



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ФАКУЛТЕТ ПО ЕЛЕКТРОННА ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОННА ТЕХНИКА“

МАРИН БЕРОВ МАРИНОВ

ИНТЕЛИГЕНТНИ СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ ЗА ЕКОЛОГИЧЕН МОНИТОРИНГ

АВТОРЕФЕРАТ
НА
ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПРИДОБИВАНЕ НА НАУЧНАТА
СТЕПЕН „ДОКТОР НА НАУКИТЕ“

Област на висше образование: 5. Технически науки
Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и
автоматика
Научна специалност: „Методи, преобразуватели и уреди за измерване и
контрол на физико-химични и биологични величини“

СОФИЯ
2024

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електронна техника“ към Факултет по електронна техника и технологии на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 10.01.2024 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 09.05. 2024 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-09/19.01.2024 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д.т.н. инж. Иво Илиев – председател
2. Проф. д-р. физ. Георги Ангелов – научен секретар
3. Проф. д.т.н. инж. Иван Ячев
4. Проф. д.т.н. инж. Тихомир Таков
5. Проф. дн. инж. Никола Колев
6. Проф. д-р инж. Анатоли Александров
7. Проф. д-р инж. Елисавета Гаджева

Рецензенти:

1. Проф. д.т.н. инж. Иво Илиев
2. Проф. дн. инж. Никола Колев
3. Проф. д-р инж. Анатоли Александров

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултета по електронна техника и технологии, блок № 1, кабинет 1332А на Технически университет – София.

Автор: Марин Беров Маринов

Заглавие: Интелигентни сензорни системи за екологичен мониторинг

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

1 Увод

1.1 Мониторинг на околната среда – актуалност

През 21-ви век опазването на околната среда се превърна в съществен проблем както в развитите, така и в развиващите се страни. Нарастването на населението и напредъкът на технологиите създават нови предизвикателства пред опазването на околната среда. Налице са множество доказателства, които показват, че подобно развитие е довело до значителни вредни въздействия върху нея. Дейностите на хората често причинява значителни негативни промени на въздуха, водата, почвата и климата. Това на свой ред води до все по-нарастваща необходимост от опазването на околната среда и фокусира вниманието на обществото към все по-обхватното ѝ наблюдаване и характеризиране на състоянието ѝ чрез оценка на редица физични, химични и биологични фактори, които и оказват влияние. Тази информация е необходима за изследователите, за лицата, отговорни за вземането на решения и за обществото като цяло с цел осъществяването на социалните промени, необходими за запазване и поддържане на необходимата жизнена среда за бъдещите поколения (Artiola, Pepper, & Brusseau, 2004).

Мониторингът на околната среда обхваща нейното наблюдение и изследване. Чрез обективни наблюдения се получават надеждни данни, които от своя страна дават ценна информация. От научна гледна точка това се постига чрез събиране и обработване на данни (т.нар. *Learning analytics*), след което се извлича необходимата информация. По този начин основаният на научен подход мониторинг на околната среда обхваща първите три стъпала на т.нар. *стълбица на познанието* (Roots, 1997). Извлечените знания (Information-derived knowledge), които водят до по-добро разбиране на проблемите, а това способства вземането на информирани решения. Важно е обаче да се подчертае, че и други фактори, включително политически, икономически и социални, също влияят значително върху вземането на решения.

1.2 Изследователски предизвикателства и цели на изследването

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

В резултат на направения обзор и посочените основни изводи относно съвременното състояние на проблематиката по изследването е прецизирана неговата **основна цел**:

Анализ и синтез на нови подходи, методи и алгоритми за повишаване на качеството на данните, получавани от нискобюджетни сензорни системи и IoT устройства за мониторинг на основните параметри на въздушна среда, питейни води, почва и шумови въздействия в урбанизирани среди.

За изпълнение на дефинираната цел се решават следните *задачи*:

1. Анализ на съществуващи интелигентни сензорни системи, включващ и тяхната базова архитектура.
2. Дефиниране на основни характеристики на интелигентните сензорни системи и IoT устройства, участващи в съвременните реализации и организиране на експериментално измерване и анализ на нива на основните замърсители на въздух, вода, почва и на шум в урбанизирани среди.

3. Изследване на точността на нискобюджетните сензори, използвани за измерване на концентрациите на основни замърсители на околната среда както и намиране на подходи за филтриране и сливане на сензорните данни в случай на електронни устройства с ограничени ресурси.
4. Подходи и методи за линеаризиране на сензорните предавателни характеристики, както и за калибриране на сензорните устройства при намиране на обобщено решение на задачата за линеаризиране на предавателни характеристики от произволен вид.
5. Създаване на прототипи на интелигентни сензорни системи и тестването им в реални условия, както и тестване на алгоритми и програмни среди за локализация и картографиране на открито и закрито.
6. Използване на безпилотни летателни апарати и други автономни мобилни платформи при документирането и картографирането на замърсявания в труднодостъпни райони.
7. Разработка на подходи за обработка на сензорните данни на базата на алгоритми, използващи изкуствен интелект, които да повишават качеството на данните и тяхното пространствено разрешение, както и на методи за управление на сензорните ресурси при използването на безжични интерфейси.

Научна новост

Научната новост в тази работа се състои в разработването и прилагането на нови методи, практически подходи и алгоритми за подобряване на качеството на данните от нискобюджетни сензорни системи и IoT устройства за мониторинг на основни параметри на въздушната среда, питейната вода, почвата и шумовото замърсяване в градска среда. Някои от основните научни новости са включват:

- Разработване на нови алгоритми за линейна апроксимация на сензорни характеристики за осигуряване на зададено ниво на грешка при линеаризация.
- Предлагане на иновативни подходи за полигонална апроксимация на сензорни предавателни функции и решаване на нелинейни оптимизационни задачи, свързани с полилинеаризацията.
- Представяне на подобрени стохастични подходи за оценка на сензорни параметри, съпроводени с шум и повишаване на качеството на сензорните данни с помощта на средното квадратично отклонение на Алън.
- Разработване на усъвършенствани алгоритми за калибриране и повишаване на точността на устройства за мониторинг на околната среда.
- Предлагане на методи за повишаване на точността на локализиране и разпознаване на обекти.
- Внедряване на интелигентни сензорни системи за мониторинг на параметрите на въздуха, питейната вода, почвата и шума в градска среда.
- Проектиране и верификация на мултисензорни системи и мащабируеми мобилни сензорни системи за мониторинг на основни параметри на въздуха с помощта на нискобюджетни сензори и микроконтролери с ограничени изчислителни ресурси.

- Разработване и проверка на сензорни системи за специфични параметри на въздуха в затворени помещения и оценка на качеството на водата, базирани на колориметрични методи.
- Изследване и проверка на сензорни системи за измерване на влажността на почвата.
- Разработване и проверка на мобилни безжични системи за измерване и картографиране на основни параметри на шума.

Тези научни новости демонстрират иновативните подходи и постиженията, направени в областта на интелигентните сензорни системи за мониторинг на околната среда, като проправят пътя за по-точно, ефективно и надеждно събиране и анализ на данни в различни приложения за мониторинг.

Практическа приложимост

Резултатите от тази дисертация /в областта на интелигентни сензорни системи за мониторинг на околната среда/ предлагат значителна и широкообхватна практическа приложимост в различни реални сценарии:

- *Подобрено качество на мониторинга на околната среда:* Напредъкът в подобряването на качеството на данните от сензорите повишава точността и надеждността на системите за мониторинг на околната среда, като позволява по-точна оценка на качеството на въздуха, на водата, състоянието на почвата и шумовото замърсяване в градска среда.
- *Икономически ефективни решения:* Използването на нискобюджетни сензори и устройства с ограничени ресурси за реализация на интелигентни сензорни системи осигурява икономически ефективни решения за мониторинг на параметрите на околната среда в реално време, което прави управлението на околната среда по-достъпно и финансово изгодно.
- *Повишена точност на данните:* Разработените алгоритми за калибриране, линеаризация и повишаване на точността на сензорните данни подобряват качеството на данните, генерирани от устройствата за мониторинг на околната среда, като осигуряват по-надеждни и точни измервания.
- *Локализиране и разпознаване на обекти:* Методите за повишаване на точността на локализиране и разпознаване на обекти могат да се използват в различни приложения, като например проследяване на източници на замърсяване, картографиране на нивата на замърсителите и дългосрочно документиране на промените в околната среда в градските райони.
- *Мобилни системи за наблюдение:* Проектирането и тест на мобилни безжични системи за измерване и картографиране на основни параметри на шума предлагат практически решения за мониторинг на нивата на шумово замърсяване, като улесняват ефективното събиране и анализ на данни в различни среди.
- *Селскостопански мониторинг:* Разработените сензорни системи за измерване на влажността на почвата и мониторинг на селското стопанство могат да оптимизират използването на вода, да повишат добива на култури и да подобрят цялостната устойчивост на селското стопанство чрез практики за прецизно земеделие.
- *Оценка на качеството на въздуха в помещенията:* Сензорните системи за специфични параметри на въздуха в помещенията предоставят ценна

информация за качеството на въздуха в помещенията, което позволява по-добро управление на вътрешната среда и осигуряване на здравето и комфорта на обитателите.

