорни мрежи в градска среда.

Практическа приложимост

Резултатите от дисертационния труд имат значителна практическа приложимост в развитието на интелигентни сензорни мрежи за мониторинг на атмосферните параметри в градска среда и изграждането на системи за наблюдение на ключови показатели на въздуха в реално време. Направените аналитични и симулационни изследвания и прототипи за мобилен мониторинг показват практическата приложимост на предложените нововъведения. Част от практическата работа по дисертационния труд е в рамките на изпълнението на научно-изследователски проекти в рамките на Центъра за Компетентност „Интелигентни мехатронни, еко и енергоспестяващи системи и технологии.

Апробация

Работата е докладвана в завършен вид пред разширен състав на катедра „Компютърни системи и технологии“ на ФЕА, ТУ-София, филиал Пловдив.

Резултатите са представени пред:

1. Научната общественост:

- при участието в XXXI международна научната конференция Електроника в Созопол Electronics – ET 2022
- при участието в XXXII международна научна конференция Електроника в Созопол Electronics – ET 2022
- при участието в международната конференция ТехСис (2025)

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 5 бр. научни публикации в издания, 1 бр. от които в научната конференция ТехСис (2025) и е публикувана в MDPI EngProc 2025 в Q3 Scopus. Две са на международната конференция Electronics – ET 2022 и 2023, индексирани в Scopus. Една публикация е със самостоятелно участие и е публикувана в Научни трудове на Съюза на учените в България–Пловдив, 2018.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 140 страници, като включва увод, 5 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 114 литературни източници, като 101 са на латиница и 1 на кирилица, а останалите са

интернет адреси. Работата включва общо 72 фигури и 13 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

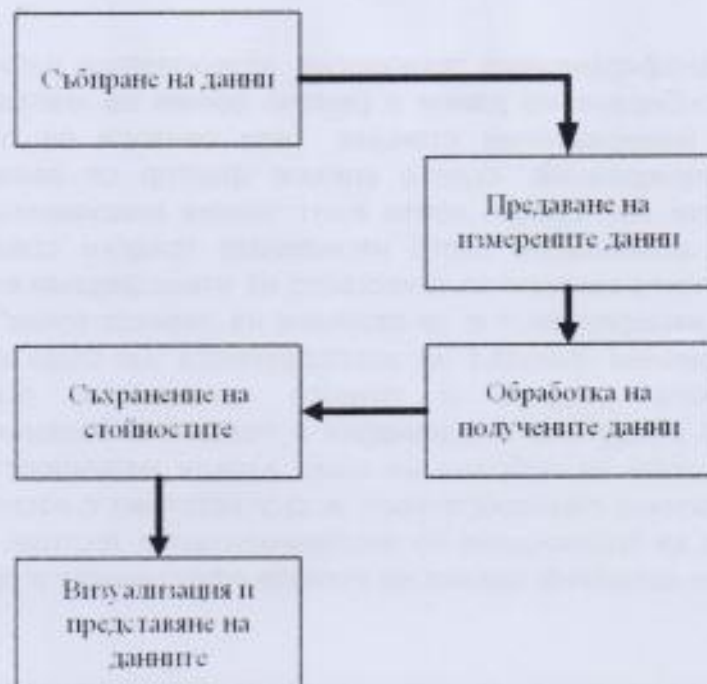
ГЛАВА 1. ОБЗОР ПО ПРОБЛЕМА

Интелигентните сензорни системи играят ключова роля в мониторинга на качеството на атмосферния въздух. Те използват съвременни технологии за събиране, обработка и анализ на данни в реално време, което позволява бързо реагиране на промените в качеството на въздуха и вземане на информирани решения. Интеграцията на Интернет на нещата (IoT) и облачни технологии в сферата на системи за измерване на параметри на качеството на атмосферния въздух предлага нови възможности за постигане на висока ефективност и оптимизация, което е важна задача за проектирането на интелигентните системи за мониторинг на качеството на въздуха. Това зависи както от апаратното, така и от алгоритмичното осигуряване на управляващите системи. Адаптирана IoT архитектура може да интегрира различни компоненти и технологии, за да осигури ефективно събиране, предаване, обработка и съхранение на данни при интелигентните системи за мониторинг на качеството на въздуха. •

Традиционните дистанционни методи за измерване на качеството на атмосферния въздух, макар и мощни, имат присъщи ограничения. Безжичните сензорни мрежи в комбинация със сензори с ниска цена предлагат възможности за реализиране на интелигентните системи за мониторинг на качеството на въздуха с висока разделителна способност за нивата на замърсяване на въздуха в реално време. Това е особено ценно за проследяване на бързите промени в нивата на замърсяване. Ниско-стойностните сензори са със значително по-ниска цена от традиционното оборудване за мониторинг, което прави мониторинга на качеството на въздуха по-достъпен за общностите и изследователите. Това позволява разгръщането на много по-големи мрежи за същата цена.

ГЛАВА 2. Методи и средства за събиране, предаване, обработка и съхранение на данни в системи за измервания на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух

В тази глава се разглеждат детайлно различните подходи при мониторинга на атмосферния въздух и се анализират техните предимства и ограничения. Заедно с това се разглеждат методите и средствата за предаване на данни, тяхното съхранение и последваща обработка. Всеки един елемент от споменатите средства играе ключова роля за успешното и прецизно събиране, представяне и оценка на получените данни. Фигура 2.1 представя работния процес и потока от данни, които се генерират и обработват в този род системи за отдалечено измерване на параметрите, показващи качеството на атмосферния въздух.



Фигура 2.1. Работен процес и поток на данните при екологичен мониторинг

Фигурата представя последователността на основните етапи при функционирането на система за отдалечено измерване на параметри, характеризиращи качеството на атмосферния въздух, включваща събиране, предаване, обработка, съхранение и визуализация на измерените стойности.

2.1.4 Дистанционно измерване

Дистанционните методи за изследване на атмосферата (Remote Sensing) представляват неотменна част от съвременните глобални и регионални стратегии за мониторинг на качеството на въздуха, допълвайки данните от наземните in-situ станции чрез осигуряване на широкомащабно пространствено покритие. Тези методи се базират на измерването на електромагнитното излъчване, отразено или излъчено от земната повърхност и атмосферата, като позволяват количествена оценка на атмосферните замърсители чрез анализ на спектралните характеристики при поглъщане и разсейване на светлината [52].

Въпреки своите предимства за широкообхватен анализ, методите за дистанционно изследване имат ограничения, свързани с наличието на облачна покривка, която възпрепятства оптичните измервания, както и с по-ниската времева разделителна способност (обикновено едно преминаване на ден за полярно-орбиталните сателити). Следователно, интегрирането на сателитни данни с наземни сензорни мрежи (Data Fusion) се разглежда като най-перспективният подход за постигане на пълна пространствено-времева картина на качеството на атмосферния въздух.

2.1.5 Ниско-стойностни сензори

Наблюдението на параметрите на атмосферния въздух играе ключова роля за разбирането на процесите и произтичащите промени в околната среда под влиянието на климатичните фактори и въздействието на човешката дейност. Традиционните станции за измерване на качеството на атмосферния въздух притежават висока точност, но също така имат и някои недостатъци – висока цена за експлоатация и поддръжка, изискване за специално обучен персонал, ограничена площ на покритие. За разлика от тях, ниско-стойностните сензори се

явяват като трансформираща технология, позволяваща широко разпространено внедряване и събиране на данни в реално време на малка част от цената на традиционните измервателни станции. Тези сензори са особено полезни за дистанционни измервания, където ключов фактор се явяват достъпността и мащабируемостта им. Среди, които имат такива изисквания за провеждане на измервания са обикновено гъсто населените градски среди или отдалечени райони. Бюджетните сензори за качеството на атмосферния въздух са подходящи за индикативни измервания, т.е. за засичане на „горещи точки“ на замърсяване. Поради тези причини фокусът на изследванията ще бъде съсредоточен върху ниско-стойностните сензори и тяхното приложение при измервания на параметрите на въздуха в стационарни и подвижни безжични сензорни мрежи. Подбраните сензори са избрани не само заради наличността им, но и поради тяхната технологична разнообразност, в съответствие с изследователските цели и възможността за провеждане на експериментални тестове, които ще позволят да се направи по-детайлна оценка на тяхната ефективност и приложимост.

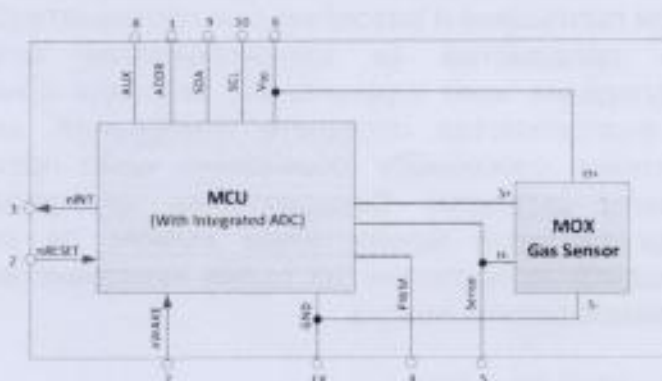
2.1.5.1 CCS811

Сензорът може да измерва два параметъра на атмосферния въздух:

- летливи органични вещества като сума tVOC
- съдържание на еквивалентен въглероден диоксид eCO₂

Летливите органични вещества (VOC) се представят като брой части на милиард (parts per billion – ppb). CCS811 може да измерва стойности на VOC в диапазона от 0ppb до 1187ppb. Според документацията, летливите органични вещества се измерват като сума на концентрацията на смес от въздух и типична смес на VOC за затворени пространства. Освен това, в документацията се посочва, че измерваните стойности ще се различават от истинските в случай, че ако в средата, където се извършват измервания на параметрите на атмосферния въздух, присъстват химични съединения в много различно отношение от предвидените от производителя. Стойностите на измерване на eCO₂ са от 400ppm до 8192ppm.

На фигура 2.1 е представена блоковата диаграма на сензора CCS811:



Фигура 2.2 Блокова диаграма на CCS811

Измерващият елемент е от типа метален оксид (MOX). Заедно с него в корпуса е интегриран микроконтролер, който чрез своя АЦП извършва измерване на пада на напрежението на сензорния елемент. Препоръчва се от производителя CCS811 да се използва заедно в комбинация с външен сензор за температура и влажност с цел компенсация на възникващите грешки на измерените стойности в следствие на условията на средата, в която се използва сензорът.

2.2.2. Безжични методи за комуникация

Безжичните методи за предаване на данни са предпочитани при свързване на IoT сензори, тъй като позволяват бързо, гъвкаво и икономически ефективно разгръщане на безжични сензорни мрежи. Те елиминират нуждата от физически кабели, което е особено полезно при урбанизирани, отдалечени или трудно достъпни райони. В зависимост от скоростта, обхвата и консумацията на енергия те могат да се класифицират в няколко групи:

- **Клетъчни мрежи (4G/5G/NB-IoT/6G)** При технологии като LTE (4G) и 5G се използва лицензиран честотен спектър. Те предлагат висока пропускателна способност, но са енергийно не ефективни за сензори, предаващи малки пакети от данни, като тези, използвани при мониторинга на атмосферния въздух. Narrowband IoT (NB-IoT) е оптимизирана версия за IoT приложения. Въпреки, че NB-IoT предлага отлична плътност на свързване, той консумира повече енергия от LPWAN алтернативите поради необходимостта от честа синхронизация с базовата станция и генерира оперативни разходи (OPEX) за абонаментни такси.
- **Безжични локални мрежи (WLAN).** Семействата протоколи 802.11 представляват стандарти за високоскоростен трансфер на данни на близки разстояния – до около 100 м. Протоколите от тази фамилия не са достатъчно ефективни за автономни сензори, поради високата консумация в режим на готовност и ограничения обхват, силно зависим от препятствията между предаващите устройства и шлюза.
- **Мрежи с ниска консумация и голям обхват (LPWAN).** LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) е LPWAN протокол, опериращ в нелицензирания суб-гигагерцов спектър. С помощта на CSS (Chirp Spread Spectrum) модулацията, LoRaWAN осигурява връзка тип "звезда" (Star topology) с радиус 2-5 км в градска среда, и 10-15 км в селски райони, премахвайки нуждата от сложни клетъчни топологии като при ZigBee.

Сравнителният анализ показва, че докато ZigBee и BLE имат своите приложения в интелигентните сгради и персоналният мониторинг, LoRaWAN е единствената технология, която удовлетворява едновременно изискванията за голям обхват, ниска консумация и мащабируемост, необходими за автономна градска система за мониторинг на въздуха. В Таблица 2.1. са представени ключовите параметри, на основата на които е избран за изследване протоколът LoRaWAN.

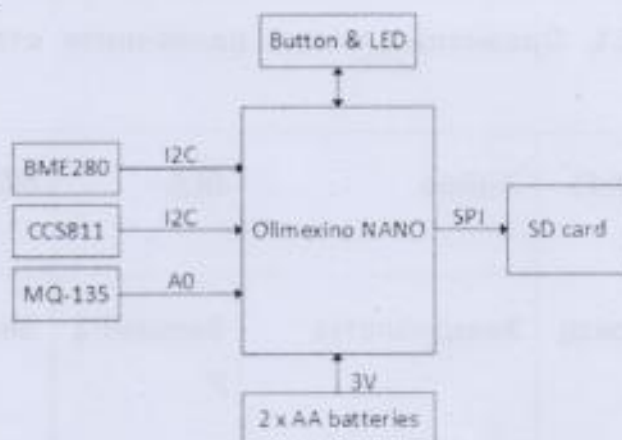
Таблица 2.1. Сравнение между различните стандарти за безжична връзка

Параметър	Wi-Fi	ZigBee	BLE	NB-IoT	LoRaWAN
Топология	Звезда	Звезда/клетка	Звезда/P2P	Звезда	Звезда от звезди
Скорост	Висок	Средна	Висока	Ниска	Ниска

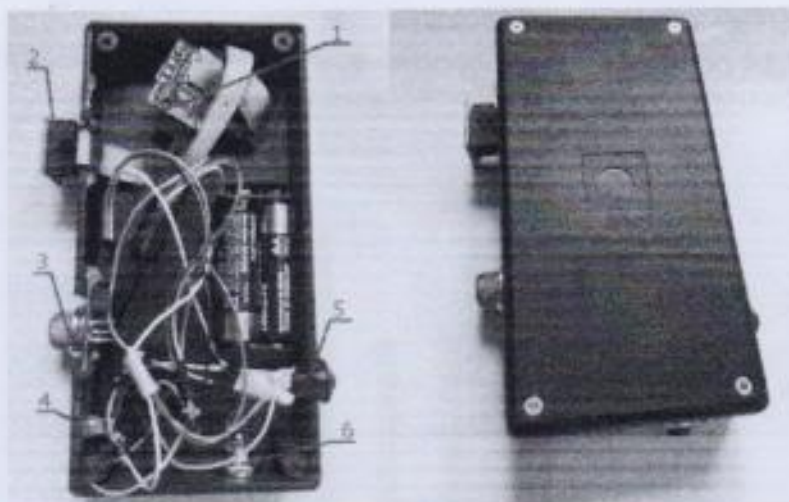
	а				
Обхват	До 100м	От 10 до 100м	До 50м	Над 10км	От 2 до 15км
Консумирана енергия	Висока	Средна	Ниска	Средно висока	Много ниска
Приложение	В сгради	Индустриални/умен дом	Преносими устройства	Критична инфраструктура	Умен град

2.5. Опитни резултати от тестови измервания

За целите на изследването беше изградена опитна микроконтролерна система за наблюдение качеството на атмосферния въздух. В нея са използвани ниско-стойностни сензори от разгледаните в предишните раздели на настоящата дисертация – CCS811, BME280, MQ-135. Първите два сензора са използвани като модул – MOD-ENV на фирмата Olimex. Вторият сензор, BME280 измерва температура, относителна влажност и атмосферно налягане. Двата измерващи елемента са включени чрез интерфейс I²C към управляващия микроконтролер. И двата сензора предоставят измерените данни в цифрова форма, което се явява удобство при извършване на измервания, тъй като не се налага да се използва аналогово-цифровия преобразувател на използвания микроконтролер. Третият сензор е MQ-135, който представлява отново устройство от класа на металния оксид, като неговият интерфейс е аналогов. Тестовото устройство е базирано на 8-битовия микроконтролер ATMEGA32U4-AU. Той управлява режима на работа на цифровите сензори – BME280 и CCS811, както и обработката и съхранението на данните в SD-карта.

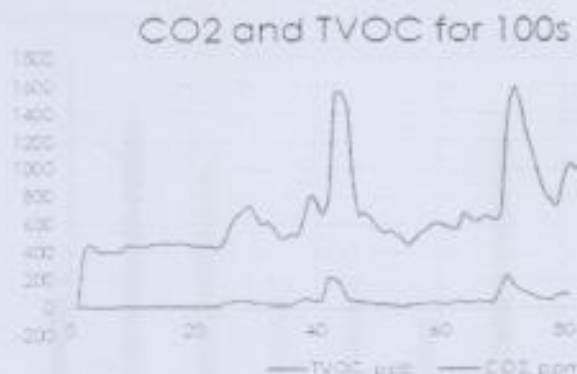


Фигура 2.9 Блокова схема на свързване на тестовото устройство за събиране на данни за параметрите на атмосферния въздух



Фигура 2.10 Външен изглед на създадения прототип

На **Фигура 2.11**, са представени данните, които се получават от сензора CCS811 при измерване на всяка секунда, като общото време за измерване е 100 секунди. На графиката могат да се видят стойностите за нивата на въглероден диоксид и тези на общата сума от летливи органични вещества.