Като цяло, резултатите от тази работа допринасят за иновативни решения за подобряване на качеството на данните, икономически ефективен мониторинг и повишена точност при измерване и оценка на ключови параметри на околната среда в градски и селскостопански условия, което е от полза за различни приложения за мониторинг на околната среда.

Апробация

Резултатите от дисертацията са:

- докладвани на **41** научни конференции, от които **4** в чужбина;
- представляват части от дейностите по **11** научно-изследователски проекта;

Публикации: Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 64 публикации, от които 49 научни публикации в издания, които са реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация и 15 научни публикации в списания с научно рецензиране.

Цитиране: С оглед анализ и оценка на получената публичност на предложени дисертационен труд, може да се отбележи, че към декември 2024 в SCOPUS са забелязани над 200 цитирания на авторски публикации, включени в дисертацията.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е с обем 420 страници и се състои от увод, 7 глави, приноси, списък на използвана литература, включваща 442 източника и 5 приложения.

Работата включва общо 207 фигури, 52 таблици и списък на използваните означения и съкращения. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

2 СЪВРЕМЕННИ СЕНЗОРИ И ТЕХНОЛОГИИ ЗА ЕКОЛОГИЧЕН МОНИТОРИНГ

2.1 Мониторинг на качеството на въздуха

Съвременните нискобюджетни сензори и технологии за мониторинг на въздуха се отличават с по-ниски цени и по-проста инсталация, което ги прави достъпни за широк кръг от приложения. Тези сензори са компактни и преносими, което позволява удобно разполагане на различни места с цел наблюдение на конкретни зони. Въпреки ниските си цени, тези сензори могат да измерват важни параметри като концентрацията на замърсяващи вещества, ФПЧ 1, ФПЧ 2,5 и ФПЧ 10, вредни газове както и други замърсители. Независимо от някои ограничения в точността им, те предоставят достатъчно полезна информация за качеството на въздуха.

Въпреки своите предимства, трябва да се има предвид, че нискобюджетните сензори и свързаните с тях технологии не достигат същата прецизност и надеждност като по-скъпите професионални сензорни системи. Необходимо е тяхното правилно калибриране и редовна поддръжка, както и сравнение на техните показания с такива от референтни системи, за да се гарантира точността на получаваните данни.

2.1.2 Мониторинг на качеството на въздуха на открито и закрито



Фиг. 2.1. Графично представяне на основни стъпки при реализация на устройства за изследване на качеството на въздуха на открито

Като атмосферен въздух се определя въздухът, който е външен за сгради и други закрити пространства и се намира в долната част на атмосферата, близо до земната повърхност (Фиг. 2.1). Нормите за замърсяване на въздуха обикновено се отнасят до въздуха на открито (Concas, et al., 2021).

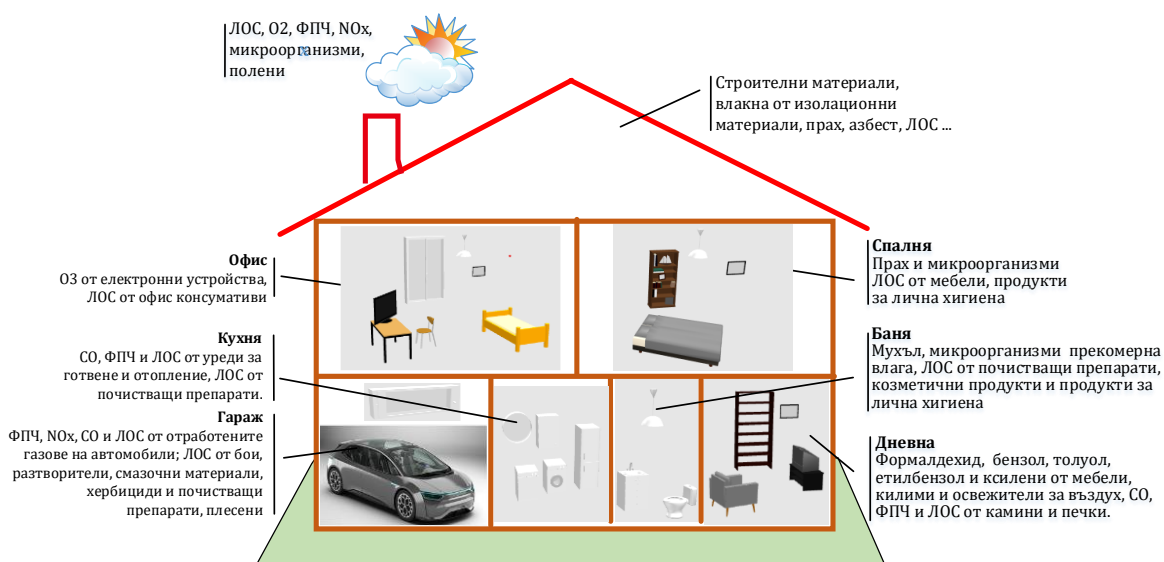
Основни замърсители

Изследванията за измерване на качеството на въздуха обикновено категоризират замърсителите като газообразни или прахови частици, според състава на замърсителя. В директиви на ЕС са определени **седем основни замърсителя** на въздуха (т.нар. main air pollutants): амоняк (NH₃), азотни оксиди (NO_x), въглероден оксид (CO), фини прахови частици с аеродинамичен диаметър **под** 2,5 μm и 10 μm (ФПЧ 2,5 и ФПЧ 10), серни оксиди (SO_x), тропосферен озон (O₃) и неметанови летливи органични съединения (Non-methane volatile organic

compounds - *NMVOC*) (Koolen & Rothenberg, 2019; Council of the European Union, 2008).

Последните проучвания на замърсения въздух в затворени помещения показват, че средата в тях може да бъде поне два пъти по-замърсена от средата на открито (European Commission, 2003).

Хората на практика прекарват около 90% от времето си на закрито. Поради това закритите помещения са основната среда за изследване на въздействието на замърсяването на въздуха (Фиг. 2.2) (Hasager, et al., 2019).



Фиг. 2.2. Основни източници на замърсители в жилищата, адаптирано от (González-Martín, Kraakman, Pérez, Lebrero, & Muñoz, 2021)

2.1.3 Сензори за изследване качеството на въздуха

На пазара на нискобюджетните сензори за газообразни замърсители се предлагат четири основни типа сензорни технологии:

- сензори на основата на полупроводникови метални оксиди (MOx),
- електрохимични сензори (EXC),
- недисперсни инфрачервени (NDIR) сензори и
- фотойонизационни детектори (PID).

В дисертацията накратко са представени основните свойства на тези технологии. MOx и EXC сензорите са с най-ниски цени и се използват най-често при реализации на нискобюджетни измервателни устройства. NDIR и PID сензорите са с по-високи цени (често в интервала 100–1000 евро), но обикновено са с много по-добри метрологични параметри. Съществуват и други технологии за измерване на концентрациите на газообразни замърсители на въздуха, но те са с много високи цени, което ги прави неприложими за нискобюджетни сензорни мрежи.

2.2 Мониторинг на качеството на вода и почва

Съвременните сензори и технологии за мониторинг на **вода** са важен инструмент за наблюдение и анализ на качеството на водните ресурси. Типичните сензори за мониторинг на вода измерват параметри като рН стойност, температура, концентрация на кислород, електрическа проводимост и ниво на

замърсяване с тежки метали или химикали. Тези сензори могат да бъдат инсталирани както на стационарни, така и на мобилни системи за наблюдение.

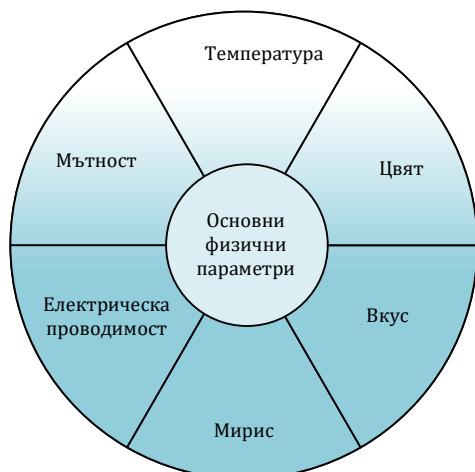
2.2.2 Мониторинг на качеството на вода

Параметри за качество на водата и индекси

Нарастването на броя на заболяванията, предавани по воден път, налага задълбочено проучване на степента на замърсяване на водата в околната среда. В резултат на това мониторингът на качеството на водите е обект на голямо внимание в научната литература. Измерването на качеството на водата е свързано с нейните физични (мътност, температура, електропроводимост, цвят, вкус и мирис), химични (рН, киселинност, алкалност, хлориди, остатъчен хлор, твърдост, разтворен кислород, БПК, ХПК и т.н.) и биологични (бактерии, вируси, протозои, водорасли, планктон и т.н.) характеристики.

Качеството на водата може да се раздели на четири категории според физико-химичните ѝ характеристики: питейна (безопасна за пиене), вкусна (съдържаща химикали, които не представляват заплаха), замърсена (съдържаща химикали, които са опасни) и заразена (с патогени).

Основни физични параметри (Фиг. 2.7) на качеството на водата се възприемат обикновено чрез сетивата за допир, зрение, мирис и вкус. Мътността е оптично свойство, чрез което се измерва способността на водата да пропуска светлина.



Фиг. 2.7. Основни физични параметри на качеството на питейна вода



Фиг. 2.8. Основни химични параметри на качеството на питейна вода

Химичните характеристики на водата са отразени на Фиг. 2.8 нейното pH , киселинност, алкалност, твърдост, общо суспендирани твърди вещества (total suspended solids - TSS), общо разтворени твърди вещества (OPTB-total dissolved solids - TDS), химична потребност от кислород (ХПК-chemical oxygen demand - COD), биологична потребност от кислород (БПК - biological oxygen demand - BOD), разтворен кислород, наличие на хлориди, остатъчен хлор, сулфати, флуориди, нитрати, концентрация на метали (Fe, Cu, Zn, Mn, Na, K и др.) и др.

2.2.3 Сензори за мониторинг на качеството на водата

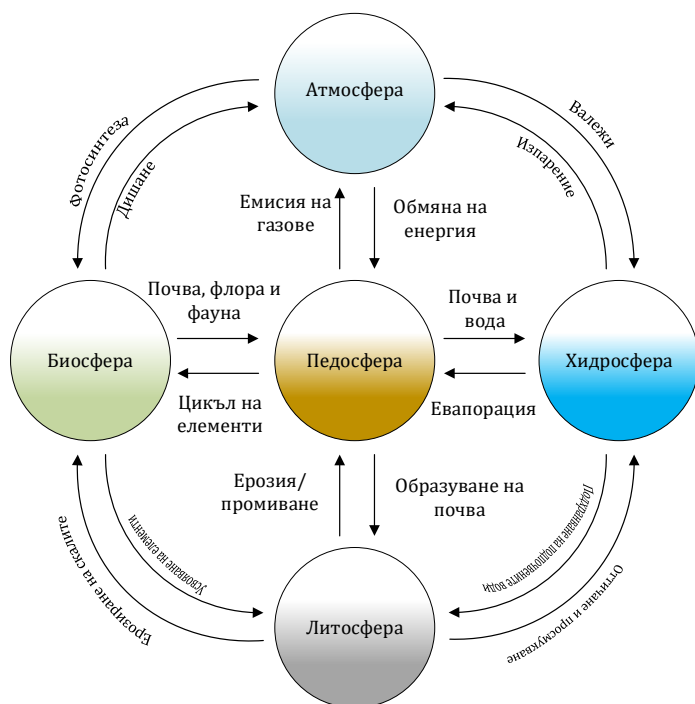
Устройствата за мониторинг на качеството на водата позволяват определяне предимно на физико-химичните характеристики на водата, разгледани в предходния раздел. Като заместител на лабораторната система,

преносимите полеви устройства предлагат бърз анализ и позволяват мониторинг на параметрите за качество на водата на място/онлайн (Qin, Kwon, Howlader, & Deen, 2015).

За да бъдат разработени и приложени в различни условия, преносимите устройства трябва да притежават следните характеристики: а) Кратко време за реакция; б) Способност за откриване на множество замърсители; в) Лесно вземане на проби и автоматизация на процесите; г) Бързо събиране и архивиране на данни; е) Достатъчна чувствителност и селективност за скрининг на замърсители; з) Добра възпроизводимост; и) Здравина и издръжливост за работа в полеви условия. Включването на всички тези важни характеристики в едно устройство представлява сериозен проблем. В този раздел са разгледани потенциалните техники за решаването му, които са били успешно приложени ; или са перспективни за бъдещи практически приложения на устройствата.

2.2.4 Мониторинг на качеството на почва

Почвите могат да бъдат оценени по различни критерии. Един от тях е молекулярното ниво на отделните компоненти на почвата. Той включва изследване на почвена минералогия, на индивидуални триизмерни почвени тела (известни като педони) и на широкомащабни почвени видове, разположени последователно, и самата педосфера. Педосферата е слой от земната повърхност, който се състои от почва и има комплексни динамични взаимодействия с литосферата, хидросферата, биосферата и атмосферата (Фиг. 2.10) (Lal, Kimble, & Follett, 1998).



Фиг. 2.10. Диаграма, илюстрираща връзката и интерактивните процеси на педосферата с други важни системи на Земята (Lal, Kimble, & Follett, 1998)

Подходящият инструментариум за измерване на почвените свойства при всеки от критериите за оценка може да варира и да бъде повлиян от различни фактори: целта на оценката, техническите възможности за измерване, наблюдаваните пространствени и времеви изменения, както и ограниченията по себестойността. Необходими са нови инструменти за оценка на физичните, химичните и биологичните свойства на почвата, за да се разберат по-добре

сложните процеси и пространствените и времеви изменения, които се срещат в почвите в различна степен.

2.3 Мониторинг на вибрации и шум

Съвременните нискобюджетни сензори и технологии за мониторинг на шум предоставят достъпни и удобни начини за измерване и анализ на шума в околната среда. Тези сензори са компактни, удобни за инсталиране и поддръжка, което ги прави подходящи за широк кръг от приложения.

Шумът в околната среда е един от основните съвременни проблеми, които трябва да бъдат изследвани, поради значителното му негативно въздействие върху здравето на хората. През последните десетилетия бяха разработени множество международни и национални норми и директиви за ограничаването на шума, които поставят специфични изисквания към местните власти.

2.4 Мониторинг на състоянието на технически обекти

Съвременният технически прогрес насочва вниманието към разработване на иновативни методи и технологии за мониторинг и поддръжка на технически обекти. Сензорните системи, използващи нискобюджетни акселерометри, жирокопи и микрофони, са важни инструменти в тази област, предоставяйки значителна информация за състоянието и работата на различните системи.

2.5 Изводи по глава 2

Въз основа на направения обзор за съвременното състояние на изследванията и практическите реализации на интелигентни сензорни системи за екологичен мониторинг, могат да се направят следните основни изводи:

- Тематиката, свързана с мониторинга на въздух, вода, почва и шум в урбанизирани среди, е изключително актуална и изследванията в тези области постоянно се задълбочават.
- Нискобюджетните сензори революционизират съвременния екологичен мониторинг, предоставяйки икономични решения за следене на околната среда. Тяхната достъпност и мобилност улесняват следенето на въздушни среди, водни и почвени ресурси в реално време, което може да има ключова роля при екологичното управление и за здравето на хората.
- От особен интерес при изследванията в посочените области е използването на нискобюджетни сензори и устройства с ограничени ресурси за реализацията на интелигентни сензорни системи. Чрез тези устройства се цели получаването на големи масиви данни с висока времева и пространствена разделителна способност на приемлива цена.
- Основен проблем на нискобюджетните устройства за екологичен мониторинг е качеството на генерираните от тях данни. За решаване на този проблем се използват разнообразни подходи за оценка на точността на сензорите и алгоритми за тяхното *линеаризиране и калибриране*, с цел постигане на необходимите за съответни приложения *точности* в измервателния процес.
- Важни аспекти при избора на алгоритмите за калибриране са необходимостта от осъществяването им в мрежова среда и върху множество устройства, осигуряващи голямо пространствено покритие, което е необходимо за осъществяване на широкообхватен мониторинг. Тези аспекти изискват и нови съвременни подходи, каквито са сливане на

сензорни данни, машинно обучение, обработка на големи масиви данни, изкуствения интелект и др. В областта на екологичния мониторинг все по-широко приложение намират мобилните сензорни системи и системи с автономна навигация, които се използват за картографиране на нивата на основни замърсители, създаване на т.нар. шумови карти, локализиране на източници на замърсяване и др. Това налага съчетаване на изследванията по проблематиката за екологичен мониторинг с изследвания за *локализация и картографиране*.

2.6 Цели и задачи

В резултат на направения обзор и посочените основни изводи **!** относно съвременното състояние на изследването, може да бъде прецизирана неговата **основна цел**:

Изследване и синтез на нови подходи, методи и алгоритми за повишаване на качеството на данните, получени от нискобюджетни сензорни системи и IoT устройства за мониторинг на основни параметри на въздушна среда, питейни води, почва и шумови въздействия в урбанизирани среди.

За изпълнение на дефинираната цел се решават следните *задачи*:

1. Анализ на съществуващите интелигентни сензорни системи за екологичен мониторинг и на тяхната базова архитектура.
2. Определяне на основни характеристики на интелигентните сензорни системи и IoT устройства в съвременните приложения и организиране на експериментално измерване и анализ на нивата на основните замърсители на въздуха, водата, почвата и на шума в урбанизирани среди.
3. Изследване на точността на нискобюджетни сензори за измерване на концентрациите на основни замърсители на околната среда и намиране на подходи за филтриране и сливане на сензорни данни, подходящи за електронни устройства с ограничени ресурси.
4. Разработване на подходи и методи за линеаризиране на сензорни предавателни характеристики и за калибриране на сензорни устройства; намиране на обобщено решение на задачата за линеаризиране на предавателни характеристики от произволен вид в мултисензорни среди.
5. Създаване на прототипи на интелигентни сензорни системи и тестването им в реални условия, тестване на алгоритми и програмни среди за осъществяване на локализация и картографиране на среди на открито и закрито.
6. Използване на безпилотни летателни апарати и други автономни мобилни платформи за документиране и картографиране в труднодостъпни райони.
7. Разработка на подходи за обработка на сензорни данни и прилагане на алгоритми, използващи изкуствен интелект, които да позволяват подобряване на тяхното качество, пространствена и времева разделителни способности, както и на методи за управление на сензорните ресурси за използване на безжични интерфейси.