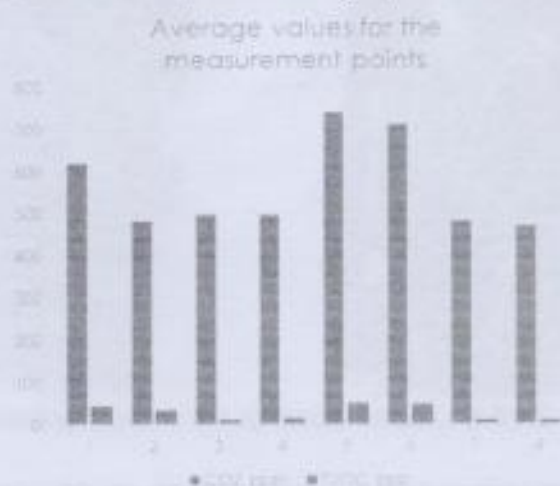
Фигура 2.11 Експериментални полеви измервания с CCS811 при зона с източници на летливи органични вещества

На **Фигура 2.13**, е представена карта на точките в гр. Пловдив, в които са направени тестови измервания на параметри, показващи качеството на атмосферния въздух. Както се вижда от фигурата, избрани са възлови улици и булеварди, при които се наблюдава засилен трафик на превозни средства.



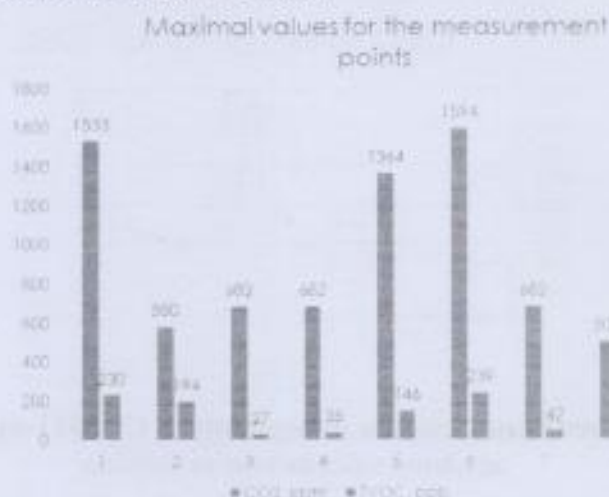
Фигура 2.13 Карта на точките на проведените измервания

На **Фигура 2.14** са представени средно-аритметичните стойности от направените опитни измервания с мобилното преносимо устройство.



Фигура 2.14 Средно-аритметични стойности на измерванията

На **Фигура 2.15** са представени максималните, измерени стойности при провеждането на тестовите измервания.



Фигура 2.15 Максимални стойности на измерванията

От анализа на резултатите, получени от полевите измервания може да се заключи, че при силно натоварени градски кръстовища се наблюдава повишено замърсяване на въздуха – точки 5 и 6. От друга страна, при кръстовища, до които са разположени зелени площи, се наблюдава известно понижение на замърсяването. Предложеното мобилно устройство за индикативни измервания позволява маркиране на „горещи“ точки в градска среда, при които има завишено замърсяване на атмосферния въздух.

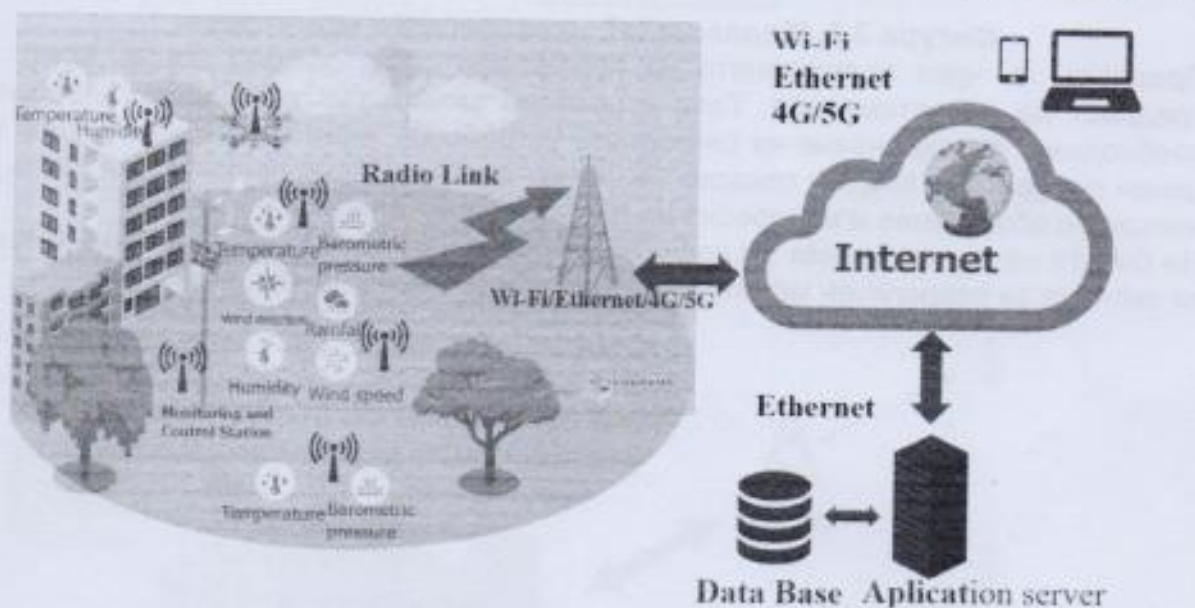
ГЛАВА 3. Приложение на IoT архитектури при реализиране на системи за локални и отдалечени измервания на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух

Интернет на нещата (IoT) предлага значителни предимства при внедряването на системи за локални и дистанционни измервания на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух. Адаптирана IoT архитектура може да интегрира различни компоненти и технологии, за да осигури ефективно събиране, предаване, обработка и съхранение на данни. Използването на IoT за дистанционни измервания на качеството на атмосферния въздух е бързо

развиваща се област със значителни последици за общественото здраве, която позволява ефективен мониторинг на околната среда.

3.3. Адаптирана IoT архитектура за екологичен мониторинг

На Фигура 3.2. е представен общ вид на IoT архитектура за екологичен мониторинг. Както се вижда от фигурата, системата използва протокол за радиовръзка с цел предаване на измерените данни от сензорните устройства базовата станция. Този протокол е от групата на LPWAN стандартите, които позволяват работа на големи разстояния при ниска консумация на енергия. След като данните се получат в базовата станция, тя ги предава чрез IP протокол или чрез клетъчни мрежи, например Wi-Fi към облачната среда, където се намира базата данни за съхранение и обработка на стойностите. В облачната среда е и приложният сървър, който служи за идентификация, авторизация и предоставяне на удобен потребителски интерфейс за крайния потребител. Той има възможност да се свърже към системата чрез персонален компютър или мобилен телефон.

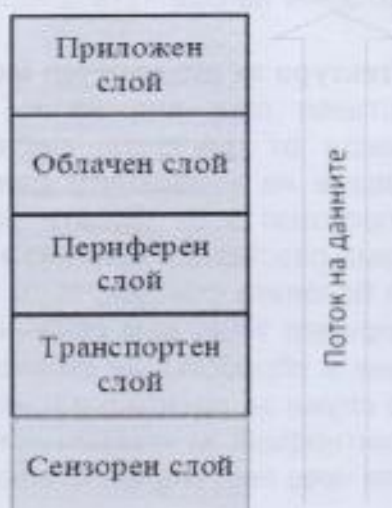


3.2. Общ вид на IoT система за екологичен мониторинг

Една система за наблюдение на параметри, показващи качеството на атмосферния въздух най-често се налага да работи в градска среда, при която има множество източници на електромагнитни смущения. Поради тази причина се налага да се използва подходящи методи за радио връзка, които позволяват надеждна и сигурна комуникация. Сензорите за измерване на параметри на атмосферния въздух са част от сензорни устройства, които могат да бъдат монтирани в различни части на града, или може да бъдат прикрепени към специализиран дрон, с цел изследване на вертикалното разпределение на целевите вещества, както и разпределението на температурата и влажността в различните области на приземните слоеве на атмосферния въздух.

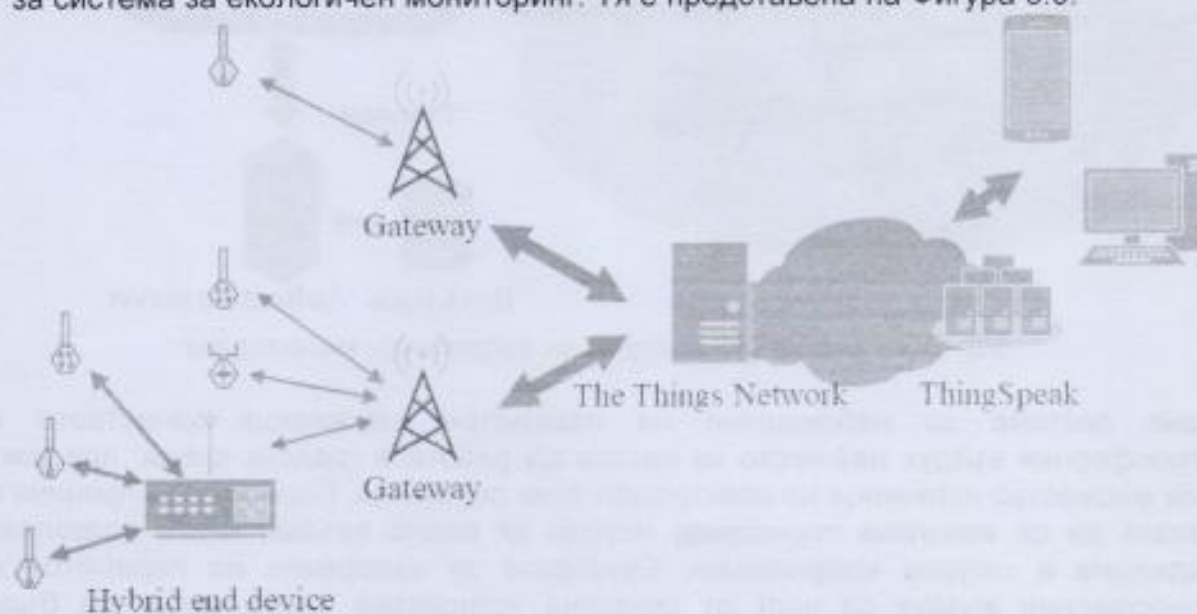
За целите на настоящата дисертация е представена адаптирана архитектура за използване в системи за екологичен мониторинг. Тя се основава на класическите IoT модели, като добавя и променя слоеве, запазвайки концептуалната рамка. Адаптирането е необходимо, за да се отчетат специфичните особености на такъв тип системи за измерване на параметри, показващи качеството на атмосферния въздух.

На Фигура 3.3. е представен предложения адаптиран IoT модел за системи, измерващи параметри на атмосферния въздух.



Фигура 3.3. Модел на IoT за екологичен мониторинг

Предлага се, чрез въвеждането на периферен слой, обемът данни, които се предават да се оптимизира. Това е особено важно, тъй като освен енергията, необходима за захранване на сензорните устройства, ефирното време е дори по-ценен ресурс при плътни градски безжични мрежи. Периферният слой може да извършва обобщение и компресия на данните, получени от сензорите. На базата на предложения 5-слоен IoT модел е изградена хибридна архитектура за система за екологичен мониторинг. Тя е представена на Фигура 3.5.



В контраст с подобни разработки, които използват LoRa или друга модулация/комуникационен стандарт [97, 98, 99], в настоящия дисертационен труд е предложен хибриден модел на комуникационната система, при който крайно измервателно устройство е снабдено с два модема – един, работещ на стандартната честотна лента за Европейския съюз около 868 MHz, и втори модем, който работи с LoRa модулация в честотната лента 433 MHz. Използването на по-ниска честота позволява покриване на голяма площ на измерване, отвъд ограниченията на по-високата честота от 868 MHz. Това крайно устройство, наречено хибридно крайно устройство, може да работи в два режима – като релейно устройство, което препредава получените пакети данни, или като такова, което поддържа собствена мрежа от крайни устройства. Във втория случай то има достъп до данните, които получава и може да ги обобщава, с цел оптимизация на

използването на LoRaWAN мрежата, както и оптимизиране на използваната енергия.

ГЛАВА 4. Глава 4: Приложение на LoRaWAN при реализиране на системи за измервания на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух

При IoT системи за отдалечено наблюдение на параметри, показващи качеството на атмосферния въздух много често сензорните мрежи са географски разпръснати на големи площи. Това налага използването на безжичен протокол за връзка, който позволява комуникация на големи разстояния. Наред с това, сензорните устройства трябва да могат да работят за продължителни периоди от време, без да се налага поддръжка, особено при трудно достъпни райони. Необходимо е сензорните устройства да бъдат оптимизирани за работа дълго време, без да се налага смяна на хранящите батерии. Поради изброените причини е необходим метод за комуникация, който да отговаря на тези специфични изисквания.

Работната хипотеза, която се предлага е, че стандартът LoRaWAN отговаря на тези изисквания и, че при оптимално конфигуриране на безжичната сензорна мрежа е възможно да бъдат удовлетворени изискванията за екологичен мониторинг, посочени по-горе.

Стандартът LoRaWAN предлага значителни предимства при безжични сензорни мрежи за измерване на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух:

- Комуникация на големи разстояния – LoRaWAN се отличава с възможност за комуникация на големи разстояния, позволявайки сензорните устройства да предават данни успешно на разстояние от няколко километра, дори в предизвикателни среди. Това е от решаващо значение за наблюдение на качеството на въздуха в отдалечени или големи райони.
- Ниска консумация на енергия – LoRaWAN е проектиран за ниска консумация на енергия, което позволява на сензорите да работят на батерии за продължителни периоди от време. Постигането на комуникация при ниско потребление на енергия при този стандарт в голяма степен се определя от високата максимална чувствителност при приемане – достигаща до -148 dBm, съчетана с високата устойчивост на смущения и шум в ефира. Възможно е успешно приемане на изпратените данни, дори ако целевият сигнал е до -20dBm под нивото на фоновия шум [100]. Както посочва P. Fraga-Lamas et al. [101], при стационарни устройства и използване на насочени антени за приемане от типа „Yagi-Uda“ и др., се постига комуникация с много ниска мощност на излъчване.
- Ефективност на разходите – ниските изисквания за мощност и опростената инфраструктура на LoRaWAN допринасят за рентабилно внедряване и поддръжка на мрежи за мониторинг на качеството на въздуха.
- Мащабируемост – LoRaWAN мрежите могат да поемат голям брой сензори, което ги прави подходящи за широко разпространени инициативи за мониторинг на качеството на въздуха.

4.1 Основни характеристики на протокола LoRaWAN

Безжичната мрежа, базирана на LoRaWAN се основава на два ключови компонента – LoRa и LoRaWAN. Първият компонент представлява физическият слой, т.е. специфичната модулация на радио сигнала, която се използва. Вторият компонент е каналният слой (MAC слой), който използва LoRa модулация за надеждно предаване и приемане на данни, включително управлението и конфигурирането на крайните устройства и изгражда цялостния LoRaWAN протокол.

LoRa дефинира фактора на разпространение по следния начин [104]:

$$2^{SF} = \frac{B}{R_s} = B \cdot T, \quad (4.1)$$

Където SF, B, R_s и T са фактор на разпространение, ширина на честотната лента, скорост на предаваните символи и продължителност на един chirp. Вещност той е оригиналният базов елемент при този вид модулация и може да бъде описан така:

$$c(t) = \begin{cases} \exp(j\phi(t)) & \text{ако } -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}, \\ 0 & \text{в противен случай} \end{cases} \quad (4.2)$$

където $\phi(t)$ представлява големината на фазата на chirp-a. Моментната честота се определя като:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (4.3)$$

За линейни chirp-ове, като тези използвани при LoRa, моментната честота се дефинира по следния начин:

$$f_{lc}(t) = f_c + \mu \cdot \frac{B}{T} \cdot t, \quad (4.4)$$

Където f_c е централната носеща честота. Ако $\mu = 1$ се получава линейно нарастващ chirp, докато при $\mu = -1$ се получава chirp с линейно намаляваща честота, а B съответства на спектралната заетост от сигнала, както и на разликата между минималната и максималната моментна честота по време на chirp-a. За получения сигнал, след LoRa модулацията, е в сила зависимостта [106]:

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (4.6)$$

Където: R_s е скоростта на предаване на символите, BW е ширината на честотната лента, а SF е факторът на разпространение. От тук получаваме и скоростта на предаване на информацията в битовете за секунда:

$$R_b = BW \times R_s \times FEC \quad (4.7)$$

Където R_b е скоростта в битовете за секунда, а FEC е количеството добавени битовете за коригиране на грешки – Forward Error Correction. Скоростта на chirp-овете R_c може да се изчисли така:

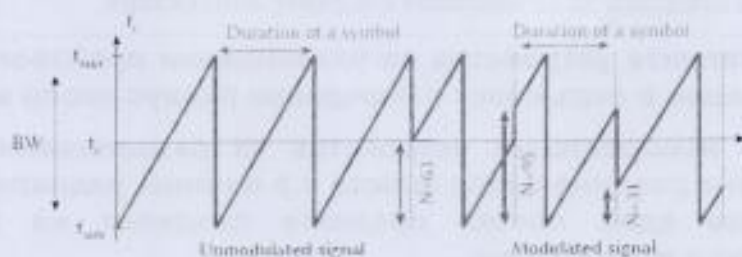
$$R_c = BW \times R_s = \frac{BW^2}{2^{SF}} \quad (4.8)$$

Както се вижда, в зависимост от зададените фактор на разпространение SF, ширина на честотната лента BW и броят добавени битовете за коригиране на грешки се получава скоростта на предаваните данни, Data Rate (DR) в бита за секунда:

$$DR = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR \quad (4.9)$$

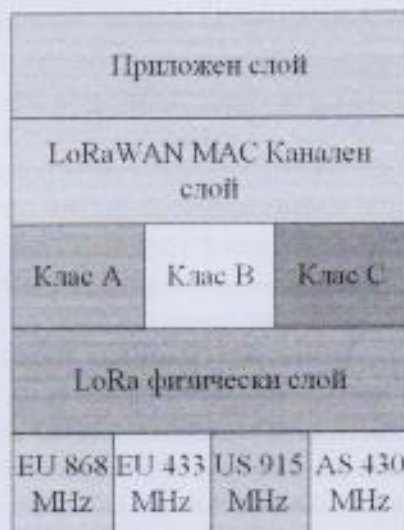
Полученият сигнал е изключително устойчив на смущения и може да бъде декодиран, дори ако е до 20dB под прага на фоновия шум в радио ефира при използваната честотна

област. В приемника се извършва същият ред от операции върху сигнала с цел декодирането му и възстановяване на кодираната информация. На Фигура 4.4. е представен немодулиран и модулиран сигнал с LoRa модулация [107]:



Фигура 4.4. Немодулиран и модулиран LoRa сигнал [107]

На лявата част на фигурата е представен немодулиран LoRa сигнал. Той се променя линейно от долната граница f_{min} на използваната честотна лента, до горната граница f_{max} , а f_c е носещият сигнал. В дясната част на фигурата е представен модулиран LoRa сигнал, като в представения пример е използван фактор на разпространение $SF = 7$ и са модулирани няколко символа, всеки от които съдържа SF бита. При $SF = 7$ може да имаме стойности между 0 и 127. Когато се изпращат съобщения от шлюза към крайните устройства се използва обратно поляризиран сигнал с цел да не се преплитат двата потока от съобщения – тези от крайните устройства към шлюза (uplink) и тези в обратната посока (downlink). На базата на разгледаната модулация е изграден LoRaWAN протоколът, който се явява като канален слой по отношение на OSI модела – Фигура 4.5.



Фигура 4.5. Протоколен стек на LoRaWAN

Както се вижда от фигурата, за различни региони от света, се използват различни честотни ленти, заедно с различни правила за достъп до радио ефира.

4.2 Аналитично изследване на LoRa/LoRaWAN при градски условия

Ако се разгледат всички възможни комбинации от параметри на LoRa връзката може да се заключи, че техният брой е голям, като според Bor & Roedig [111] те са 6720. Тази стойност се получава, като се вземат предвид и различните мощности на предаване, комбинирани с различните фактори на разпространение, ширина на използваната честотна лента, брой битове за корекция и тн. Това създава предизвикателства за техния подбор и конфигуриране. Съществува дефицит при математическите модели и алгоритмите. В литературата са предлагат различни решения на тази задача за управление на ресурсите.

Поради горепосочените фактори за целите на изследването на възможностите за мащабиране на система за екологичен мониторинг, която използва LoRaWAN протокол за комуникация, се предлага да се направят следните допускания:

1. Измервателните устройства са разположени произволно, независимо и равномерно в окръжност с определен радиус около един шлюз.
2. Крайните измервателни устройства са разположени равномерно в двуизмерна равнина около шлюза и е на лице радиална симетрия, т.е. във всяка една посока средната плътност на измервателните устройства е една и съща.
3. Данни от крайните устройства се изпращат един път на всеки час.

Тъй като LoRaWAN мрежите използват като дисциплина за достъп до мрежата способът чиста "ALOHA" (Pure ALOHA), то събитието на изпращане на данни от дадено крайно устройство може да се моделира като случайно събитие, въпреки че това се случва през крайни определени интервали от време в общия случай. Ако се подходи по начин, който позволява процесът да се разглежда в голяма степен случаен, като например да се въведе генериране на закъснение със случаен характер преди изпращане на измерените стойности, то събитието на предаване на данни от крайните устройства може да се моделира чрез разпределение на Поасон. Това се прави с цел улесняване на аналитичното изследване на поведението на мрежата от устройства. При системите за мониторинг на качеството на атмосферния въздух сензорните устройства се разполагат така, че да покриват определена област равномерно. Това от своя страна позволява, за целите на изследването на процентът успешно предадени пакети от данни, местоположението и броят на сензорните устройства да се моделира чрез математическия апарат на стохастичната геометрия, съчетана с Хомогенен Поасонов точков процес [113]. Стохастичната геометрия като дял на теорията на вероятностите се занимава с моделирането и анализа на случайни пространствени процеси [106, 107, 108]. Основен инструмент на стохастичната геометрия е точковият процес, като най-често се използва именно Поасоновият точков процес (Poisson point process – PPP) [112]. При него се приема, че точките са разпределени независимо една от друга и равномерно в пространството с определена средна интензивност (плътност) – λ . Тя се задава за определена единица площ. При безжичните мрежи това позволява моделиране на смущенията между отделните предаватели, като техните позиции се моделират като PPP. Друга цел, с която се използва за моделиране стохастичната геометрия е да се направи оценка дали дадена точка (в случая устройство) ще има покритие на сигнала. Анализът често включва изчисление на средни стойности на показатели сигнал-шум (Signal to Noise Ratio – SNR) или сигнал-смущения-шум (Signal to Interference to Noise Ratio – SINR).

За референтен предавател, намиращ се на разстояние r_0 от шлюза, получаваме:

$$P_z(r_0) = \exp\left(\frac{-\theta \sigma^2 r_0^{\frac{\alpha}{p}}}{p}\right) \times \exp\left(-\lambda \pi \left(\frac{\theta r_0^{\frac{\alpha}{p}}}{1}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \times P_a^{\frac{2}{\alpha}} \times C(\alpha)\right) \quad (4.21)$$

Тук два члена имат чисто физически смисъл:

- $\exp\left(-\theta \sigma^2 r_0^{\frac{\alpha}{p}}\right)$ – компонент, който е ограничен от фоновия шум, намалява с разстоянието
- $\exp\left(-\lambda \pi \theta^{\frac{2}{\alpha}} r_0^2 C(\alpha)\right)$ – това е компонент, който се ограничава от

смушенията между предаващите устройства. Расте с увеличаване на плътността на устройствата λ .

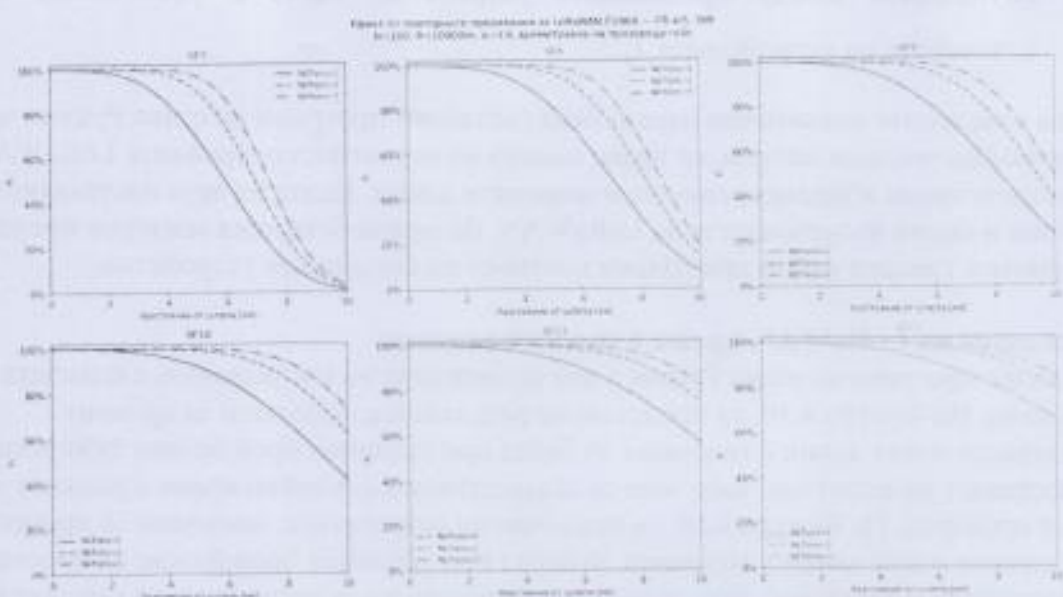
На базата на изведените аналитични изрази бяха съставени програми на езика Python, чрез които използвайки числени методи, се прави оценка на вероятността крайните LoRaWAN сензорни устройства да изпратят успешно измерените данни. Целта на тези изследвания е да се установи и оцени възможността на LoRaWAN, базирана безжична сензорна мрежа да бъде разгърната в градски район при голяма плътност на сензорните устройства.

4.2.1. Изследване на LoRaWAN мрежа в градски условия

Създадена беше програма на езика Python с цел провеждане на изследвания, с помощта на числени методи. На Фигура 4.10. са представени резултатите, получени за процент успешно изпратен пакет данни с големина 36 байта при различен брой битове за корекция. Данни се изпращат на всеки час, като това се осъществява в случайно време в рамките на 60-секунден прозорец. На Фигура 4.10. са представени резултатите, получени за процент успешно изпратен пакет данни с големина 36 байта при различен брой битове за корекция. Данни се изпращат на всеки час, като това се осъществява в случайно време в рамките на 60-секунден прозорец.

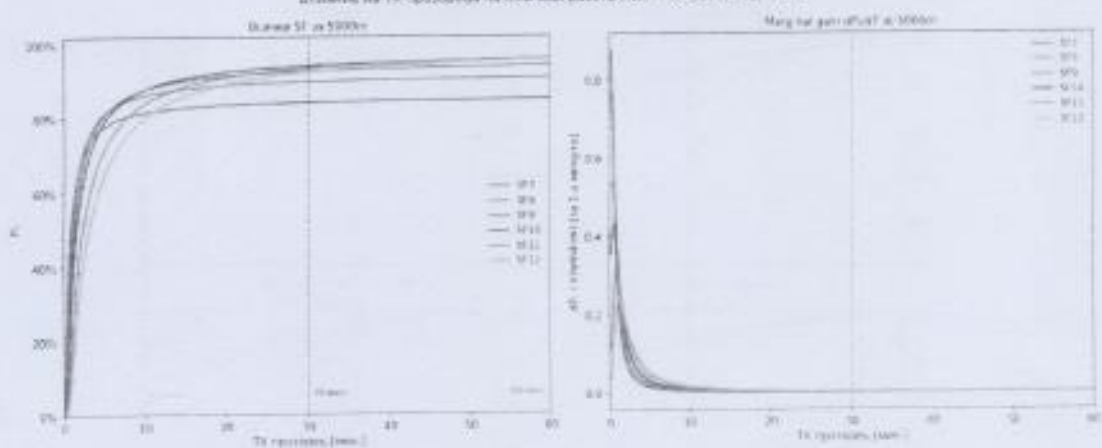
Фигура 4.10. Изследване на качеството на връзката при различен брой битове за корекция

Тъй като изпращането на пакет данни е в режим без потвърждение, шансът за успешно предаване се увеличава ако пакетът данни се изпрати повторно още един или два пъти. Ефектът от повторните предавания може да се види на Фигура 4.11.

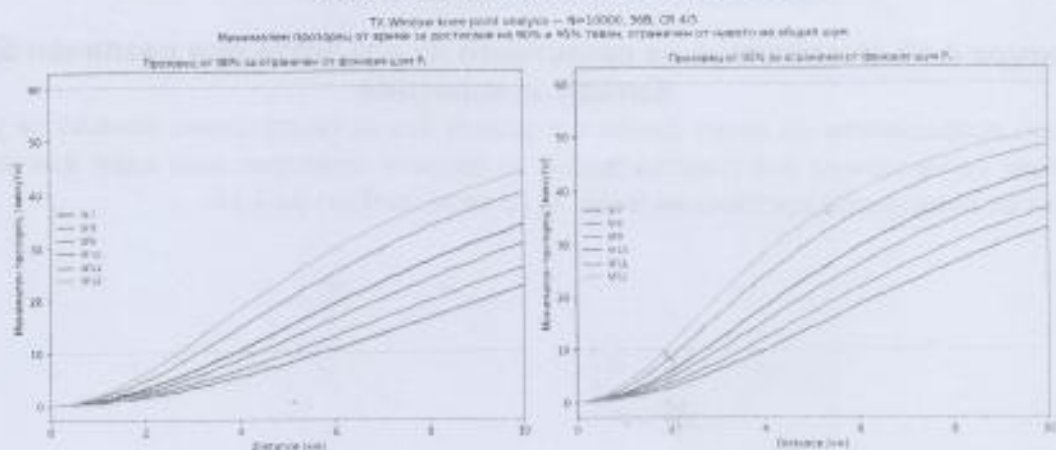


Фигура 4.11. Влияние на повторните предавания

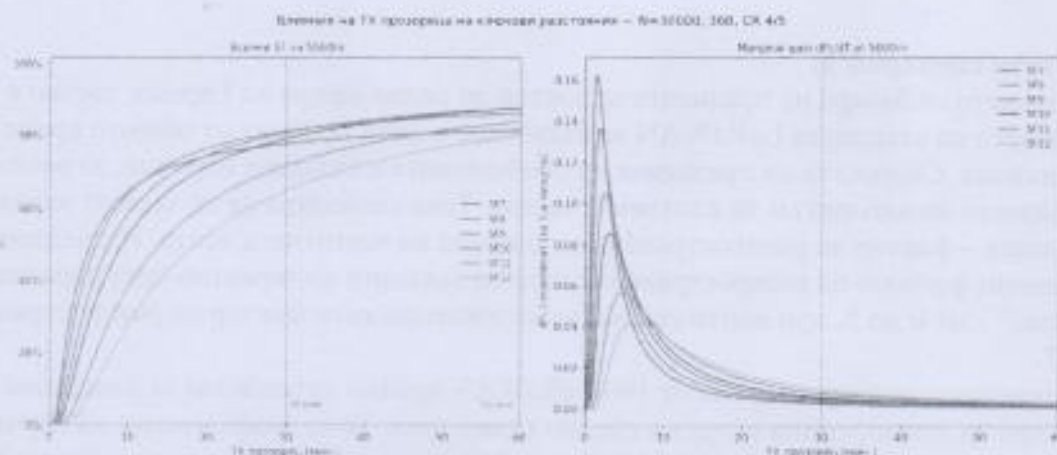
Влияние на TX прозореца на ключови разстояния – N=5000, 348, SF 475



Фигура 4.18. Влияние на TX прозореца за комуникация на разстояние от 5000m и брой на LoRaWAN крайните устройства – 5000



Фигура 4.21. Влияние на TX прозореца за комуникация при различни разстояния на крайните устройства от шлюза в центъра на окръжността на разполагане и брой на LoRaWAN крайните устройства – 10 000



Фигура 4.22. Влияние на TX прозореца за комуникация на разстояние от 5000м и брой на LoRaWAN крайните устройства – 30 000

При моделирането на енергийната консумация на LoRaWAN крайни устройства могат да се разграничат няколко режима на работа:

- **Предаване:** най-енергоемкият режим, когато устройството предава данни към шлюза
- **Приемане:** устройството приема потвърждение или данни от шлюза ако е конфигурирано за двупосочна комуникация
- **Сън:** режим с най-ниска консумация, когато устройството е неактивно
- **Обработка:** енергия изразходвана за обработка на данни или управление на сензори.

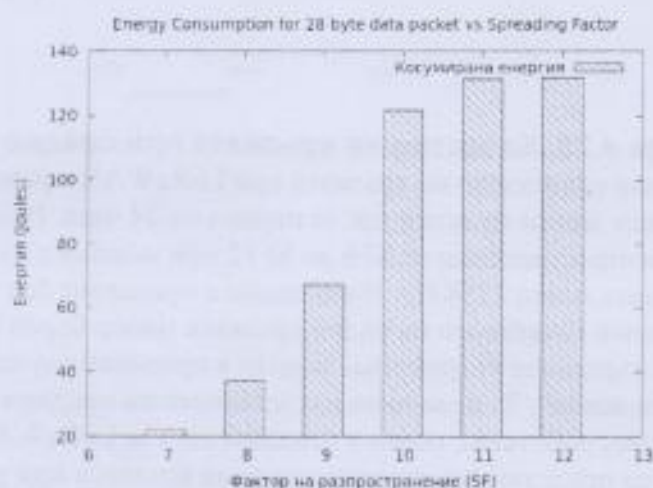
Енергийната консумация за един цикъл може да се изрази като:

$$E = E_{TX} + E_{RX} + E_{sleep} + E_{proc}, \quad (4.22)$$

където:

- E_{TX} : Енергия за предаване
- E_{RX} : Енергия за приемане
- E_{sleep} : Енергия в режим на сън
- E_{proc} : Енергия за обработка на данните

Получените резултати са представени на Фигура 4.26.