3 МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКА И ПОВИШАВАНЕ ТОЧНОСТТА НА СЕНЗОРНИ ДАННИ

В тази глава обект на изследване са методите и тяхната ефективност за оценка и повишаване на точността на сензорни данни.

Качеството на данните от сензорите играе жизненоважна роля в приложенията на нискобюджетни сензори и устройства с ограничени ресурси, тъй като те стават неефективни, ако качеството на данните е незадоволително. Целта е да се представи систематичен преглед на основни въпроси, свързани с *качеството на сензорните данни*. По-конкретно се търсят отговори на следните изследователски въпроси:

- Какви са различните видове грешки при данните от сензори?
- Как да се откриват тези грешки и как да се оценяват техните нива?
- Какви са възможните подходи за коригиране на грешките?

Редица изследвания показват, че основните видове грешки на сензорните данни, наред с липсващите данни, са грешки като *отклонения на нулата, дрейф, мултипликативни грешки и др.*

3.1 Теоретични основи

Стохастични методи за оценка на грешки и подобряване на точността

Стохастичното моделиране на грешките на сензорите използва различни методи. Изборът на метод зависи от изискванията на конкретното приложение. В Таблица 3.1 е представено обобщение на основните методи и са очертани техните характерни предимства и ограничения.

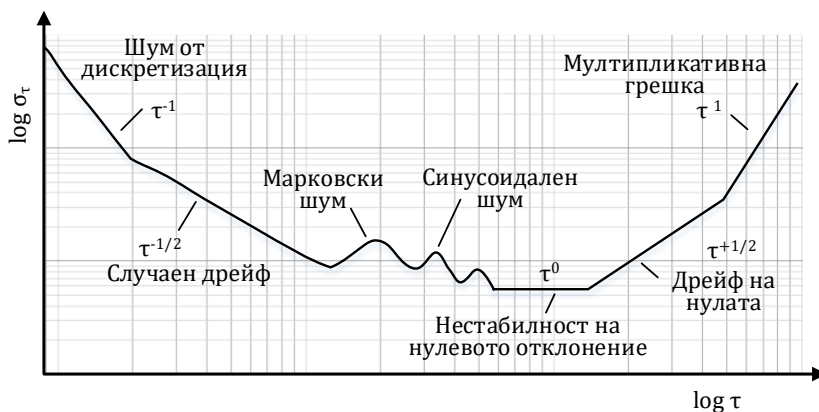
Таблица 3.1. Основни методи за стохастично моделиране (N. El-Sheimy, H. Hou and X. Niu, Jan. 2008)

	Автокорелационна функция	Спектрална плътност на мощността (СПМ)	Адаптивен филтър на Калман	Дисперсионен анализ
(+) Предимства	Подходящ за анализ на периодични и неперидични сигнали	Подходящ за анализ на периодични и неперидични сигнали	Възможност за проследяване на високочестотна информация в сигнала	Възможност за подробно анализиране на набор от данни във времевата област
	Двойки преобразувания на Фурие със спектрална плътност на мощността	Двойки преобразувания на Фурие с автокорелация	Самостоятелно адаптиране към конкретната ситуация	Лесна интерпретация и извличане на параметри
(-) Ограничения	Необходими са сигнали с голяма продължителност; чувствителен модел	Необходима е техника за осредняване на честотата	Ограничения на приложимостта на алгоритъма	Зависимост на резултатите от разбирането на физиката на процеса
	Първо трябва да се приложи метод за намаляване на шума	Необходимо е извличане на сложни параметри	Висока изчислителна сложност	Необходими са дългосрочни данни за подобряване на оценката на точността

Подходът с използване на автокорелационната функция е еквивалентен на подхода на спектралната плътност на мощността (СПМ; Power Spectral Density - PSD) във времевата област. Методът на корелацията е много чувствителен към модела и не е подходящ за изследване в широки динамични диапазони на процеси от по-висок порядък. Той работи най-добре с априорни познания, базирани на модел (IEEE Std. 952-1997, 1998). Въпреки че автокорелационната функция или изчисленията на разпределението на спектралната плътност на

мощността съдържат пълно описание на източниците на грешки, тези резултати често са трудни за извеждане и интерпретиране.

Съществува и ясна зависимост между СКО на Алън и спектралната плътност на мощността (СПМ). СПМ е често срещан начин за представяне на спектралното разлагане на времевата област, превръщайки я в мощен инструмент за анализиране на данни от стохастични процеси (Фиг. 3.1).

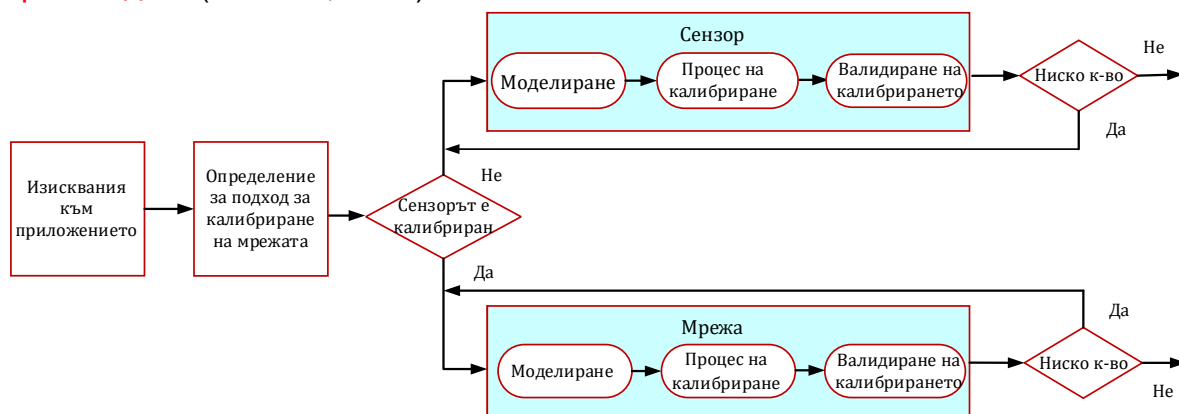


Фиг. 3.1. Типична логаритмична диаграма на резултатите от анализа на СКО на Алън (адаптирана от (IEEE Std. 952-1997, 1998))

Калибриране

Основен инструмент за проследяване на едно измерване е калибрирането на средство за измерване, измервателна система или сравнителен/референтен материал. Калибрирането определя характеристиките на средство за измерване, на система или сравнителния материал. Това обикновено се постига чрез пряко сравнение с еталони или със сертифицирани сравнителни материали (П. Хауърт, 2008).

По същество калибрирането е процес на последователно сравняване и коригиране (Фиг. 3.3). В този процес са необходими референтни или базови стойности като "материална мярка или физическо свойство, което определя или възпроизвежда единица за измерване, основана на количество или негова производна" (ISO/IEC, 2008).



Фиг. 3.3. Методи за самокалибриране за сензорни мрежи в неконтролирани среди (Barcelo-Ordinas, Doudou, Garcia-Vidal, & Badache, 2019)

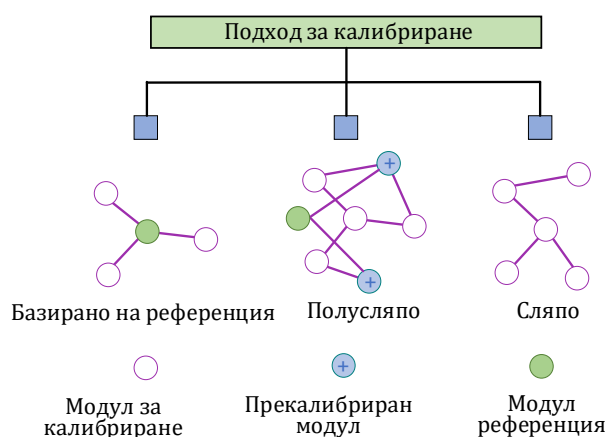
Особености на калибрирането при мрежови приложения

Успехът на процеса на калибриране зависи основно от: (i) разходи за калибриране; (ii) продължителност на калибрирането; (iii) продължителност на

прекъсване на нормалната работа на сензорите; (iv) лесен достъп до сензорите; (v) възможност за калибриране на място на голям брой сензори (Yu & Li, 2015).

Подходът "сляпо калибриране" позволява калибриране в сензорни мрежи, без да се използват референтни данни с висока точност (Balzano, L.; Nowak, R., 2007). Прилагат се алгоритми за обработка на сигнали и/или физически модели и ограничения за измерваната величина. Сензорите са разположени близо един до друг, което има своите предимства. Тези предимства, както и времевата и пространствената корелация на данните от групите сензори, се използват за определяне на функционалните зависимости за калибриране.

При подхода "полусляпо калибриране" сензорите се нуждаят от частични референтни данни, получени от един или повече предварително калибрирани модули, което е показано на Фиг. 3.4 (Tan, Xing, Yuan, Liu, & Yao, 2013).