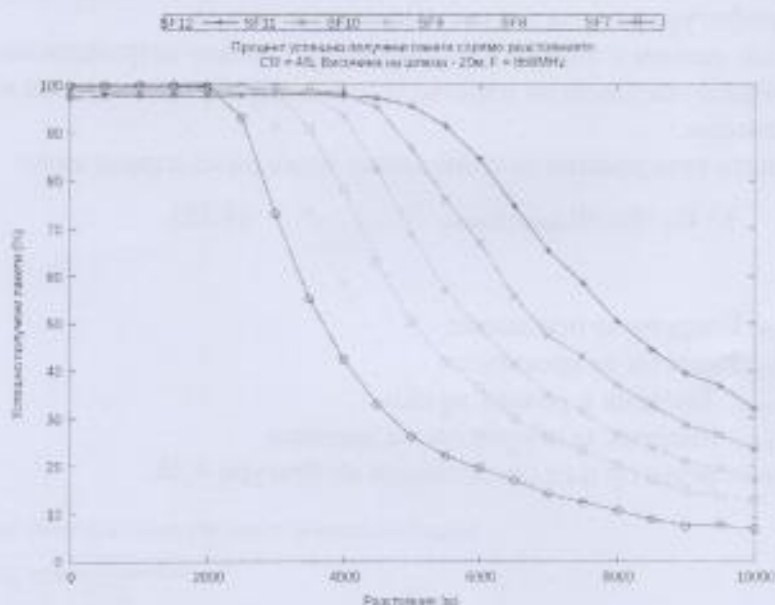
Фигура 4.26. Консумация на енергия при работа с различни фактори на разпространение – SF

4.3 Симулационно изследване на LoRa/LoRaWAN

Изследван сценарий 1:

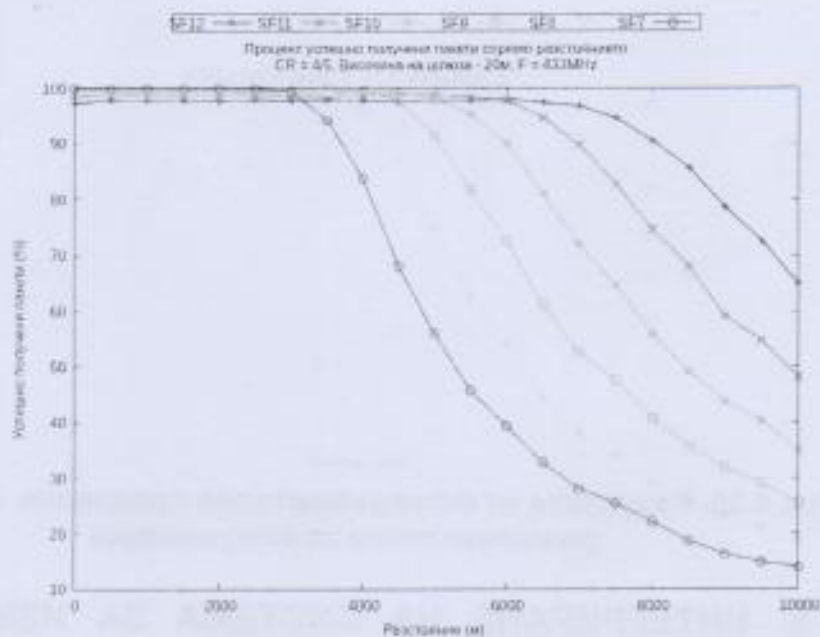
Изследването се базира на правилата за достъп до радио ефира на Европа, заедно с изискването на стандарта LoRaWAN за излъчване в един процент от общото време за комуникация. Скоростта на предаване на съобщенията е задавана изрично, за разлика от използването на алгоритъм за адаптивна такава. Това позволява да се задават параметрите на връзката – фактор на разпространение и ширина на честотната лента. Изследвани са 6-те различни фактори на разпространение като са задавани индиректно чрез параметъра “Data rate” – от 0 до 5, при които съответно се използва като фактор на разпространение от 12 до 7.

Изследваният сценарий е мрежа от 100 LoRaWAN крайни устройства за измерване на параметри на атмосферния въздух в средно голям град. Те са разположени на случаен принцип в кръг около шлюз (gateway). Изследвана е радио връзката при различни радиуси на зоната на разполагане на крайните устройства. Средата, в която са разположени устройствата е градска, което предполага множество препятствия като високи сгради, превозни средства и др. Използваният модел на засенчване е Okumura-Hata, тъй като чрез него може да се получат достоверни симулации при този вид среда. Проведени са два типа изследвания за градска среда – средно голям град и голям град. Също така е изследван ефектът от височината на антената на шлюза. На Фигура 4.28 са представени получените резултати при височина на шлюза от 20 метра:

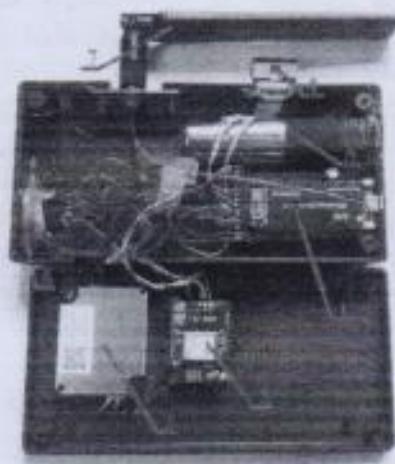


Фигура 4.28. Качество на връзката при средно голям град

Графиката представя качеството на връзката при LoRaWAN мрежа от крайни устройства, които предават пакет данни на всеки час за период от 24 часа. Използвани са всичките шест фактора на разпространение от SF6 до SF12 при мощност на излъчване 12dB и ширина на честотната лента 125KHz. Използвано е предаване без потвърждение, тъй като при наличие на такова качеството на радио връзката много бързо намалява с увеличаване на плътността на свързаните устройства, защото в противен случай се получава т.н. „лавина от потвърждения“. За целите на изследването на предложената концепция за хибридно устройство, работещо, освен в стандартната за LoRaWAN в Европа честотна лента от 868MHz, са представени изследванията на връзката при работа в честотната лента 433MHz. На Фигура 4.30 е представено симулационното изследване при средно голям град.



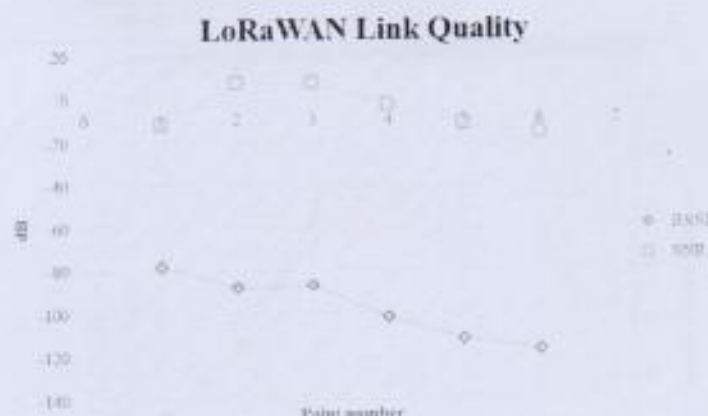
Фигура 4.30. Качество на връзката при средно голям град и работа в 433MHz
Както се вижда от фигурите, работата в честотната лента 433MHz позволява разполагането на устройствата на голямо разстояние.



Фигура 4.37. Външен вид на предложеното мобилно устройство

16 bits	16 bits	10 bits	10 bits	
eCO ₂	TVOC	Atm. Pressure	RH	
13 bits	16 bits	16 bits	16 bits	
Temperature	PM1.0	PM2.5	PM10.0	
12 bits	12 bits	12 bits	16 bits	16 bits
RED	OX	NH ₃	RSSI	SNR
32 bits	32 bits	32 bits		
Altitude	Latitude	Altitude		
6 bits	4 bits	5 bits	5 bits	6 bits
Year	Month	Day	Hour	Minute
← 303 bits → 38 bytes total length →				

Фигура 4.36. Формат на кадъра данни за изпращане чрез LoRaWAN



Фигура 4.39. Резултати от експериментално предаване на данни, при различни точки за комуникация

ГЛАВА 5. ИНТЕГРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНИЯ НА ПАРАМЕТРИ НА КАЧЕСТВОТО НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ КЪМ ОБЛАЧНА СРЕДА

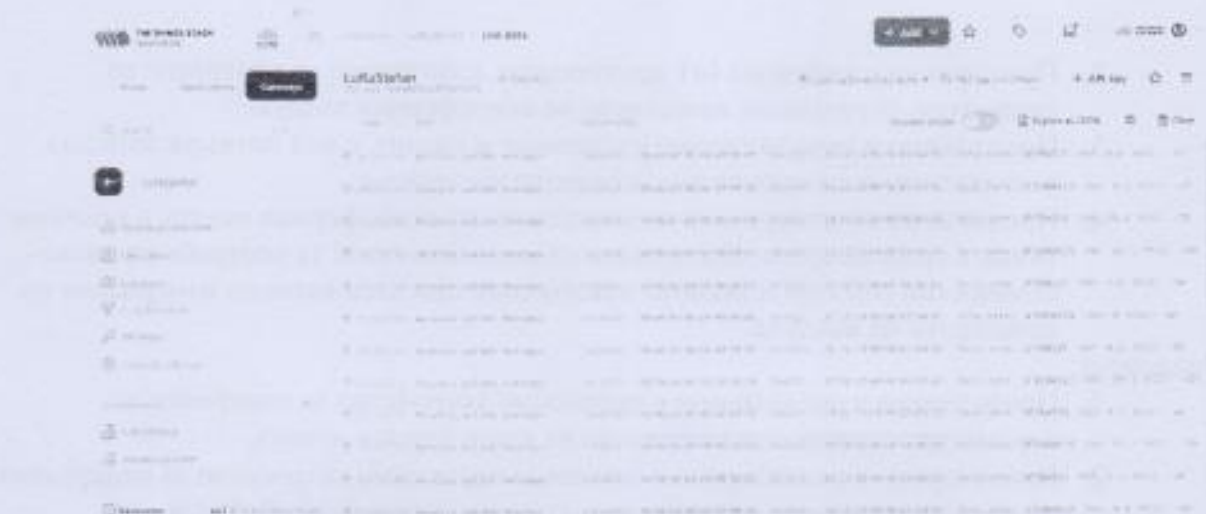
Интегрирането на облачни технологии в съвременните системи за Интернет на нещата (IoT) представлява критичен етап от развитието на инфраструктурите за мониторинг на околната среда. В контекста на атмосферното замърсяване, където параметри като фини прахови частици (PM2.5, PM10), азотен диоксид (NO2), въглероден оксид (CO) и серни оксиди (SO2) изискват непрекъснато наблюдение в реално време, облачната среда предлага необходимата мащабируемост, изчислителна мощ и дългосрочно съхранение на данни. Изборът на LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) като комуникационен протокол за тези системи е продиктуван от неговата способност да осигурява свързаност на големи разстояния при изключително ниска консумация на енергия, което позволява на сензорните възли да оперират автономно в градска или отдалечена среда в продължение на години.

5.3. Концептуална рамка на The Things Stack V3

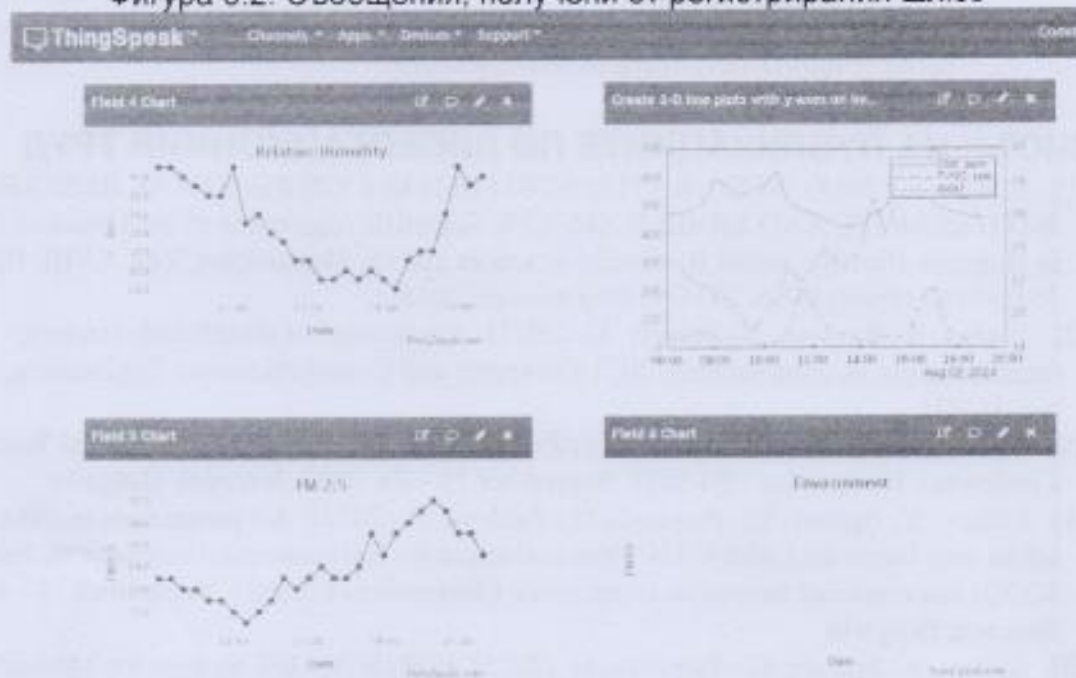
The Things Stack (TTS) V3, разработен от The Things Industries, представлява модерна, мащабируема и сигурна LoRaWAN мрежова инфраструктура. Тя обслужва както обществени мрежи, така и частни индустриални инсталации, предлагайки разширени функции за управление на жизнения цикъл на устройствата и шлюзовете (gateways). За целите на измерването на качеството на въздуха, TTS V3 действа като дедупликатор на съобщения, когато няколко шлюза приемат едно и също предаване от сензорен възел, и като пазител на сигурността чрез AES-128 криптиране.



Фигура 5.1. Регистрация на LoRaWAN шлюза в TheThingNetwork



Фигура 5.2. Съобщения, получени от регистрирания шлюз



Фигура 5.6. Експериментални измервания, визуализирани в потребителския интерфейс на облачната услуга ThingSpeak

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Изследванията, представени в настоящия дисертационен труд могат да се обобщят в следните научни, научно-приложни и приложни приноси:

Научни:

1. Направени са аналитични изследвания на LoRaWAN и възможностите за мащабиране на безжични сензорни в градска среда. Предложена е оптимизация на предаването на данни, която позволява разгръщане на широко-обхватни мрежи за екологичен мониторинг.

Научно-приложни:

1. Предложено е аналитично изследване на възможностите за мащабиране на LoRaWAN безжична сензорна мрежа.

2. Предложена е хибридна IoT архитектура, адаптирана за измерване на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух.
3. Предложено е симулационно изследване и анализ, с цел потвърждение на резултатите, получени от аналитичното изследване.
4. Предложени са измервания на качеството на атмосферния въздух в ключови точки в градска среда. Изследвани са възможностите за употреба на ниско-стойностни сензори и тяхното приложение при индикативни измервания на качеството на въздуха.

Приложни:

1. Проектирано и реализирано е преносимо устройство за измерване на параметри, отразяващи качеството на атмосферния въздух.
2. Проектирано и реализирано е безжично преносимо устройство за измервания на качеството на атмосферния въздух, което използва LoRaWAN комуникация за предаване на данни. Също така, за работа с измервателното устройство е реализирано мобилно приложение за управление и визуализация на получените резултати от измерванията.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [P1]. Lishev, S. (2018). INTEGRATED SYSTEM FOR EXPERIMENTAL RESEARCH WITH REMOTE AND MOBILE ACCESS. Scientific researches of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, series B. Natural Sciences and the Humanities, Vol. XVIII, ISSN 1311-9192 (Print), ISSN 2534-9376 (On-line), 2018.
- [P2]. Lishev, S.; Pavlova, P.; Spasov, G. (2021). Application of distributed wireless measurements in wind tunnels. 2021 Computer and Communications Engineering, Vol. 15, No. 1/2021.
- [P3]. Lishev, S.; Pavlova, P.; Spasov, G.; Petyrova, G.; Proc. XXXI International Scientific Conference Electronics - ET2022, September 13 - 15, 2022, Sozopol, Bulgaria
- [P4]. Lishev, S.; Spasov, G.; Petyrova, G.; Pavlova, P. (2023). Air parameters monitoring in urban area based on LoRaWAN: Data collection for environmental assessment. Proc. XXXII International Scientific Conference Electronics - ET2023, September 13 - 15, 2023, Sozopol, Bulgaria
- [P5]. Lishev, S.; Spasov, G.; Petyrova, G. (2025). LoRaWAN IoT System for Measuring Air Parameters in a Traffic Monitoring Station. Eng. Proc. 2025,100, 17.
<https://doi.org/10.3390/engproc2025100017>

SUMMARY

METHODS AND TOOLS FOR REMOTE MEASUREMENT OF PARAMETERS OF THE AMBIENT AIR

Stefan Nikolaev Lishev

The increased urbanization with all of its advantages carries some challenges, one of which is the low air quality. For urban planning continuous, spatially dense monitoring is difficult to achieve with reference-grade instrumentation alone because of its cost. This dissertation addresses the problem by developing methods and tools for the remote measurement of atmospheric air parameters using networks of low-cost sensors, with particular attention to the wireless communication infrastructure connecting the sensor nodes to atmospheric monitoring systems.

The proposed measurement system is built around low-cost sensor nodes that acquire several atmospheric parameters — particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), eCO₂, TVOC, temperature and humidity, and transmit the collected data over the LoRaWAN protocol. As the sensors used are not of reference-grade accuracy, the goal of the measurements is indicative rather than metrological. This makes possible dense spatial coverage at low cost. An adapted Internet-of-Things (IoT) model is proposed for integrating such sensor nodes into atmospheric monitoring systems, covering the data path from the sensor node, through the LoRaWAN network infrastructure, to cloud-based platforms.

A substantial part of the dissertation investigates the quality of the wireless link under real urban propagation conditions and the scalability of the resulting monitoring networks. Examinations are made on empirical hardware measurements, NS-3 network simulations, and analytical modelling using stochastic geometry.

To overcome limitations such as duty cycle restriction of 1% for Europe, or spectrum congestion, a hybrid communication model is proposed, combining the standard EU 868 MHz band with the EU 433 MHz band in order to increase the scalability of the system. Under this model, one or more LoRaWAN sensor end devices can self-organize into a subordinate LoRa network operating on the lower frequency band. The data collected within that sub-network are then relayed onward through the standard EU 868 MHz LoRaWAN means. This offloads traffic from the more constrained 868 MHz band and allows the overall system to support a larger number of sensor nodes within the applicable spectrum regulations.

In addition, the analytical part of the study proposes a mechanism for limiting collisions during the transmission of measurement data. Instead of transmitting immediately once a measurement is available, each device selects a random moment within a defined time window of several minutes in which to send its data. Because atmospheric processes change slowly relative to such short intervals — that is, they are inertial — this randomization introduces no meaningful loss of representativeness or timeliness in the measured data, while substantially reducing the probability that two or more devices transmit at the same time and collide.

Together, the adapted IoT model, the hybrid dual-band (EU 868/433 MHz) communication scheme, and the collision-mitigation mechanism form a coherent methodology for building scalable, low-cost LoRaWAN-based networks for remote atmospheric air monitoring, validated through a combination of empirical measurement, network simulation, and analytical modelling.



TECHNICAL UNIVERSITY – SOFIA PLOVDIV BRANCH

**Faculty of Electronics and Automation
Department of Computer Systems and Technologies**

Mag. Eng. Stefan Nikolaev Lishev

METHODS AND MEANS FOR REMOTE MEASUREMENT OF PARAMETERS OF THE AMBIENT AIR

DISSERTATION ABSTRACT

of the dissertation for the acquisition of an educational and scientific degree
"DOCTOR"

Field: 5. Technical Sciences

Professional field: 5.3 Communication and Computer Technology

Scientific specialty: Automated systems for information processing and
management

Supervisors: Prof. Dr. Petya Pavlova and Prof. Dr. Grisha Spasov

PLOVDIV, 2026

The dissertation was discussed and directed for defense by the Departmental Council of the Department of Computer Systems and Technologies at the Faculty of Electronics and Automation at the Technical University of Sofia-Branch-Plovdiv at a regular meeting held on 10.06.2026.

The public defense of the dissertation will take place on 25.09.2026 at 11:00 in Hall 3206 of the Technical University of Sofia, Plovdiv Branch at an open meeting of the scientific jury, determined by Order No OZh-5.3-54 / 24.06.2026 and No OZh-5.3-62 / 17.07.2026 of the Rector of the Technical University of Sofia, consisting of:

1. Assoc. Prof. Dr. Nikolay Kakanakov – Chairman
2. Assoc. Prof. Dr. Dilyana Budakova – Scientific Secretary
3. Prof. Dr. Rositsa Doneva
4. Prof. Dr. Nikola Kolev
5. Assoc. Prof. Dr. Borislav Milenkov

Reviewers:

1. Assoc. Prof. Dr. Nikolay Kakanakov
2. Prof. Dr. Nikola Kolev

The materials on the defense are available to those interested in the office of the Faculty of Electronics and Automation of the Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, office No. 4242.

The dissertation is on an independent preparation by a PhD student at the Department of CST of the Faculty of FEA. The research on the dissertation development was done by the author, and some of them are supported by research projects.

Author: mag. Eng. Stefan Lishev

Title: Methods and Means for Remote Measurement of Ambient Air Parameters

Circulation: 30 copies

Printed in the IPC of the Technical University of Sofia

I. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE DISSERTATION

Actuality of the problem

Monitoring of ambient air quality is of paramount importance, due to several interrelated reasons affecting human health, the environment and economic stability. Air pollution can lead to respiratory diseases in the population, some of which are asthma, bronchitis, lung cancer. Common air pollutants are fine particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), ozone (O₃), nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂). They directly contribute to the development of cardiovascular diseases by increasing the risk of heart attacks, strokes, etc. Some groups of the population are particularly vulnerable and susceptible to the adverse effects of air pollution – these are children, the elderly and those with existing health problems.

The impact of air pollutants also extends to the environment. They can damage ecosystems by acidifying soils and water bodies, and harm plant and animal life. The impact covers not only the change in the pH index to harmful values, but also dusting and the impediment of gas exchange and photosynthesis in plants. This can threaten biodiversity by disrupting natural habitats and affecting the survival of species. In addition, some air pollutants such as carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) appear as greenhouse gases that contribute to climate change.

The factors listed so far also have an economic impact, as they lead to increased healthcare costs due to illness and hospitalizations. Another economic impact is reduced productivity. It manifests itself in cases of reduced working capacity and loss of school days as a result of poor air quality. Also, air pollutants can damage crops and reduce agricultural yields, resulting in a direct economic impact. Polluted air can also lead to damage to infrastructure. They are expressed in an increase in the degree of collapse of buildings and other facilities.

Traditional monitoring stations, while accurate, offer limited spatial resolution. It is challenging for them to present accurate pollution data due to the dynamic nature of pollutant dispersion. Satellites and LiDAR have low-resolution measurements, which means they can't detect subtle variations in air pollution, especially in urban environments. This makes it difficult to identify hot spots with a high concentration of harmful substances in the ambient air. The frequency with which satellites "visit" a particular place is limited, due to their specific nature of action.

To overcome these challenges, it is necessary to perform in situ measurements using mobile sensor platforms based on vehicles and drones, equipped with sensors to measure various ambient air parameters. It is also possible to use portable devices that can be moved to monitor different areas in the city. Remote measurement of parameters reflecting ambient air quality offers many opportunities to improve the understanding and management of pollution. By combining different technologies and methods, more accurate and effective monitoring can be achieved, which will help make informed decisions to protect the environment and public health.

This dissertation addresses the challenge of achieving high-resolution ambient air quality monitoring over a wide area by developing and validating new methods and means of remote sensing based on cheaper real-time sensor networks.

Purpose of the dissertation, main tasks and research methods

The aim of the dissertation is to research and develop the methods and means for the implementation of systems for local and remote measurements of parameters reflecting the quality of the ambient air using the Internet of Things (IoT) and Cloud Computing.

To achieve this goal, the following tasks are set in this work:

1. Study of the methods and means for collecting, transmitting, processing and storing data in systems for measuring parameters reflecting the quality of the ambient air, as well as the means for their implementation.

2. To design and model a conceptually adapted architecture of an IoT-based system for measuring parameters reflecting ambient air quality.

3. To investigate the application of LoRaWAN in the implementation of systems for remote measurement of parameters reflecting the quality of ambient air.

4. To integrate a system for measuring parameters reflecting the quality of ambient air to a cloud environment and to study its scaling.

The research in the dissertation is focused on the methods of collecting, transmitting, processing and storing data in systems for measuring parameters of ambient air quality. In addition, the methods and means of integrating these systems through a cloud environment are analyzed.

Scientific novelty

The scientific novelty of the dissertation consists in the proposed 5-layer IoT model, which is adapted for the purposes and needs of environmental monitoring. The introduction of a "peripheral" layer allows traffic optimization and primary data processing. A hybrid network topology is proposed, combining local sensor clusters operating on 433MHz LoRa, with a backbone connection to the global network via 868MHz LoRaWAN. This approach provides high flexibility in the placement of sensors in urban environments with challenging radio terrain. This innovation improves the scaling of wireless sensor networks to monitor the parameters of ambient air reflecting its quality. A hierarchical model of cloud integration is proposed, based on separating the functions of network management (The Things Network) from the functions of applied analysis and visualization (ThingSpeak). An analytical study has been carried out, on the basis of which key conclusions have been made about the applicability of the proposed system in the deployment of dense sensor networks in urban environments.

Practical applicability

The results of the dissertation have significant practical applicability in the development of intelligent sensor networks for monitoring atmospheric parameters in urban environments and the construction of systems for monitoring key air indicators in real time. The analytical and simulation studies and prototypes for mobile monitoring show the practical applicability of the proposed innovations. Part of the practical work on the dissertation is within the framework of the implementation of research projects within the Competence Center "Intelligent Mechatronic, Eco and Energy-Saving Systems and Technologies.

Approbation

The work was reported in a completed form to the extended staff of the Department of Computer Systems and Technologies of the Faculty of Economics, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch.

The results are presented to:

1. The scientific community:

- participating in the XXXI International Scientific Conference Electronics in Sozopol Electronics – ET 2022
- participating in the XXXII International Scientific Conference Electronics in Sozopol Electronics – ET 2022
- participating in the international conference TechSys (2025)

Publications

Main achievements and results of the dissertation are published in 5 pcs. scientific publications in journals, 1 pc. of which in the scientific conference TechSys (2025) and was published in MDPI EngProc 2025 in Q3 Scopus. Two are at the international conference Electronics – ET 2022 and 2023, indexed in Scopus. One publication is with independent participation and was published in Scientific Papers of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, 2018.

Structure and volume of the dissertation

The dissertation is in the volume of 140 pages, including an introduction, 5 chapters on solving the formulated main problems, a list of the main contributions, a list of publications on the dissertation and references. A total of 114 literature sources is cited, 101 of which are in English and 1 in Bulgarian, and the rest are Internet addresses. figures and 13 tables. The numbers of the figures and tables in the abstract correspond to those in the dissertation.

II. CONTENT OF THE DISSERTATION

CHAPTER 1. OVERVIEW OF THE PROBLEM SOFTWARE

Intelligent sensor systems play a key role in monitoring ambient air quality. They use modern technologies to collect, process and analyze data in real time, which allows for a quick response to changes in air quality and informed decision-making. The integration of the Internet of Things (IoT) and cloud technologies in the field of ambient air quality measurement systems offers new opportunities to achieve high efficiency and optimization, which is an important task for the design of intelligent air quality monitoring systems. This depends on both the hardware and the algorithmic provision of the control systems. An adapted IoT architecture can integrate various components and technologies to ensure efficient data collection, transmission, processing, and storage in intelligent air quality monitoring systems. Traditional remote sensing methods for measuring ambient air quality, while powerful, have inherent limitations. Wireless sensor networks in combination with low-cost sensors offer opportunities to realize intelligent high-resolution air quality monitoring systems for real-time air pollution levels. This is especially valuable for tracking rapid changes in pollution levels. Low-value sensors are significantly lower in cost than traditional monitoring equipment, making air quality monitoring more accessible to communities and researchers. This allows for the deployment of much larger networks for the same price.

CHAPTER 2. Methods and means for collecting, transmitting, processing and storing data in systems for measuring parameters reflecting the quality of ambient air

This chapter examines in detail the different approaches to ambient air monitoring and analyzes their advantages and limitations. At the same time, the methods and means of data transmission, their storage and subsequent processing are considered. Each element of these tools plays a key role in the successful and precise collection, presentation and evaluation of the data obtained. Figure 2.1 presents the workflow and the flow of data that is generated and in this kind of systems for remote measurement of parameters indicating the quality of ambient air.

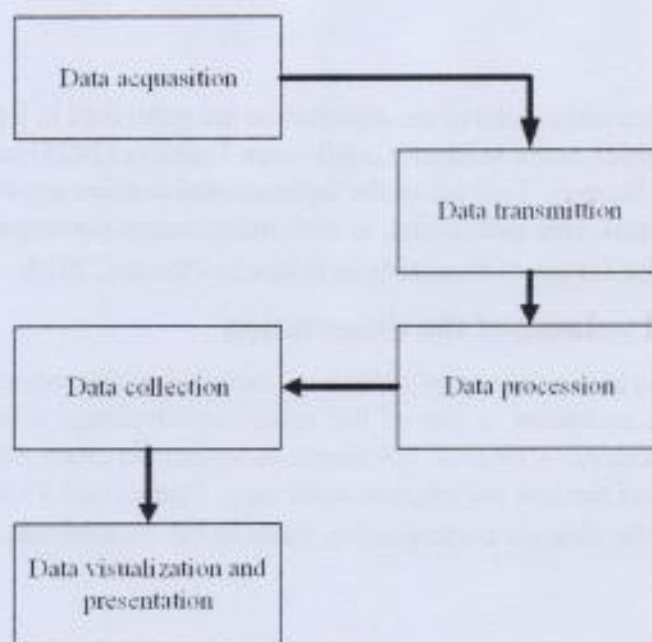


Figure 2.1. Workflow and data flow in environmental monitoring

The figure presents the sequence of the main stages in the operation of a system for remote measurement of parameters characterizing the quality of ambient air, including collection, transmission, processing, storage and visualization of the measured values.

2.1.4 Remote Measurement

Remote sensing methods are an integral part of modern global and regional air quality monitoring strategies, complementing data from ground in-situ stations by providing large-scale spatial coverage. These methods are based on the measurement of electromagnetic radiation reflected or emitted from the Earth's surface and atmosphere, allowing for a quantitative assessment of atmospheric pollutants by analyzing the spectral characteristics of light absorption and scattering [52].

Despite their advantages for large-scale analysis, remote sensing methods have limitations related to the presence of cloud cover that hinders optical measurements, as well as lower time resolution (typically one pass per day for polar-orbiting satellites). Therefore, the integration of satellite data with terrestrial sensor networks (Data Fusion) is seen as the most promising approach to achieving a complete spatio-temporal picture of ambient air quality.

2.1.5 Low-value sensors

Monitoring of ambient air parameters plays a key role in understanding the processes and resulting changes in the environment under the influence of climatic factors and the impact of human activity. Traditional ambient air quality measurement stations have high accuracy, but also have some drawbacks – high cost of operation and maintenance, requirement for specially trained personnel, limited coverage area. In contrast, low-value sensors appear as a transformative technology, allowing for widespread deployment and collection of real-time data at a fraction of the cost of traditional measuring stations. These sensors are especially useful for remote measurements, where their accessibility and scalability are a key factor. Environments that have such measurement requirements are usually densely populated urban environments or remote areas. Budget air quality sensors are suitable for indicative measurements, i.e. for detecting "hot spots" of pollution.

For these reasons, the research focus will be on low-value sensors and their application in measurements of air parameters in stationary and mobile wireless sensor networks. The selected sensors were chosen not only because of their availability, but also because of their technological diversity, in accordance with the research objectives and the possibility of conducting

experimental tests, which will allow for a more detailed assessment of their effectiveness and applicability.

2.1.5.1 CCS811

The sensor can measure two parameters of ambient air:

- volatile organic matter as a sum of tVOC
- eCO₂ equivalent carbon dioxide content

Volatile organic matter (VOC) is represented as the number of parts per billion (ppb). The CCS811 can measure VOC values ranging from 0ppb to 1187ppb. According to the documentation, volatile organic matter is measured as the sum of the concentration of a mixture of air and a typical mixture of VOC for confined spaces. In addition, the documentation states that the measured values will differ from the true ones in case chemical compounds are present in the environment where measurements of ambient air parameters are carried out in a very different ratio than those intended by the manufacturer. eCO₂ measurement values range from 400ppm to 8192ppm.

Figure 2.1 shows the block diagram of the CCS811 sensor:

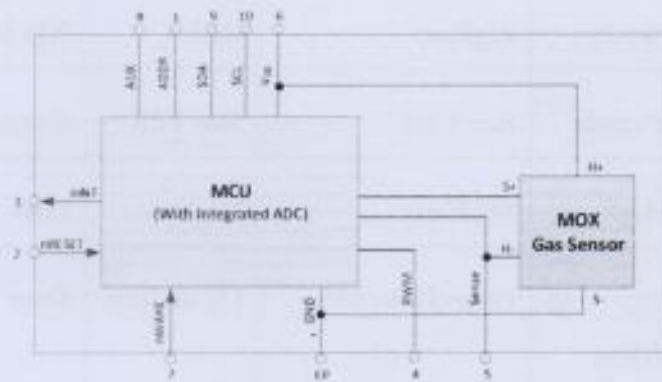


Figure 2.2 CCS811 Block Chart

The measuring element is of the metal oxide (MOX) class. Together with it, a microcontroller is integrated into the housing, which, through its ADC, measures the voltage drop of the sensor element. It is recommended by the manufacturer that CCS811 be used in combination with an external temperature and humidity sensor in order to compensate for errors in the measured values resulting from the environmental conditions in which the sensor is used.

2.2.2. Wireless methods of communication

Wireless data transmission methods are preferred when connecting IoT sensors, as they allow for fast, flexible, and cost-effective deployment of wireless sensor networks. They eliminate the need for physical cables, which is especially useful in urbanized, remote or hard-to-reach areas. Depending on the speed, range and power consumption, they can be classified into several groups:

- **Cellular networks (4G/5G/NB-IoT/6G)** Technologies such as LTE (4G) and 5G use licensed spectrum. They offer high bandwidth, but are not energy-efficient for sensors transmitting small data packets, such as those used in ambient air monitoring. Narrowband IoT (NB-IoT) is an optimized version for IoT applications. Although NB-IoT offers excellent connectivity density, it consumes more power than LPWAN alternatives due to the need for frequent synchronization with the base station and generates operating costs (OPEX) for subscription fees.
- **Wireless Local Area Networks (WLANs).** The 802.11 family of protocols represent standards for high-speed data transfer over close distances – up to about 100 m. Protocols from this family are not efficient enough for autonomous sensors, due to the high

consumption in standby mode and the limited range, highly dependent on obstacles between the transmitting devices and the gateway.

- **Low Consumption, Long Range (LPWAN) networks.** LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) is an LPWAN protocol operating in the unlicensed sub-gigahertz spectrum. Using CSS (Chirp Spread Spectrum) modulation, LoRaWAN provides a star topology with a radius of 2-5 km in urban environments, and 10-15 km in rural areas, eliminating the need for complex cellular topologies such as in ZigBee.

Benchmarking shows that while ZigBee and BLE have their applications in smart buildings and personal monitoring, LoRaWAN is the only technology that simultaneously satisfies the requirements of large range, low consumption, and scalability required for an autonomous urban air monitoring system. C Table 2.1. the key parameters on the basis of which the LoRaWAN protocol was selected for research are presented.

Table 2.1. Comparison between different wireless standards

Parameter	Wi-Fi	ZigBee	BLE	NB-IoT	LoRaWAN
Topology	Zvezda	Star/Cell	Star/P2P	Zvezda	Star of stars
Speed	High	Medium	High	Low	Low
Scope	Up to 100m	From 10 to 100m	Up to 50m	Over 10km	From 2 to 15 km
Energy consumption	High	Medium	Low	Medium High	Low
Application	In buildings	Industrial/Smart Home	Portable devices	Critical infrastructure	Smart City

2.5. Experimental test measurement results

For the purposes of the study, an experimental microcontroller system was built to monitor the quality of ambient air. It uses low-value sensors from those discussed in the previous sections of this dissertation – CCS811, BME280, MQ-135. The first two sensors were used as a module – MOD-ENV of the company Olimex. The second sensor, the BME280, measures temperature, relative humidity and atmospheric pressure. The two measuring elements are connected via an I2C interface to the control microcontroller. Both sensors provide the measured data in digital form, which is a convenience when performing measurements, since it is not necessary to use the analog-to-digital converter of the microcontroller used. The third sensor is the MQ-135, which is again a device of the metal oxide class, with its interface being analog. The test device is based on the 8-bit ATMEGA32U4-AU microcontroller. It controls the operating mode of digital sensors – BME280 and CCS811, as well as the processing and storage of data in an SD card.