Фиг. 3.4. Базирано на референция, „полусляпо“ и „сляпо“ калибриране (адаптирано от (Barcelo-Ordinas, Doudou, Garcia-Vidal, & Badache, 2019))

Линеаризация и апроксимация на сензорни предавателни функции

Някои видове сензори винаги показват типична нелинейна предавателна функция. Формата на нелинейността е възпроизводима и може да се проследи в модела на сензора. Такава систематична грешка е за предпочитане да се коригира чрез систематична линеаризация, а не чрез интерполация на множество измервания за калибриране. Обект на разглеждане са подходи за линеаризация на сензорни предавателни характеристики, които са особено подходящи за реализиране в устройства с ограничени изчислителни ресурси и по-конкретно изследвания и разработени подходи за подобряване на качеството и ефективността на линеаризация на конкавни (вдлъбнати) и конвексни (изпъкнали) сензорни предавателни функции, и на сензорни предавателни функции с инфлексна точка.

Въз основа на тези изследвания е представено обобщение на тези подходи с т.нар. полилинеаризация с минимизиране на отстояния между линейни сегменти и предавателна функция, и на площи между линейни сегменти и предавателна функция (Marinov, M.B.; Dimitrov, S., 2024)

Сливане на сензорни данни

Сливането на сензорни данни е процес, който включва интегриране и комбиниране на данни, получени от множество сензори или други източници, с цел подобряване на тяхната точност и надеждност. Той обхваща алгоритмични техники за обединяване на данните, събрани от различни сензори, използване

на техните допълващи се характеристики и създаване на единно, съгласувано и подобро представяне на наблюдаваните явления или системи.

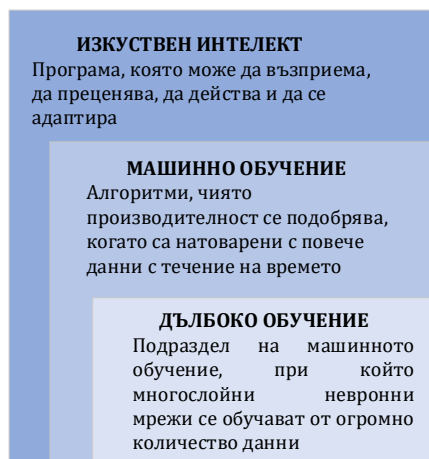
Сливането на сензорни данни обхваща различни подобласти, включително интегриране на множество сензори в мултисензорни системи, асоцииране на данни, сливане на информация, избор и управление на сензори, сливане на решения и други. Тези подобласти допринасят за разработването на усъвършенствани алгоритми за сливане, включително методи на Бейс, филтриране по Калман, филтри на частици, невронни мрежи и техники за оптимизация, които позволяват ефективно сливане на сензорни данни.

Машинно обучение и изкуствен интелект

Концепцията на Дълбокото обучение (ДО), като подобласт на Машинното обучение (МО), както е показано на Фиг. 3.9, се базира на моделите за информационна обработка в човешкия мозък.

В противоположност на конвенционалните методи за МО, които изискват създаване на правила от човека, подходът ДО се основава на големи обеми данни, използвани за съпоставяне на подадените входни данни със съответни образци. ДО се осъществява чрез множество слоеве от изкуствени невронни мрежи (ИНН), като всеки слой осигурява уникална интерпретация на предоставените данни (LeCun, Bengio, & Hinton, 2015; Zhang, Cui, & Zhu, 2020).

Реализирането на задачи за класификация с използването на конвенционални методи за МО изисква последователен набор от стъпки, включително предварителна обработка, извличане на характеристики на данните, селекция на подходящи характеристики, обучение и накрая - класификация. Изборът на характеристиките оказва силно влияние върху ефективността на методите за МО, а неправилният им избор може да доведе до неточности при разделянето на класовете.



Фиг. 3.9. Дълбоко, машинно обучение и изкуствен интелект (Alzubaidi, L.; Zhang, J.; Humaidi, A.J. et al., 2021)

Машинното обучение е в тройката на водещите технологии в областта на мониторинга на околната среда. В системата на изкуствения интелект (ИИ) машинното обучение дава възможност за отчитане на опита и предприемането на действия, които не са явно програмирани за конкретни ситуации. Машинното обучение е набор от алгоритми, който създава собствени алгоритми, позволяващи ефективната цифровизация при мониторинга на околната среда.

Мониторингът на околната среда се реализира в съвременните условия все по-ефективно с помощта на ИИ. Машинното обучение е технологията, която позволява най-пълно и точно да се прогнозира състоянието на околната среда в

условията на широкообхватния мониторинг (Alzubaidi, L.; Zhang, J.; Humaidi, A.J. et al., 2021).

3.2 Реализации на интелигентни сензорни системи и алгоритми

В този раздел са представени разработки на методи и алгоритми за повишаване точността на сензорни данни и реализации на интелигентни сензорни системи.

Точка 3.2.2 е посветена на калибрирането при модули за измерване на ФПЧ в мрежови приложения и при калибриране на камери.

В т. 3.2.3 са разгледани различни подходи за линеаризиране и апроксимация в сензорните приложения.

В т. 3.2.4 са представени разработки от областта на сливането на сензорни данни и по-специално с използването на филтрирането по Калман.

В т. 3.2.5 са представени разработки на сензорни системи, използващи дълбоко обучение и елементи на изкуствен интелект.

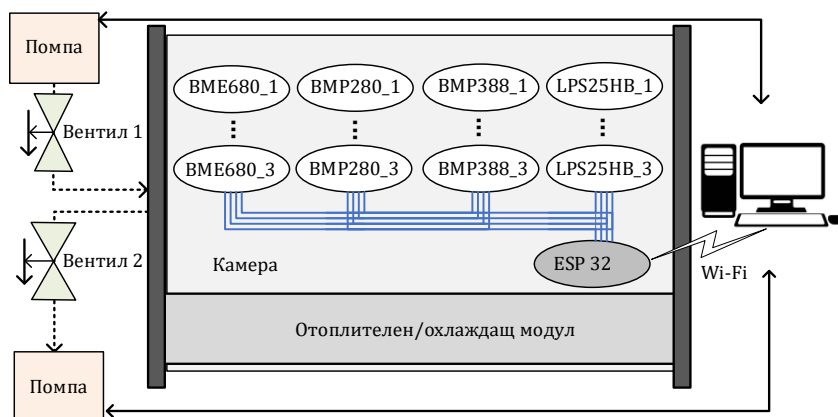
3.2.1 Използване на стохастични методи за оценка и подобряване на точността на сензори

Приложение на СКО на Алън за оценка на грешки на сензори за атмосферно налягане

Изследвани са четири различни типа образци, като някои от тях заедно с налягането измерват и допълнителни параметри, като температура, относителна влажност и качество на въздуха.

Материали и методи

Изследването на MEMS сензорите за налягане се извършва с помощта на експериментален стенд, конфигурацията на който е показана на Фиг. 3.11.



Фиг. 3.11.
Експериментална
постановка

В него се използва микроконтролер ESP32. Измервателните процедури и управлението на експериментите се извършват в графичната програмна среда LabVIEW. Комуникацията между сензорите и компютъра се реализира безжично посредством Wi-Fi комуникационен интерфейс (Ganev, B.; Nikolov, D.; Marinov, M. B., 2020). Сензорите са поставени в камера с управляван климат. В камерата се реализират комбинации от различни температури, влажност и концентрации на газове, при които се извършват измерванията на налягането.

Сензори

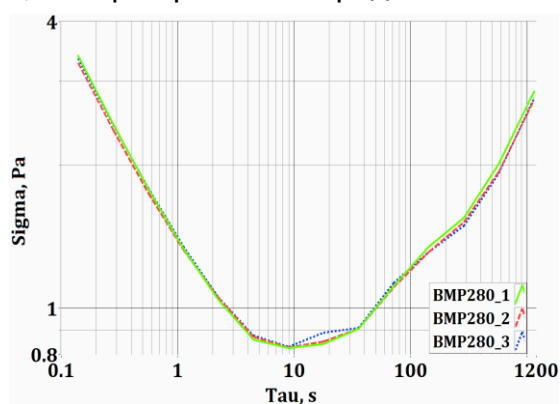
За изследването са избрани четири съвременни MEMS барометри въз основа на тяхната наличност, ниска цена и възможност за ефективно събиране на данни (вградени интерфейси): BMP280 (Bosch Sensortec, 2018), BMP388 (Bosch Sensortec, 2018a), LPS25HB (STMicroelectronics, 2016), BME680 (Bosch Sensortec, 2017). От тях BME680 генерира данни не само за налягането, но и за температурата, влажността и качеството на въздуха. Използват се по три устройства от всеки модел сензор.

СКО на Алан

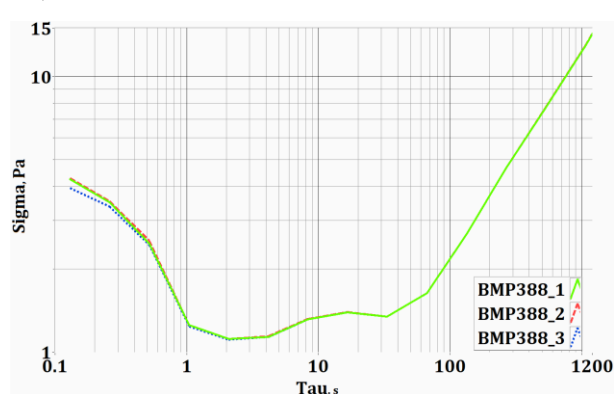
За разлика от инерциалните сензори и осцилаторите, при които анализът предоставя информация за вътрешните случайни шумови процеси, доминиращите източници на грешки, при базираната на барометричното налягане алтиметрия, са външни и варират значително при дълги времеви периоди. Поради това анализът и моделирането на шум от сензорите за барометрично налягане се ограничава до шумовите процеси, които са обичайни в основните приложения - случайни шумови процеси, предимно краткосрочни.