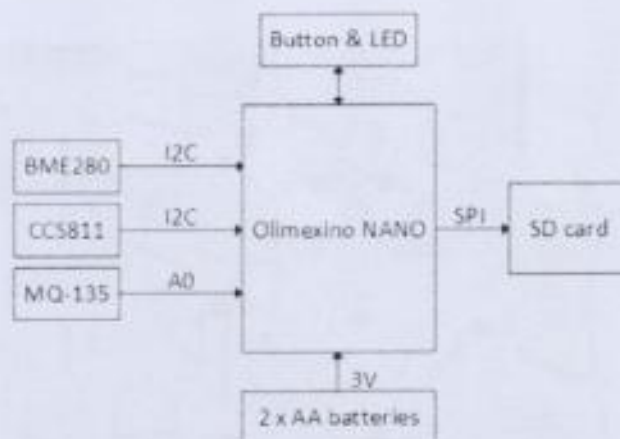


Figure 2.9 Block diagram of the connection of the test device for collecting data on ambient air parameters

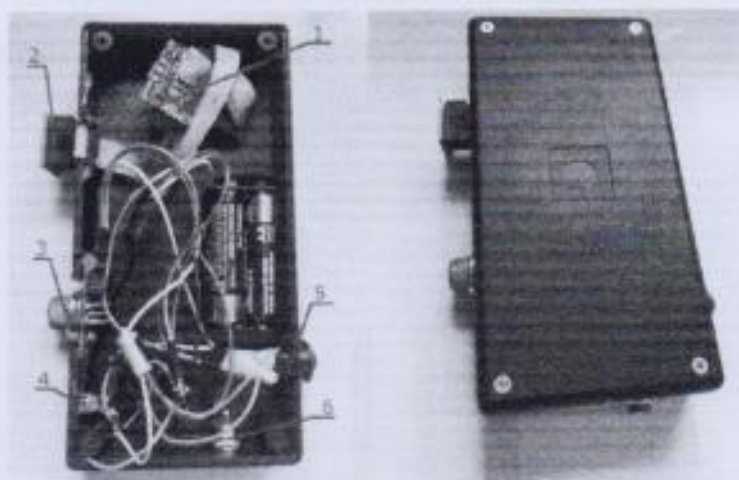


Figure 2.10 External view of the created prototype

Figure 2.11. The data obtained by the CCS811 sensor when measuring each second is presented, with a total measurement time of 100 seconds. The graph shows the values for carbon dioxide levels and those of the total amount of volatile organic matter.

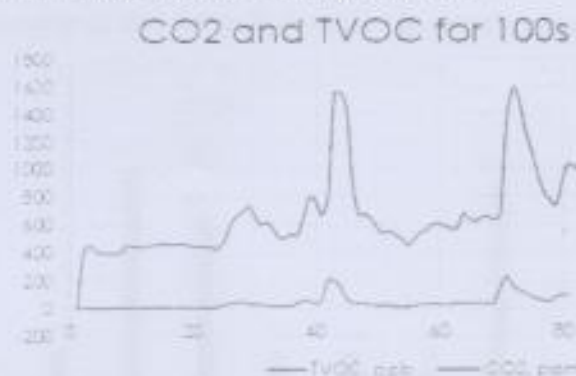


Figure 2.11 Experimental field measurements with CCS811 in an area with volatile organic matter sources

See Figure 2.13. A map of the points in the city of Plovdiv is presented, in which test measurements of parameters indicating the quality of the ambient air have been made. As can be seen from the figure, key streets and boulevards have been selected, where increased traffic of vehicles is observed.



Figure 2.13 Map of the measurement points

Figure 2.14 presents the arithmetic mean values of the experimental measurements made with the mobile portable device.

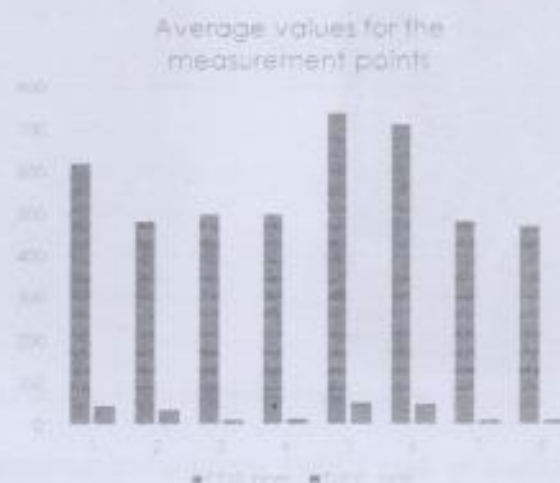


Figure 2.14 Arithmetic mean of measurements

Figure 2.15. the maximum, measured values during the test measurements are presented.

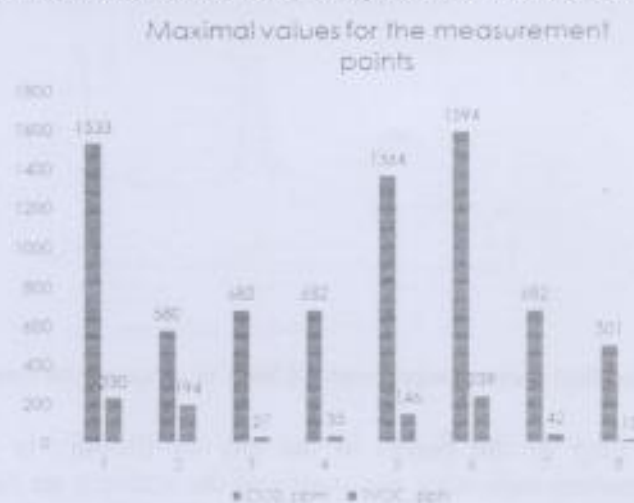


Figure 2.15 Maximum measurement values

From the analysis of the results obtained from the field measurements, it can be concluded that increased air pollution is observed in heavily congested urban intersections – points 5 and 6. On the other hand, at intersections next to which green areas are located, there is a certain decrease in

pollution. The proposed mobile device for indicative measurements allows marking "hot" spots in urban environments where there is increased air pollution.

CHAPTER 3. Application of IoT Architectures in the Implementation of Systems for Local and Remote Measurements of Parameters Reflecting Ambient Air Quality

The Internet of Things (IoT) offers significant advantages in the implementation of systems for local and remote measurements of parameters reflecting ambient air quality. An adapted IoT architecture can integrate various components and technologies to ensure efficient data collection, transmission, processing, and storage. The use of IoT for remote measurements of ambient air quality is a rapidly developing field with significant public health implications that allows for effective environmental monitoring.

3.3. Adapted IoT architecture for environmental monitoring

See Figure 3.2, a general view of IoT architecture for environmental monitoring is presented. As can be seen from the figure, the system uses a radio communication protocol in order to transmit the measured data from the sensor devices to the base station. This protocol belongs to the group of LPWAN standards that allow long-distance operation with low power consumption. Once the data is received at the base station, it transmits it via IP protocol or through cellular networks, such as Wi-Fi to the cloud environment, where the database is located to store and process the values. In the cloud environment is also the application server, which serves to identify, authorize and provide a convenient user interface for the end user. It has the ability to connect to the system via a personal computer or mobile phone.

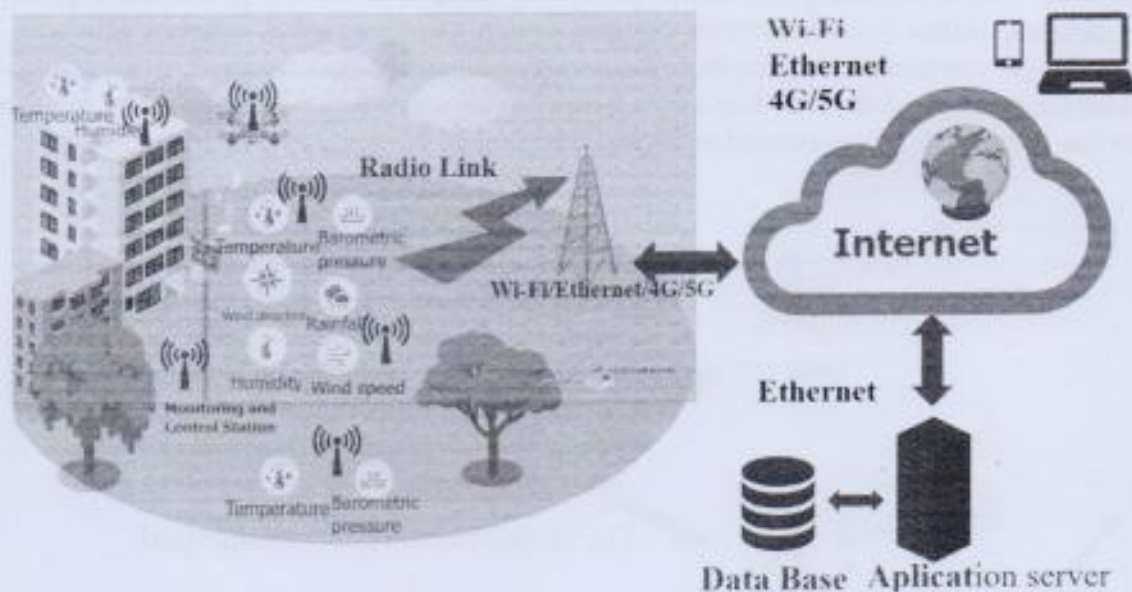


Figure 3.2. General view of the IoT environmental monitoring system

A system for monitoring parameters indicating the quality of ambient air most often has to work in an urban environment where there are many sources of electromagnetic interference. For this reason, it is necessary to use appropriate radio communication methods that allow reliable and secure communication. Sensors for measuring ambient air parameters are part of sensor devices that can be installed in different parts of the city, or can be attached to a specialized drone, in order to study the vertical distribution of target substances, as well as the distribution of temperature and humidity in different areas of the surface layers of ambient air.

For the purposes of this dissertation, an adapted architecture for use in environmental monitoring systems is presented. It builds on classic IoT models, adding and changing layers while maintaining the conceptual framework. The adaptation is necessary to take into account the specific features of this type of system for measuring parameters indicating the quality of ambient air.

In Figure 3.3, the proposed adapted IoT model for systems measuring ambient air parameters is presented.

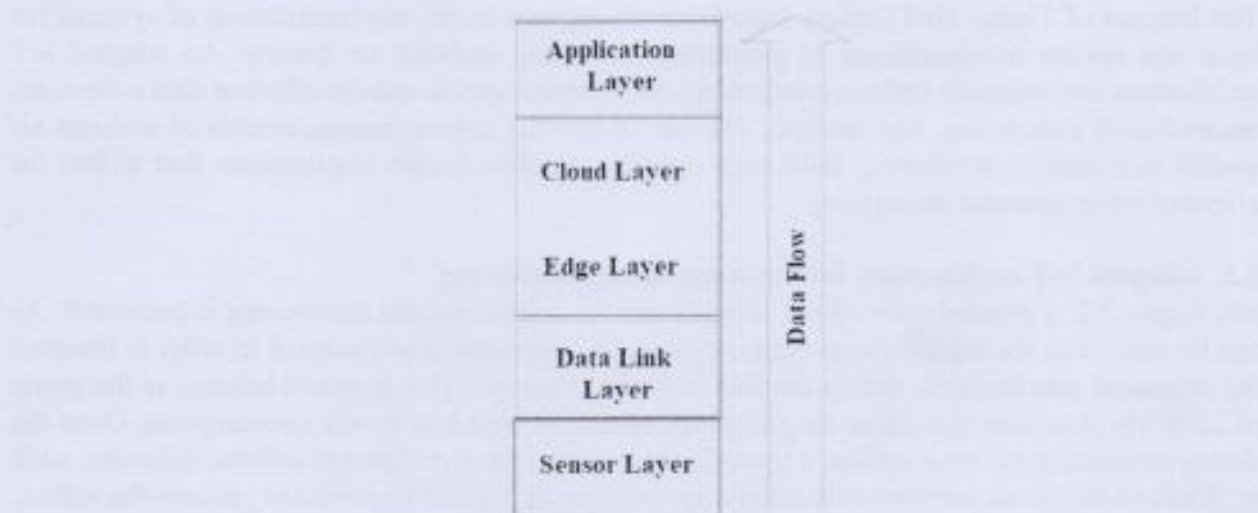


Figure 3.3. IoT Model for Environmental Monitoring

It is proposed, through the introduction of a peripheral layer, the volume of data that is transmitted is optimized. This is especially important because, in addition to the energy needed to power the sensor devices, airtime is an even more valuable resource in dense urban wireless networks. The peripheral layer can perform aggregation and compression of the data received by the sensors. Based on the proposed 5-layer IoT model, a hybrid architecture for an environmental monitoring system has been built. It is presented in Figure 3.5.

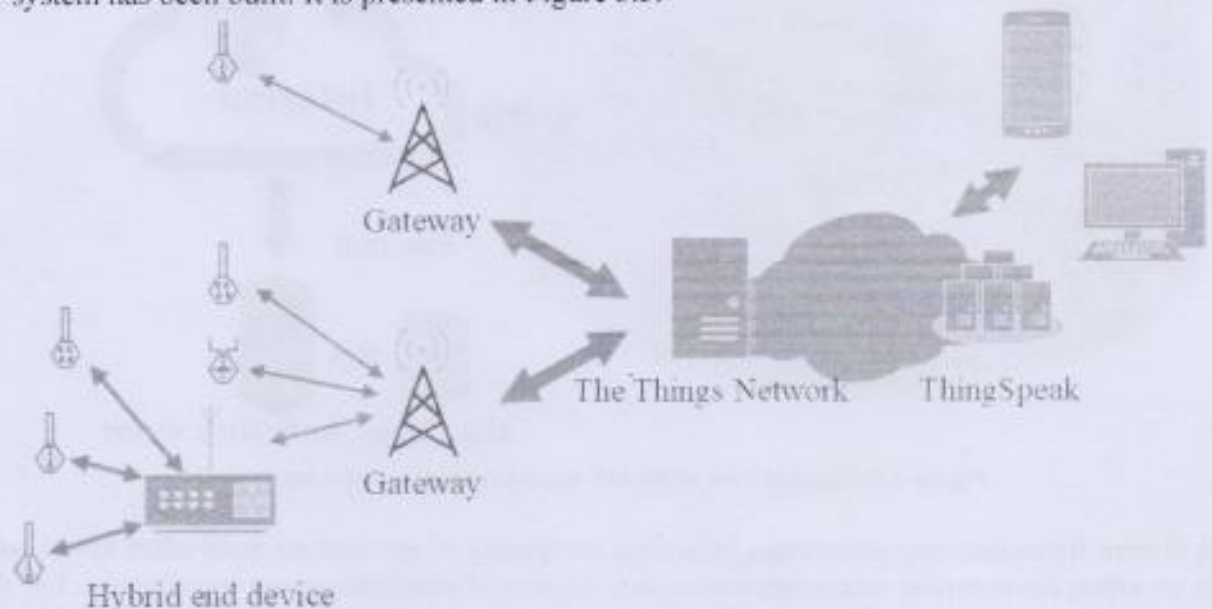


Figure 3.5. Hybrid architecture for an environmental monitoring system

In contrast to similar developments that use LoRa or another modulation/communication standard [97, 98, 99], the present dissertation proposes a hybrid model of the communication system, in which an End measuring device is equipped with two modems – one operating on the standard frequency band for the European Union around 868 MHz, and a second modem operating with

LoRa modulation in the 433 MHz frequency band. This End device, called a hybrid End device, can operate in two modes – as a relay device that relays the received data packets, or as one that supports its own network of End devices. In the second case, it has access to the data it receives and can aggregate it in order to optimize the use of the LoRaWAN network, as well as optimize the energy used.

CHAPTER 4. Chapter 4: Application of LoRaWAN in the Implementation of Measurement Systems for Parameters Reflecting Ambient Air Quality

With IoT systems for remote monitoring of parameters indicating the quality of ambient air, sensor networks are very often geographically dispersed over large areas. This necessitates the use of a wireless communication protocol that allows communication over long distances. In addition, sensor devices must be able to operate for extended periods of time without the need for maintenance, especially in hard-to-reach areas. Sensor devices need to be optimized for operation for a long time without the need to replace the power batteries. For the reasons listed, a method of communication that meets these specific requirements is necessary.

The working hypothesis, which is proposed is that the LoRaWAN standard meets these requirements and that with optimal configuration of the wireless sensor network, it is possible to meet the environmental monitoring requirements specified above.

The LoRaWAN standard offers significant advantages in wireless sensor networks for measuring parameters reflecting ambient air quality:

- Long-distance communication – LoRaWAN features the ability to communicate over long distances, allowing sensor devices to transmit data successfully over distances of several kilometers, even in challenging environments. This is crucial for monitoring air quality in remote or large areas.
- Low Power Consumption – LoRaWAN is designed for low power consumption, allowing sensors to run on batteries for extended periods of time. The achievement of low-power communication with this standard is largely determined by the high maximum reception sensitivity – reaching up to -148 dBm, combined with high immunity to interference and noise in the radio environment. Successful reception of the sent data is possible even if the target signal is up to -20dBm below the background noise level [100]. As pointed out by P. Fraga-Lamas et al. [101], with stationary devices and the use of directional reception antennas of the "Yagi-Uda" type, etc., communication with very low radiation power is achieved.
- Cost efficiency – low power requirements and simplified LoRaWAN infrastructure contribute to cost-effective deployment and maintenance of air quality monitoring networks.
- Scalability – LoRaWAN networks can accommodate a large number of sensors, making them suitable for widespread air quality monitoring initiatives.