Някои от видовете шум са наречени както източниците на шум, наблюдавани в инерционните сензори. Въпреки тези наименования, ударението е върху основните видове шум, които са широко представителни за различни видове сензори (Jerath, Brennan, & Lagoa, February 2018). От графиките на Фиг. 3.11 могат да се определят два основни вида случайни процеси: (i) Бял Гаусов шум (БГШ) и (ii) цветен шум със Спектрална плътност на мощността (СПМ) $1/f^\alpha$, където $\alpha \geq 1$. Началните точки на графиката от Фиг. 3.11 може да се използват за оценка на стандартното отклонение на шум при еднократно измерване. Условието за това е белият шум да е доминиращ за по-малко време на осредняване и нестабилността на нулевото отклонение да не е по-голяма от нивото на белия шум.

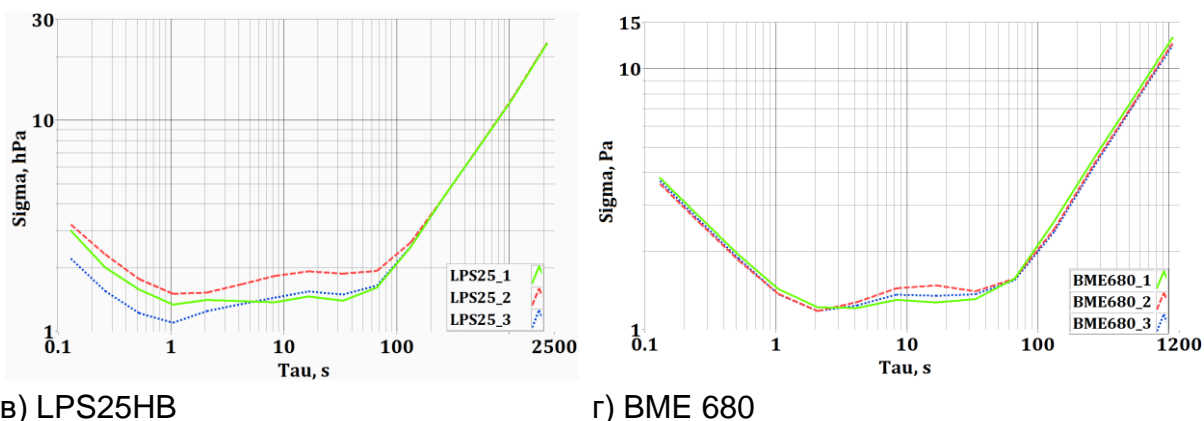
Процесът БГШ (наклон $-0,5$) е доминиращ за кратките времена на клъстерите $< T_{WGN}$, където T_{WGN} е времето на клъстера, за което T_{WGN} е преобладаващ. Както може да се види от графиките, T_{WGN} варира от 1 s до 4 s за тестваните сензори. На Фиг. 3.11 (г) се вижда, че при еднократни измервания всеки от сензорите BME680 ще има ниво на шума около $3,7 - 3,8\text{ Pa}$ с вероятност $68,3\%$ при време на осредняване около $0,12\text{ s}$.



а) BMP 280



б) BMP 388



Фиг. 3.11. Графики на SKO на Алън на четирите изследвани сензора

Минимални нива на грешката на сензора в най-добрия случай се достигат при време за осредняване между 1 и 10 s за всички 4 типа сензори. Очевидно е, че при време за осредняване, по-голямо от 2 s за сензорите BMP 388, LPS25HB и BME 680, и по-голямо от 10 s за BMP 280, няма да се постигне подобряване на нивата на шума.

Мултипликативната грешка е доминираща при време за осредняване по-дълго от 70 s (40 s за сензорите BMP 280) и се увеличава (с наклон +1) с увеличаване на времето за осредняване. Тя се проявява като дрейф с много ниска честота в шума на сензора. Тази част от кривата на SKO на Алън е обща за всички сензори. Тя може да се дължи на външни източници на грешка, като например промени в атмосферното налягане.

Таблица 3.5. Нестабилност на нулевото отклонение на четирите изследвани сензора за налягане, σ_A , Pa

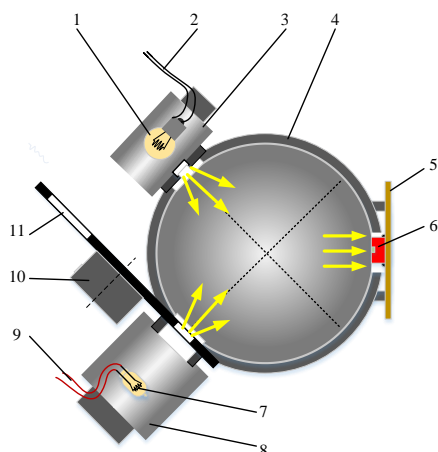
Сензор	BMP 280	BMP 388	LPS25HB	BME 680
1	1,23	1,65	2,26	1,88
2	1,24	1,65	2,03	1,81
3	1,26	1,65	1,66	1,73
Средна стойност	1,24	1,65	1,98	1,81

Анализът на характеристиките на сензорите за барометрично налягане може да бъде полезен за инженерите-конструктори при избора на подходящи сензори, в съответствие с конструктивните ограничения на конкретни приложения.

Оценка на грешките на оптични сензори чрез SKO на Алън

SKO на Алън е ефективен метод за анализ на шума от сензорите. Статистическият метод за анализ на шума, основан на него, има няколко съществени предимства пред други конвенционални статистически методи: той е сходящ за много видове шум и не се изискват допълнителни трансформации. Анализът на шума може да се използва ефективно за характеризиране на нестационарните грешки и за избор на подходящ тип сензор за съответните приложения. Приложимостта на подхода е изследвана за интегрални оптични сензори в дисертационния труд (Ganev, Djamiykov, Marinov, & Asparuhova, 2021). Експерименталната постановка, показана на Фиг. 3.13, е разработена за изследване на интегрални оптични сензори. Микроконтролерът ESP32 се

използва за събиране на данни и за комуникация с LabVIEW базирано приложение (Espressif Systems, 2021).



Фиг. 3.13 Експериментална постановка за изследване на оптични сензори

В стенда са поставени два източника на оптичен поток. Референтният източник тип "А" (1) е 30 W предварително калибрирана лампа. Вторият източник (7) е халогенна лампа с мощност 100 W, разположена зад диафрагмата (11). Осветеността върху сензора (6) може да се променя чрез дискретни изменения на диаметъра с помощта на задвижващия механизъм (10).

Сензори

Избрани са три съвременни интегрални сензора за цвят по критерий за ефективно събиране на данни и наличност.

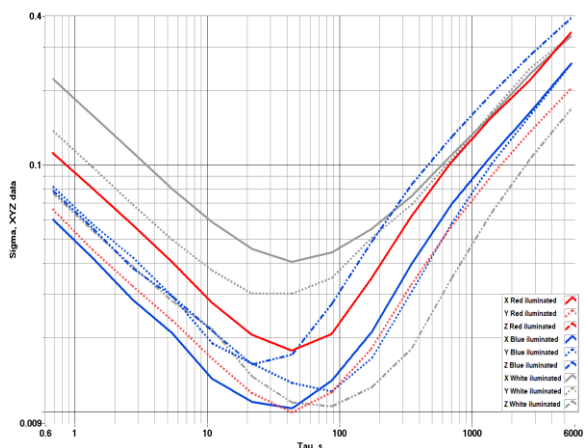
Използва се шестканален сензор на цвят, състоящ се от канали X, Y, Z, NIR, CL и D (AS7261 (AMS AG, 2016)), четириканален цветен сензор с канали R, G, B и IR (BH1749 (ROHM Semiconductor, 2017)) и сензор за околна светлина (OPT3001 (Texas Instruments, 2017)).

Тези сензори обикновено се използват за автоматична настройка на яркостта на монитори, но през последните години намират приложение и в много други области (Valkovski T, Dimitrov K., 2020). Поради това е особено важно да се изследва стабилността на характеристиките на сензорите при различни условия на функциониране. Резултатите от такова изследване дават възможност за използване на компенсирани алгоритми и повишаване точността на измерванията за постигане на желани нива на осветеност и цветови характеристики.

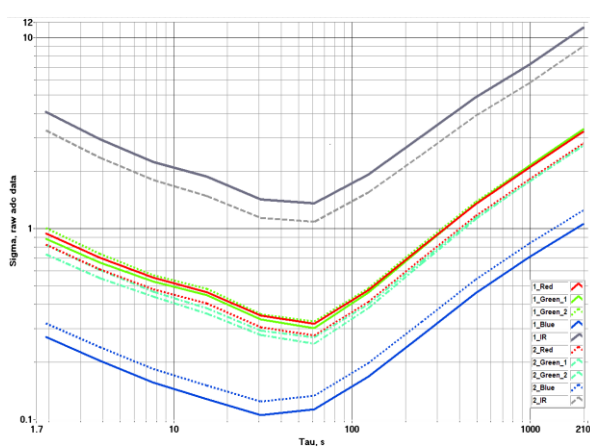
Сравнение на СКО на Алън на оптични сензори

От Фиг. 3.14 (а), (б) и (в) могат да се определят два различни типа случайни процеси: 1) бял Гаусов шум (БГШ), проявяващ се като наклон от $-1/2$ на графиката ADEV, и 2) цветен шум със спектрална плътност на мощността $1/f^\alpha$, с две подобласти: (i) почти постоянна плоска част на кривата ADEV с експонента $\alpha = 1$ и (ii) нарастваща част с експонента $\alpha > 1$.