4.1 Key Features of the LoRaWAN Protocol

A wireless network based on LoRaWAN is based on two key components – LoRa and LoRaWAN. The first component represents the physical layer, i.e. the specific modulation of the radio signal that is used. The second component is the media access layer (MAC layer), which uses LoRa modulation for reliable data transmission and reception, including endpoint management and configuration, and builds the overall LoRaWAN protocol.

LoRa defines the spreading factor as follows [104]:

$$2^{SF} = \frac{B}{R_s} = B \cdot T, \quad (4.1)$$

Where SF, B, R_s , and T are spreading factor, bandwidth, speed of transmitted characters, and duration of a chirp. In fact, it is the original basic element in this type of modulation and can be described as follows:

$$c(t) = \begin{cases} \exp(j\phi(t)) & \text{if } -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.2)$$

where $\phi(t)$ represents the size of the CHIRP phase. Instantaneous frequency is defined as :

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (4.3)$$

For linear chirps, such as those used in LoRa, the instantaneous frequency is defined as follows:

$$f_{lc}(t) = f_c + \mu \cdot \frac{B}{T} \cdot t, \quad (4.4)$$

Where f_c is the central carrier frequency. If $\mu = 1$ results in a linearly increasing chirp, while at $\mu = -1$ a chirp with a linearly decreasing frequency is obtained, and B corresponds to the spectral density of the signal, as well as the difference between the minimum and maximum instantaneous frequency of the chirp. For the received signal, after LoRa modulation, the dependence is valid [106]:

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (4.6)$$

Where: R_s is the transmission rate of the characters, BW is the bandwidth, and SF is the spreading factor. From here we also get the speed of data transmission in bits per second:

$$R_b = BW \times R_s \times FEC \quad (4.7)$$

Where R_b is the rate in bits per second, and FEC is the number of added bits for error correction – Forward Error Correction. The rate of chirps R_c can be calculated as follows:

$$R_c = BW \times R_s = \frac{BW^2}{2^{SF}} \quad (4.8)$$

As can be seen, depending on the set SF spreading factor, bandwidth BW and the number of error correction bits added, the rate of transmitted data, Data Rate (DR) in bits per second, is obtained:

$$DR = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR \quad (4.9)$$

The resulting signal is extremely resistant to interference and can be decoded even if it is up to 20dB below the threshold of background noise in the radio environment at the frequency band used. In the receiver, the same sequence of operations is performed on the signal in order to decode it and restore the encoded information. Figure 4.4. a non-modulated and modulated signal with LoRa modulation is presented [107]:

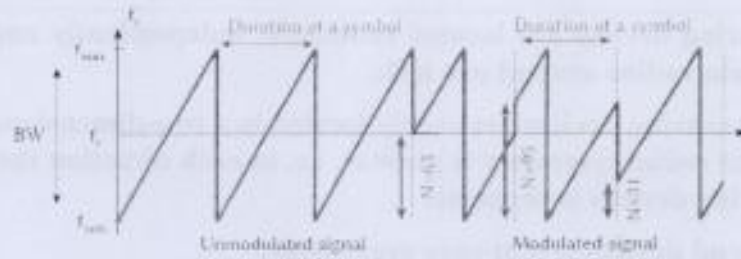


Figure 4.4. Unmodulated and modulated LoRa signal [107]

On the left side of the figure is a non-modulated LoRa signal. It changes linearly from the lower limit $f_{\min}$ of the frequency band used, to the upper limit $f_{\max}$, and f_c is the carrier signal. On the right side of the figure is a modulated LoRa signal, using a spreading factor $SF = 7$ and modulating several symbols, each of which contains SF bits. At $SF = 7$, we can have values between 0 and 127. When messages are sent from the gateway to the terminal devices, an inverted polarization signal is used in order not to intertwine the two message streams – those from the terminal devices to the gateway (uplink) and those in the opposite direction (downlink). On the basis of the considered modulation, the LoRaWAN protocol is built, which appears as a media access layer in relation to the OSI model – Figure 4.5.

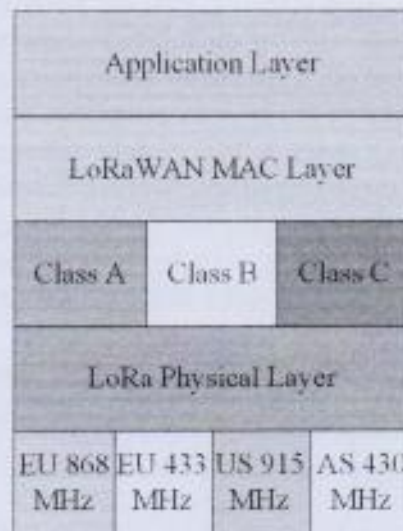


Figure 4.5. LoRaWAN Protocol Stack

As can be seen from the figure, different frequency bands are used for different regions of the world, along with different rules for access to the radio spectrum.

4.2 LoRa/LoRaWAN Analytical Study in Urban Settings

If all possible combinations of parameters of the LoRa relationship are considered, it can be concluded that their number is large, as according to Bohr & Roedig [111] they are 6720. This value is obtained by taking into account the different transmission powers, combined with the different spreading factors, bandwidth used, number of bits for correction, etc. This creates challenges for their selection and configuration. There is a deficit in mathematical models and algorithms. In the literature, different solutions to this resource management task have been proposed. Due to the above factors, for the purpose of exploring the scalability of an environmental monitoring system that uses a LoRaWAN communication protocol, it is proposed to make the following assumptions:

1. The measuring devices are located randomly, independently and evenly in a circle with a certain radius around one lock.
2. The end measuring devices are evenly located in a two-dimensional plane around the gateway and radial symmetry is present, i.e. in each direction the average density of the measuring devices is the same.
3. Data from end devices is sent once every hour.

Since LoRaWAN networks use the pure "ALOHA" (Pure ALOHA) method as a discipline for accessing the network, the event of sending data from a terminal device can be modeled as a random event, although this happens at finite specified intervals of time in the general case. If approached in a way that allows the process to be considered largely random, such as introducing random delay generation before sending the measured values, then the event of data transmission from End Device can be modelled by Poisson Distribution. This is done in order to facilitate the analytical study of the behavior of the network of devices. In ambient air quality monitoring systems, sensor devices are positioned so that they cover a certain area evenly. This, in turn, allows, for the purposes of the study of the percentage of successfully transmitted data packets, the location and the number of sensor devices to be modeled using the mathematical apparatus of stochastic geometry, combined with the Homogeneous Poisson Point Process [113]. Stochastic geometry as a part of probability theory deals with the modeling and analysis of random spatial processes [106, 107, 108]. The main tool of stochastic geometry is the point process, and the most commonly used is the Poisson Point Process (PPP) [112]. It assumes that the points are distributed independently of each other and uniformly in space with a certain average intensity (density) – λ . In wireless networks, this allows for the modeling of interference between individual transmitters, with their positions modeled as PPPs. Another purpose for modeling stochastic geometry is to estimate whether a point (in this case, a device) will have signal coverage. The analysis often involves calculating average values of Signal to Noise Ratio (SNR) or Signal to Interference to Noise Ratio (SINR) indicators.

For a reference transmitter located at a distance r_0 from the gateway, we get:

$$P_s(r_0) = \exp\left(\frac{-\theta\sigma^2 r_0^{\frac{\alpha}{p}}}{p}\right) \times \exp\left(-\lambda\pi\left(\frac{\theta r_0^{\frac{\alpha}{p}}}{1}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \times P_a^{\frac{2}{\alpha}} \times C(\alpha)\right) \quad (4.21)$$

Here two articles have a purely physical meaning:

- $\exp\left(-\theta\sigma^2 r_0^{\frac{\alpha}{p}}\right)$ – a component that is limited by background noise decreases with distance
- $\exp\left(-\lambda\pi\theta^{\frac{2}{\alpha}} r_0^2 C(\alpha)\right)$ – it is a component that is limited by interference between transmitting devices. Grows as device density increases λ .

Based on the derived analytical expressions, programs in the Python language were developed, through which, using numerical methods, an assessment of the probability of the final LoRaWAN sensor devices to successfully send the measured data is made. The aim of these studies is to establish and evaluate the feasibility of LoRaWAN, a wireless sensor-based network to be deployed in an urban area with a high density of sensor devices.

4.2.1. Urban LoRaWAN network research

A program using the Python language was created to conduct research using numerical methods. Figure 4.10. The results obtained for the percentage of successfully sent data packet of 36 bytes at different numbers of correction bits are presented. Data is sent every hour, and this is done at random times within a 60-second window. Figure 4.10. The results obtained for the percentage of successfully sent data packet of 36 bytes at different numbers of correction bits are presented. Data is sent every hour, and this is done at random times within a 60-second window.

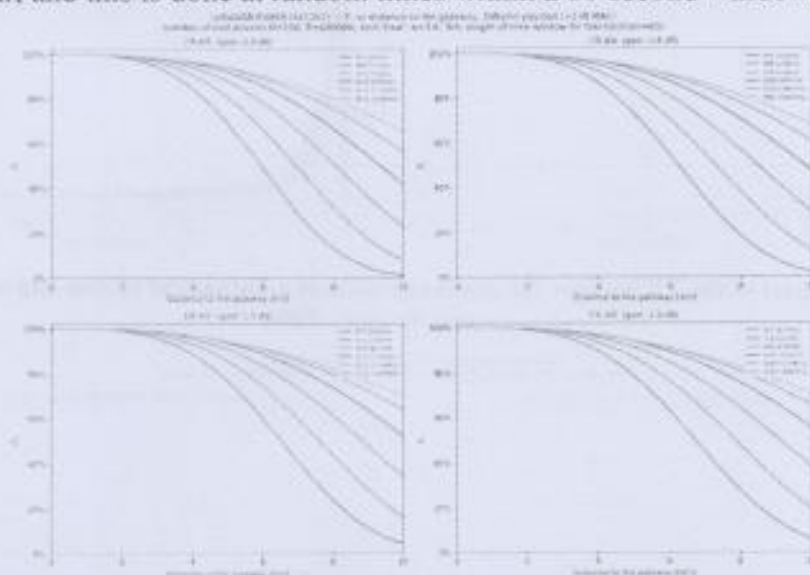


Figure 4.10. Examine the quality of the connection at different number of bits for correction

Since the sending of a data packet is in unacknowledged mode, the chance of a successful transmission increases if the data packet is resent one or two more times. The effect of retransmissions can be seen in Figure 4.11.

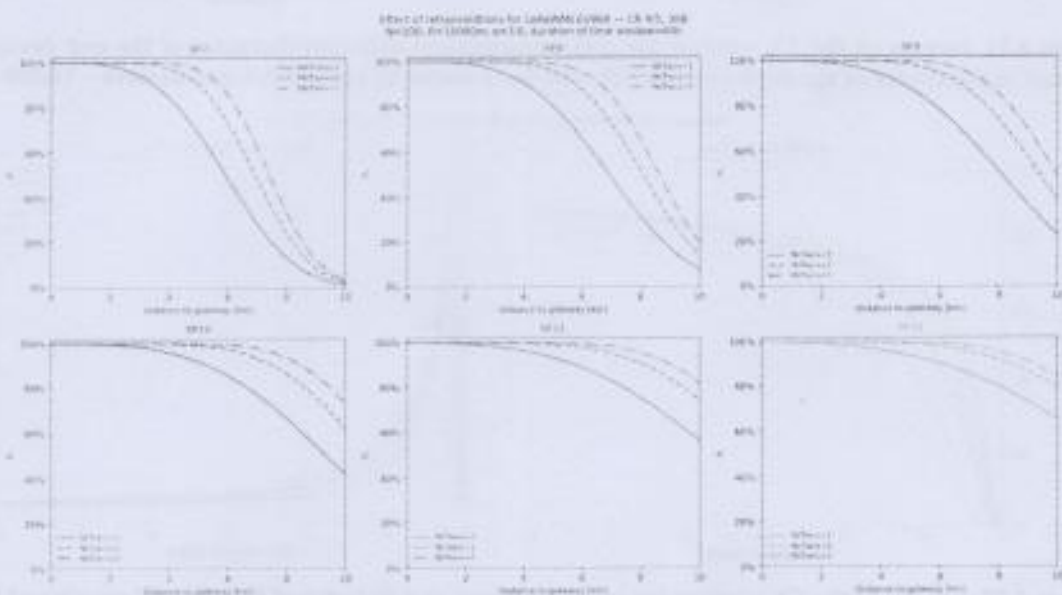


Figure 4.11. Impact of retransmissions

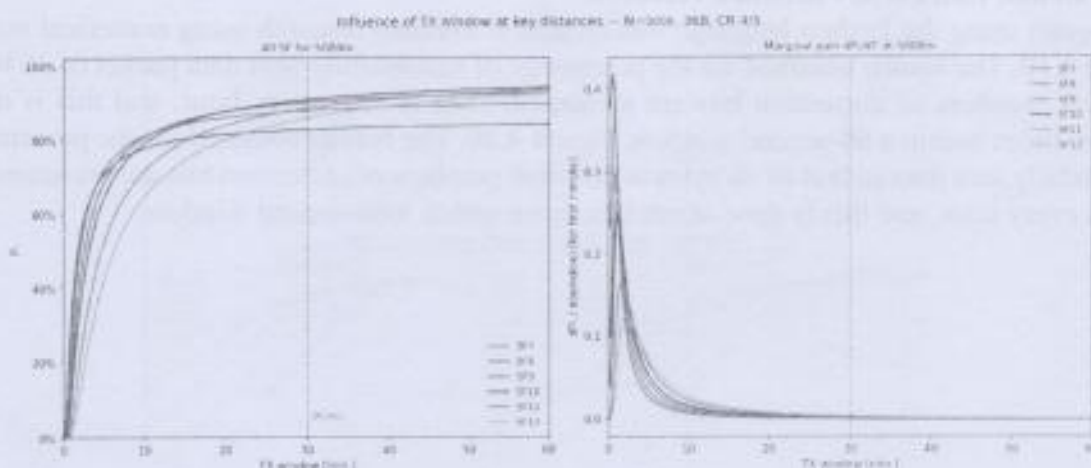


Figure 4.18. Impact of the TX window for communication at a distance of 5000m and number of LoRaWAN end devices – 5000

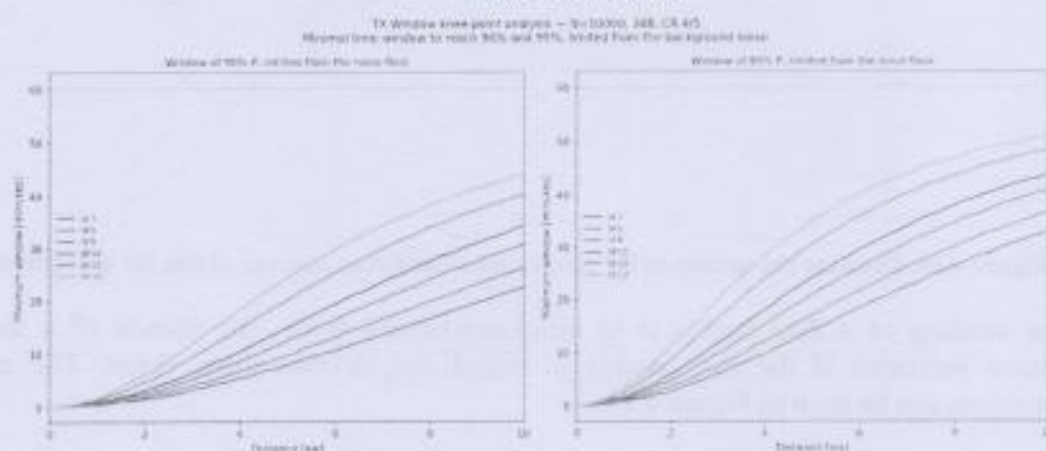


Figure 4.21. Impact of the TX window for communication at different distances of the end devices from the gateway in the center of the deployment circle and the number of LoRaWAN end devices – 10,000

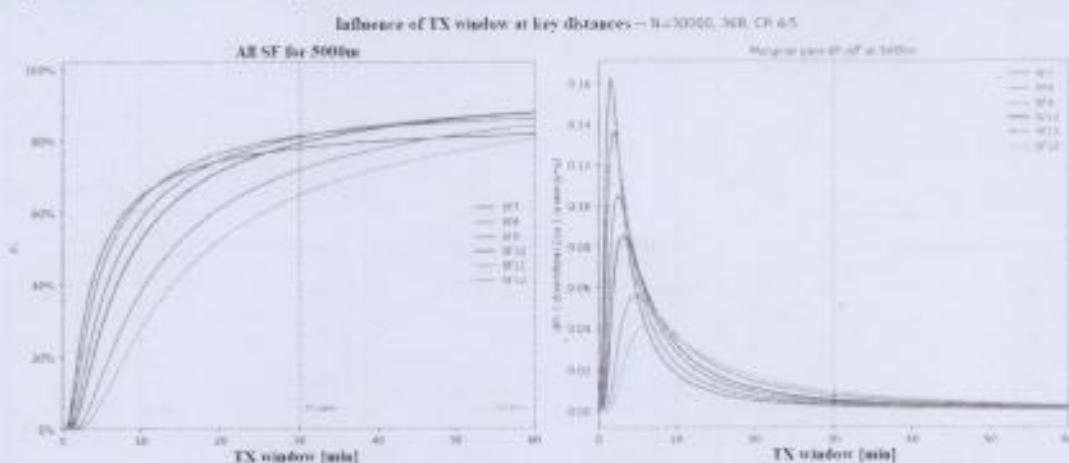


Figure 4.22. Impact of the TX window for communication at a distance of 5000 m and number of LoRaWAN end devices – 30 000

When modeling the power consumption of LoRaWAN terminal devices, several modes of operation can be distinguished:

- Transmission: the most energy-intensive mode when the device transmits data to the gateway
- Receive: the device receives confirmation or gateway data if configured for two-way communication
- Sleep: Lowest consumption mode when the device is idle

- Processing: energy spent on data processing or sensor control.

Energy consumption per cycle can be expressed as:

$$E = E_{tx} + E_{rx} + E_{sleep} + E_{proc}, \quad (4.22)$$

where:

- E_{tx} : Energy to Transmit
- E_{rx} : Energy to Take
- E_{sleep} : Energy in Sleep Mode
- E_{proc} : Energy for data processing

The results obtained are presented in Figure 4.26.

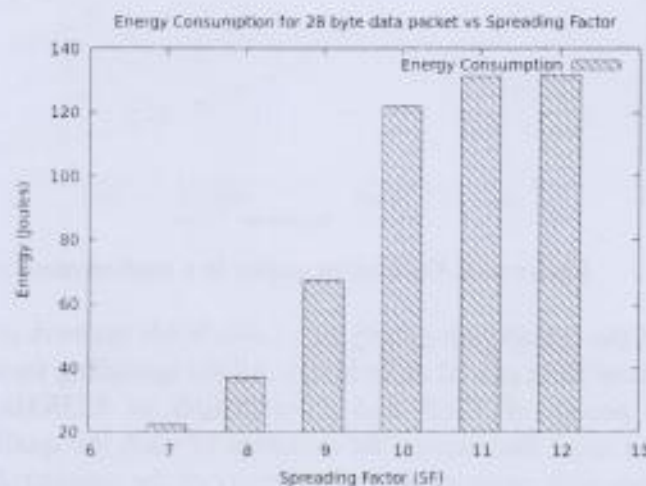


Figure 4.26. Power consumption when working with different spreading factors – SF

4.3 LoRa/LoRaWAN Simulation Study

Scenario 1:

The study is based on Europe's radio broadcast access rules, along with the requirement of the LoRaWAN standard to broadcast in one percent of the total communication time. The data rate of transmission of messages is set explicitly, as opposed to using an algorithm for adaptive one. This allows you to set the parameters of the connection – spreading factor and bandwidth. The 6 different spreading factors were studied and were set indirectly by the parameter "Data rate" – from 0 to 5, in which it is used as a spreading factor from 12 to 7.

The scenario under study is a network of 100 LoRaWAN End Devices for measuring ambient air parameters in a medium-sized city. They are randomly located in a circle around a gateway. The radio connection at different radii of the end device deployment area has been studied. The environment in which the devices are located is urban, which implies multiple obstacles such as tall buildings, vehicles, etc. The shadowing model used is Okumura-Hata, as it can produce reliable simulations in this kind of environment. Two types of urban environment studies have been carried out – a medium-sized city and a large city. The effect of gateway antenna height was also studied. Figure 4.28 the results obtained at a gateway height of 20 meters are presented:

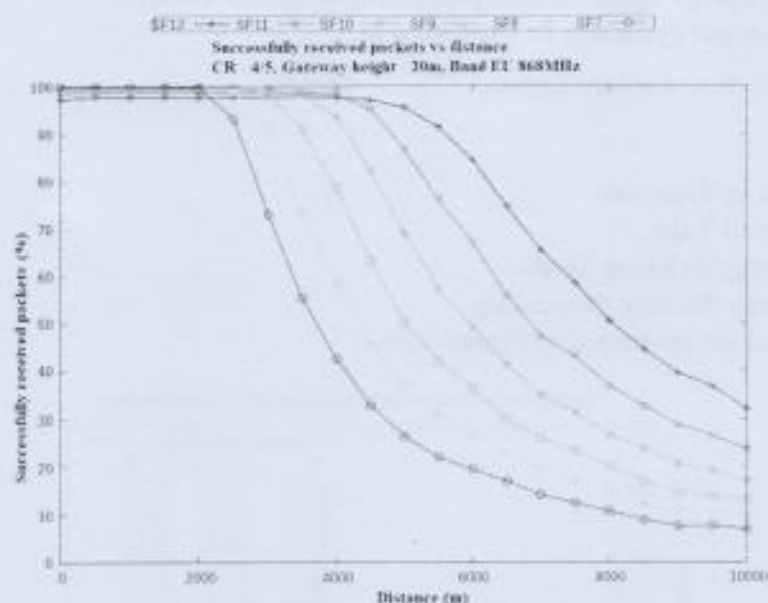


Figure 4.28. Connection quality in a medium-sized city

The graph represents the connection quality of a LoRaWAN network of End Devices that transmit a data packet every hour for a period of 24 hours. All six spreading factors from SF6 to SF12 were used at a transmit power of 12dB and a bandwidth of 125KHz. A transmission without acknowledgment was used, because in the presence of such the quality of the radio connection very quickly decreases with an increase in the density of the connected devices, and the so-called "avalanche of confirmations" occurs. For the purpose of researching the proposed concept of operating a Hybrid End Device, in addition to the standard LoRaWAN frequency band in Europe of 868MHz, the results from the studies of operation in the 433MHz frequency band are presented. Figure 4.30 shows the simulation study in a medium-sized city.

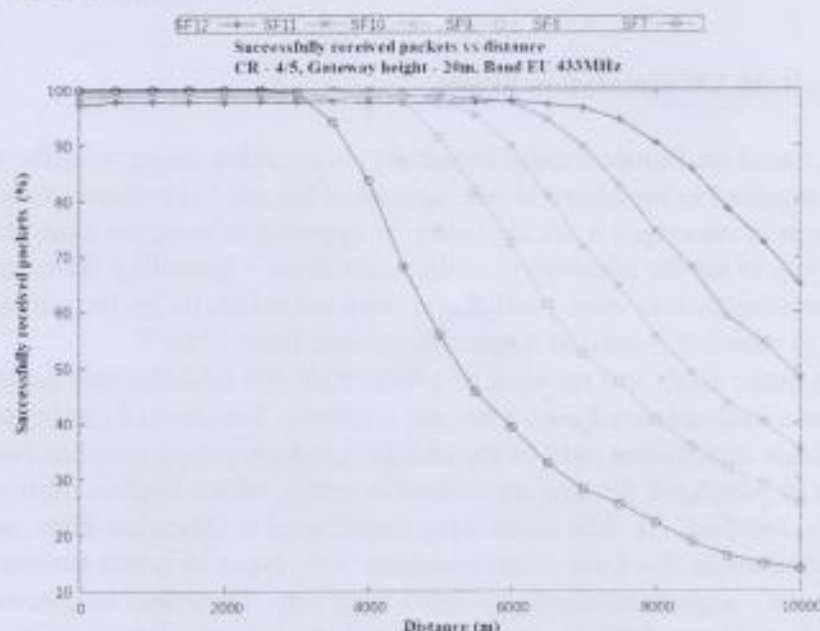


Figure 4.30. Connection quality in a medium-sized city and 433MHz operation

As could be seen from the figures, working in the 433MHz frequency band allows the devices to be deployed at a great distance.

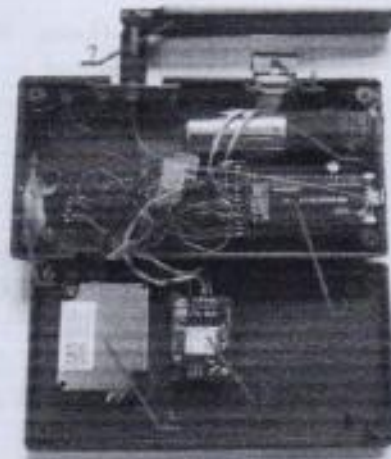


Figure 4.37. Appearance of the proposed mobile device

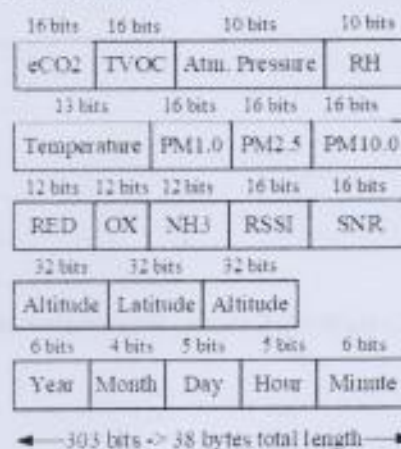


Figure 4.36. Frame Format Data to Send via LoRaWAN

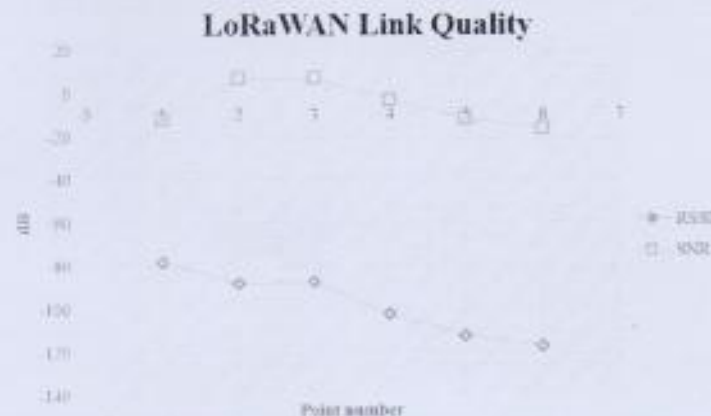


Figure 4.39. Results of experimental data transmission at different points of communication

CHAPTER 5. INTEGRATION OF A SYSTEM FOR MEASURING AMBIENT AIR QUALITY PARAMETERS TO A CLOUD ENVIRONMENT

The integration of cloud technologies into modern Internet of Things (IoT) systems represents a critical stage in the development of environmental monitoring infrastructures. In the context of atmospheric pollution, where parameters such as fine particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO) and sulfur oxides (SO₂) require continuous real-time monitoring, the cloud environment offers the necessary scalability, computing power and long-

term data storage. The choice of LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) as the communication protocol for these systems is dictated by its ability to provide long-distance connectivity at extremely low power consumption, allowing sensor nodes to operate autonomously in urban or remote environments for years.

5.3. The Things Stack V3 Conceptual Framework

The Things Stack (TTS) V3, developed by The Things Industries, is a modern, scalable, and secure LoRaWAN network infrastructure. It serves both public networks and private industrial installations, offering advanced device and gateway lifecycle management features. For air quality measurement purposes, the TTS V3 acts as a message deduplicator when multiple gateways receive the same transmission from a sensor node, and as a security guardian through AES-128 encryption.



Figure 5.1. LoRaWAN Gateway Registration on TheThingNetwork



Figure 5.2. Messages received from the registered gateway

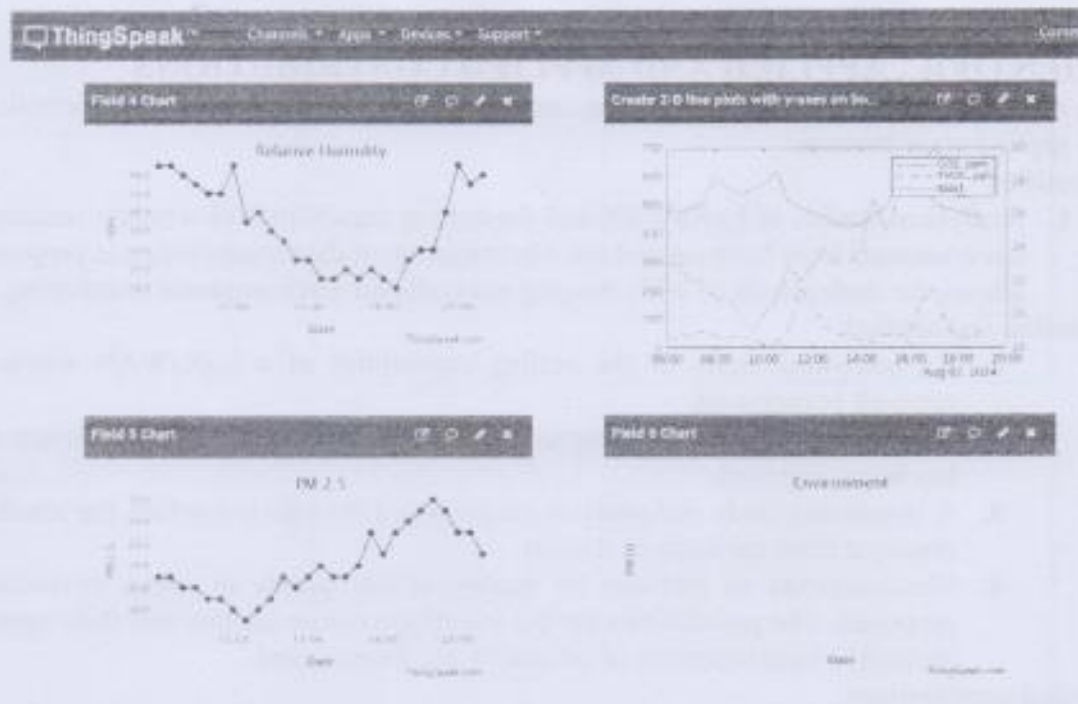


Figure 5.6. Experimental measurements visualized in the user interface of the ThingSpeak cloud service

SCIENTIFIC, APPLIED AND APPLIED CONTRIBUTIONS

The research presented in this dissertation can be summarized in the following scientific, applied and applied contributions:

Scientific:

1. Analytical studies of LoRaWAN and the scaling capabilities of wireless sensors in urban environments have been carried out. Optimization of data transmission is proposed, which allows the deployment of wide-ranging networks for environmental monitoring.

Scientific and applied:

1. An analytical study of the scaling capabilities of a LoRaWAN wireless sensor network is proposed.
2. A hybrid IoT architecture adapted to measure parameters showing ambient air quality has been proposed.
3. A simulation study and analysis are proposed in order to confirm the results obtained from the analytical study.
4. Measurements of ambient air quality at key points in urban environments are proposed. The possibilities for the use of low-value sensors and their application in indicative measurements of air quality are investigated.

Applied contributions:

1. A portable device for measuring parameters showing the quality of ambient air has been designed and implemented.
2. A wireless portable device for measuring ambient air quality, which uses LoRaWAN communication for data transmission, has been designed and implemented. Also, to work with the measuring device, a mobile application has been implemented for management and visualization of the measurement results obtained.

LIST OF PUBLICATIONS ON THE DISSERTATION

- [P1]. Lishev, S. (2018). INTEGRATED SYSTEM FOR EXPERIMENTAL RESEARCH WITH REMOTE AND MOBILE ACCESS. Scientific researches of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, series B. Natural Sciences and the Humanities, Vol. XVIII, ISSN 1311-9192 (Print), ISSN 2534-9376 (On-line), 2018.
- [P2]. Lishev, S.; Pavlova, P.; Spasov, G. (2021). Application of distributed wireless measurements in wind tunnels. 2021 Computer and Communications Engineering, Vol. 15, No. 1/2021.
- [P3]. Lishev, S.; Pavlova, P.; Spasov, G.; Petyrova, G.; Proc. XXXI International Scientific Conference Electronics - ET2022, September 13 - 15, 2022, Sozopol, Bulgaria
- [P4]. Lishev, S.; Spasov, G.; Petyrova, G.; Pavlova, P. (2023). Air parameters monitoring in urban area based on LoRaWAN: Data collection for environmental assessment. Proc. XXXII International Scientific Conference Electronics - ET2023, September 13 - 15, 2023, Sozopol, Bulgaria
- [P5]. Lishev, S.; Spasov, G.; Petyrova, G. (2025). LoRaWAN IoT System for Measuring Air Parameters in a Traffic Monitoring Station. Eng. Proc. 2025,100, 17.
<https://doi.org/10.3390/engproc2025100017>

SUMMARY

METHODS AND TOOLS FOR REMOTE MEASUREMENT OF PARAMETERS OF THE AMBIENT AIR

Stefan Nikolaev Lishev

The increased urbanization with all of its advantages carries some challenges, one of which is the low air quality. For urban planning continuous, spatially dense monitoring is difficult to achieve with reference-grade instrumentation alone because of its cost. This dissertation addresses the problem by developing methods and tools for the remote measurement of atmospheric air parameters using networks of low-cost sensors, with particular attention to the wireless communication infrastructure connecting the sensor nodes to atmospheric monitoring systems.

The proposed measurement system is built around low-cost sensor nodes that acquire several atmospheric parameters — particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), eCO₂, TVOC, temperature and humidity, and transmit the collected data over the LoRaWAN protocol. As the sensors used are not of reference-grade accuracy, the goal of the measurements is indicative rather than metrological. This makes possible dense spatial coverage at low cost. An adapted Internet-of-Things (IoT) model is proposed for integrating such sensor nodes into atmospheric monitoring systems, covering the data path from the sensor node, through the LoRaWAN network infrastructure, to cloud-based platforms.

A substantial part of the dissertation investigates the quality of the wireless link under real urban propagation conditions and the scalability of the resulting monitoring networks. Examinations are made on empirical hardware measurements, NS-3 network simulations, and analytical modelling using stochastic geometry.

To overcome limitations such as duty cycle restriction of 1% for Europe, or spectrum congestion, a hybrid communication model is proposed, combining the standard EU 868 MHz band with the EU 433 MHz band in order to increase the scalability of the system. Under this model, one or more LoRaWAN sensor end devices can self-organize into a subordinate LoRa network operating on the lower frequency band. The data collected within that sub-network are then relayed onward through the standard EU 868 MHz LoRaWAN means. This offloads traffic from the more constrained 868 MHz band and allows the overall system to support a larger number of sensor nodes within the applicable spectrum regulations.

In addition, the analytical part of the study proposes a mechanism for limiting collisions during the transmission of measurement data. Instead of transmitting immediately once a measurement is available, each device selects a random moment within a defined time window of several minutes in which to send its data. Because atmospheric processes change slowly relative to such short intervals — that is, they are inertial — this randomization introduces no meaningful loss of representativeness or timeliness in the measured data, while substantially reducing the probability that two or more devices transmit at the same time and collide.

Together, the adapted IoT model, the hybrid dual-band (EU 868/433 MHz) communication scheme, and the collision-mitigation mechanism form a coherent methodology for building scalable, low-cost LoRaWAN-based networks for remote atmospheric air monitoring, validated through a combination of empirical measurement, network simulation, and analytical modelling.