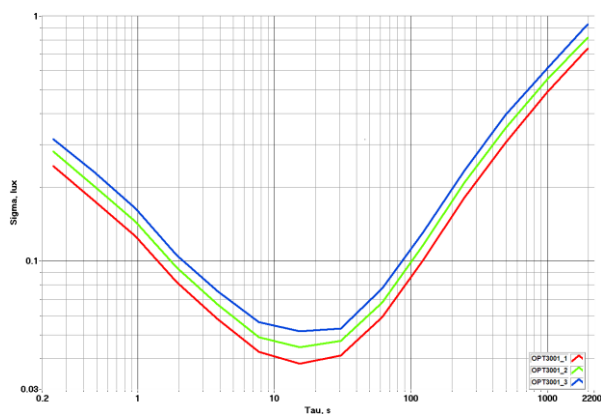
Стандартното отклонение на еднократно измерване със сензорите BH1749 (Фиг. 3.14 (б)) при честота на дискретизация 1,92 s (необработени АЦП данни), варира от (б)) при честота на дискретизация 1,92 s (необработени АЦП данни) варира от 0,3 до 1 за стойностите R, G, B, и до около 4 за стойностите на IR.



(а) AS7261 XYZ изходи, графики на СКО на Алън



(б) BH1749 червено, зелено, синьо, инфрачервено и зелено (2-ри изход), графики на СКО на Алън



(в) OPT3001 графики на СКО на Алън

Фиг. 3.14. Графики на Дисперсия на Алън на три изследвани оптични сензора

Както се вижда от Фиг. 3.14 (а), (б) и (в), процесът БГШ е доминиращият шумов процес за кратки периоди на наблюдение, (време на клъстера $\tau_c < T_{WGN}$). Тук с T_{WGN} се обозначава интервалът от време, през който БГШ е доминиращият шумов процес. От същата фигура (а), (б) и (в) се вижда, че T_{WGN} варира от 20 до 90 s за тестваните сензори AS7261, 30–60 s за сензорите BH1794 и до около 15–30 s за сензорите OPT3001.

Събирането на по-големи обеми данни и тяхното осредняване позволява намаляване нивата на шума. Изследването на минималните стойности за обемите данни, при които се достига достатъчно намаляване на шума, е важно за оптимизиране на измервателни приложения.

Изследването на хоризонталните части на графиките на СКО на Алън на Фиг. 3.14 разкрива, че нестабилността на отместването на нулата е доминиращият шумов процес, когато $\tau_c \approx T_{WGN}$. Теоретично това е минималната стойност за грешката на сензора и като такава е най-често използваната област от графиката на СКО на Алън при сравняване на сензори (Allan Deviation Primer, 2021). Частите на СКО на Алън с положителни наклони обикновено са свързани с цветни шумови процеси със СПМ от $1/f^\alpha$, (за $\alpha > 1$) и са доминиращи за периоди от $\tau_c \gg T_{WGN}$. Обикновено те са свързани с нисочестотен шумов процес, като например шум от случаен дрейф. Тази част от сигма-тау диаграмата на СКО на Алън е обща за всички тествани сензори, както може да се види от Фиг. 3.14. Тя може да се дължи на външни източници на грешка, например

промени в условията на осветеност и температура. Както е показано на Фиг. 3.14 (а), големината на α (видима чрез различни наклони) варира в зависимост от конкретния случай. Тази част от графиката на ADEV също е особено важна за сравненията на сензорите. Изборът на сензор с „ниско“ разположена графика за нискочестотния шум ще бъде от значение, ако възможностите за филтриране на нискочестотния шум са ограничени (El-Sheimy, Nou, & X. Niu, 2008).

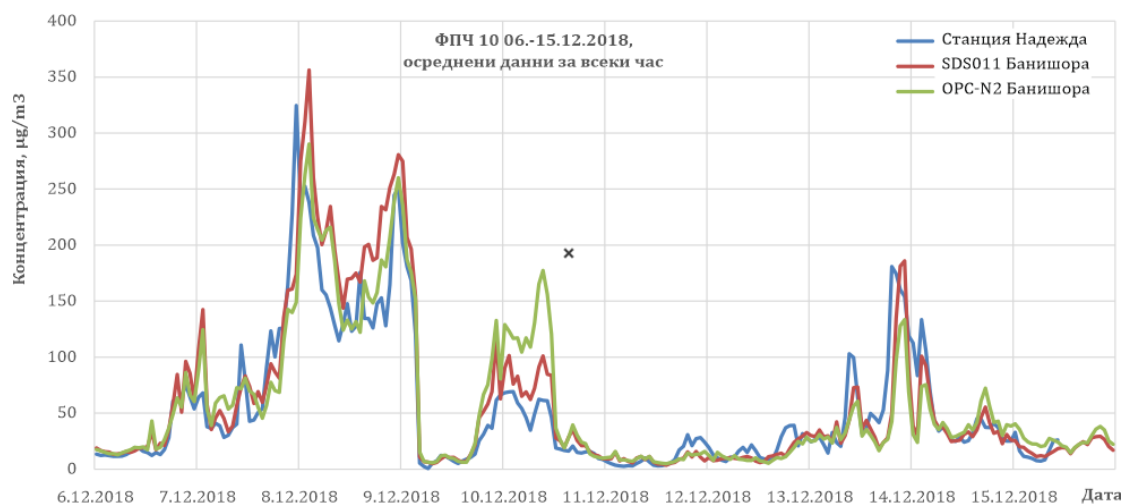
3.2.2 Калибриране

Калибриране на модули за измерване на ФПЧ в мрежови приложения

Оценка при полеви условия

OPC-N2 и SDS011 10-дневна оценка

За да се извърши полева оценка, първо мрежовите сензорни единици, които трябва да се калибрират отново (на базата на сензор OPC-N2, SDS011), се поставят до стационарната станция за мониторинг на качеството на въздуха "София-Надежда". Концентрацията на ФПЧ 10, измерена от сензорните модули и стационарната станция за период от 10 дни, е показана на Фиг. 3.19.



Фиг. 3.19. Резултатите от измерването на концентрацията на ФПЧ10 за периода от 5.12.2018 г. до 15.12.2018 г.

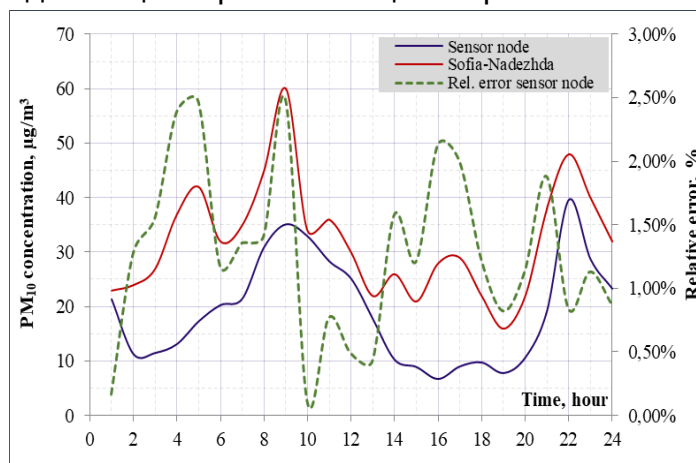
Само въз основа на фабричното калибриране на сензорите, дългосрочните измервания силно корелират със стойностите, измерени от стационарната станция. За 24-часовите интервали корелационните коефициенти (по Пиърсън) се колебаят в диапазона 0,64 – 0,76.

След калибрирането, въз основа на линейния модел, коефициентите на корелация се увеличават и са в диапазона 0,72 – 0,81.

SDS011 24-часова оценка

При 24-часовите полеви тестове на сензора SDS011 измерванията са сравнени с данните от стационарната станция за мониторинг на качеството на въздуха "София-Надежда". Концентрацията на ФПЧ 10, измерена със сензорната система и стационарната станция за период от 24 часа, е показана на Фиг. 3.20. Ясно се вижда, че мобилната сензорна система е отчела и двете значителни увеличения на нивата на ФПЧ около 9 и 22 часа. На същата фигура е показана и относителната грешка в % на сензорния модул, свързана с крайната стойност на сензорния обхват, която е $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Нивата на тази грешка не

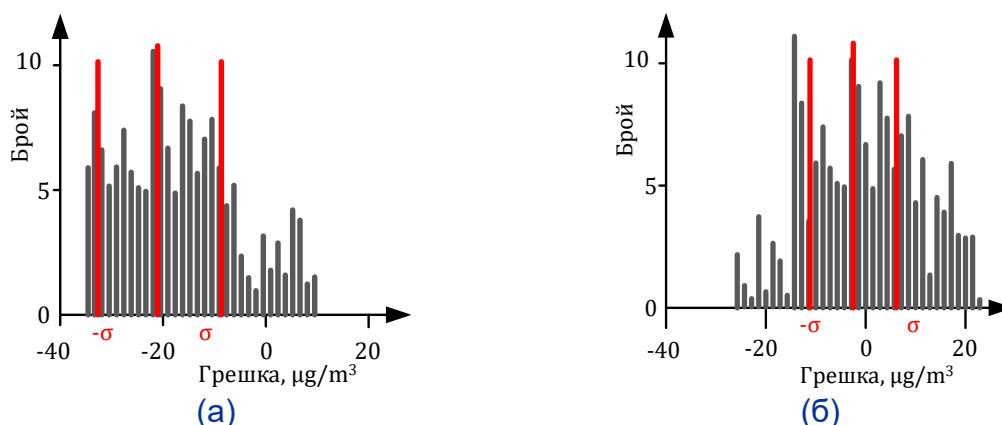
надвишават 2,5 %. След калибрирането на устройството коефициентът на корелация между данните от сензорните възли и тези от еталонния измервателен уред в стационарната станция е сравнително висок: 0,743.



Фиг. 3.20. Относителна грешка (спрямо пълния обхват на сензора SDS011 от 1000 mg/m^3)

При изчисленията се използват осреднени стойности за 5-минутни интервали. Средната стойност (права линия) и стандартното отклонение σ (прекъсната линия) на грешките при измерване след сравнение с измерванията от еталонната станция са показани на Фиг. 3.21.

Преди калибрирането е имало систематична грешка от 22 mg/m^3 (червена плътна линия). С използвания подход за калибриране точността на измерване на сензорния модул SDS011 може да се увеличи значително, както е показано на Фиг. 3.21. Отклонението е почти елиминирано, а стандартното отклонение σ е намалено от $\pm 14,7$ на $\pm 8,9 \text{ mg/m}^3$ (границите са означени с червени прекъснати линии). Резултатите показват, че е налице подобряване на точността с повече от 10 %. Но има и сензорни възли, при които подобряването е незначително и е необходимо усложняване на модела на грешките и търсене на по-ефикасни подходи.



Фиг. 3.21. Редуциране на грешките, нива на грешките (а) преди калибриране, (б) след калибриране

Калибриране на камери

Определяне на фокусното разстояние на видеокамера чрез еталон за калибриране

В изследването се предлага метод за определяне на фокусното разстояние на обектив на видеокамера с помощта на модел за калибриране във формата на шахматна дъска.

Основен оптичен параметър на видеокамерата е фокусното разстояние на нейния обектив. Често то е неизвестно или е зададено с определен процент неточност, което води впоследствие до големи грешки при измерването с оптоелектронни системи. В този случай е необходимо да се измери с голяма точност или провери стойността на фокусното разстояние на обектива на видеокамерата (Chen, Zhu, & Little).

Принцип на метода

Принципът на предложения метод се състои в промяна на размера на образа на обекта в различни позиции на еталонния обект за калибриране. На Фиг. 3.22 е показана принципната схема на измервателната постановка.

Когато еталонният обект се премества по оптичната ос на обектива на камерата, размерът на неговия образ се променя. Тогава фокусното разстояние f' на обектива може да се определи по формулата:

$$f' = \frac{\Delta z \cdot l_1 \cdot l_0}{(L + l_0) \cdot (l_1 - l_0)} \quad (3.6)$$

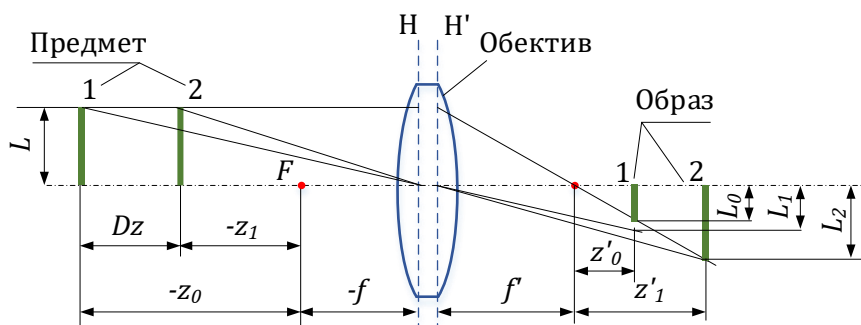
където: Δz е стойността на преместването на шаблона за калибриране по оптичната ос, L е размерът на еталонния обект за калибриране, l_0 е размерът на образа на еталонния обект в начална позиция, l_1 - размерът на образа на еталонния обект след преместване му.

Шахматната дъска се използва в качеството на еталонен обект за калибриране, тъй като квадратите на шахматната дъска са лесно различими в изображението и са лесни за откриване.

Размерите на изображението l_0 и l_1 могат да се изчислят чрез зависимостта:

$$l = \sqrt{p_x^2 \cdot (x_1 - x_2)^2 + p_y^2 \cdot (y_1 - y_2)^2}, \quad (3.7)$$

където p_x и p_y са размерите на пикселите съответно по редове и колони, (x_1, y_1) и (x_2, y_2) са координатите на ъглите на шахматното поле в изображението.



Фиг. 3.22. Схема на измервателната постановка

Оценка на грешките

Комбинираната неопределеност (грешката) при измерване на фокусното разстояние се изчислява на два етапа, като се прилагат методиката на GUM и формула (3.6). На първия етап се прилага моделът на действителния процес на измерване и се идентифицират *измерваните величини* в математическия модел. На следващия етап се изчисляват стандартните неопределености на всяка съставка на комбинираната неопределеност на измерването.

Всяка съставна част на неопределеността на измерване се изразява посредством *стандартната си неопределеност*.

За комбинираната неопределеност $\sigma_{f'}$, въз основа на у-ние (3.6) се получава зависимостта

$$\sigma_{f'} = \sqrt{\left(\frac{\partial f'}{\partial(\Delta z)} \sigma_{\Delta z}\right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial l_1} \sigma_{l_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial l_0} \sigma_{l_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial f'}{\partial L} \sigma_L\right)^2}, \quad (3.8)$$

където $\sigma_{\Delta z}, \sigma_{l_1}, \sigma_{l_0}, \sigma_L$ са *стандартните неопределености съответно за величините $\Delta z, l_1, l_0$ и L* .

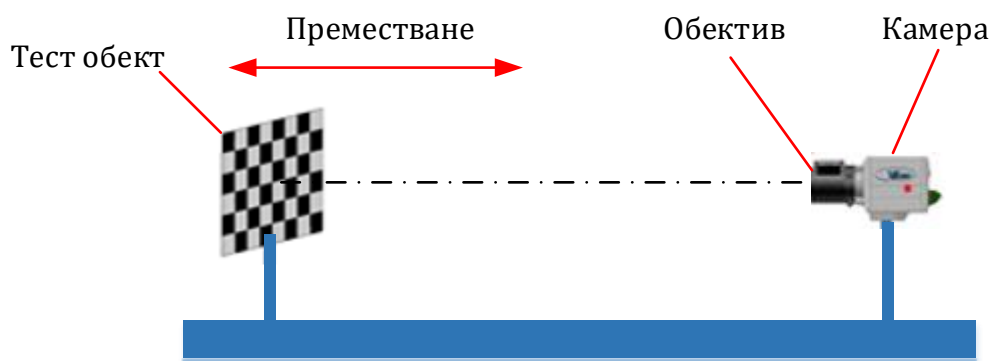
За стандартните неопределености се използват следните оценки: $\sigma_{\Delta z} = 1 \text{ mm}$, $\sigma_{l_0} = \sigma_{l_1} = 0,5 \text{ pixels} = 2,6 \text{ }\mu\text{m}$, $\sigma_L = 0,5 \text{ mm}$.

Експериментална постановка

На Фиг. 3.23 е показана експериментална постановка за определяне на фокусното разстояние на обектив на видеокамера.

Основните стъпки при измерването на фокусното разстояние са:

- Проверка дали еталонен обект за калибриране е поставен перпендикулярно на оптичната ос на обектива на камерата.
- Запазване образ на еталонния обект в начална позиция.
- Преместване на използвания еталонен обект на следваща позиция по оптичната ос.
- Запазване образ на еталонния обект в следващата позиция.
- Обработка на двата запазени образа и определяне на координатите (x_1, y_1) и (x_2, y_2) .
- Изчисляване на фокусното разстояние по формулата (3.6)).
- Изчисляване на комбинираната неопределеност по формулата (3.8).



Фиг. 3.23. Експериментална постановка

За да се определи размера на образа на еталонния \ddagger обект за калибриране, е необходимо да се знаят координатите на ъглите на шахматното поле, като се използва вграденият алгоритъм за откриване на ъглите в пакета Matlab. Размерът на образа на еталона може да се изчисли по формулата (3.7).

Чрез измерване на преместването между две позиции на еталонния обект за калибриране посредством размера на самия еталонен обект за калибриране и неговия образ е възможно да се определи фокусното разстояние на обектива на камерата, като се използва формулата (3.6). Грешката на измерването се оценява по формулата (3.8).

При експериментите се използва видеокамера с матрица OV9121 (размер на елемента $5,2 \times 5,2 \mu m$), калибриращ шаблон под формата на шахматна дъска 6×8 (размер на полето $33,75 \times 33,75 mm$) и обективи с фокусни разстояния 8, 12, 20 и 25 mm.

Експериментални резултати

При експериментите фокусното разстояние на обектива на видеокамерата се измерва на 20 различни отстояния от шаблона до камерата.

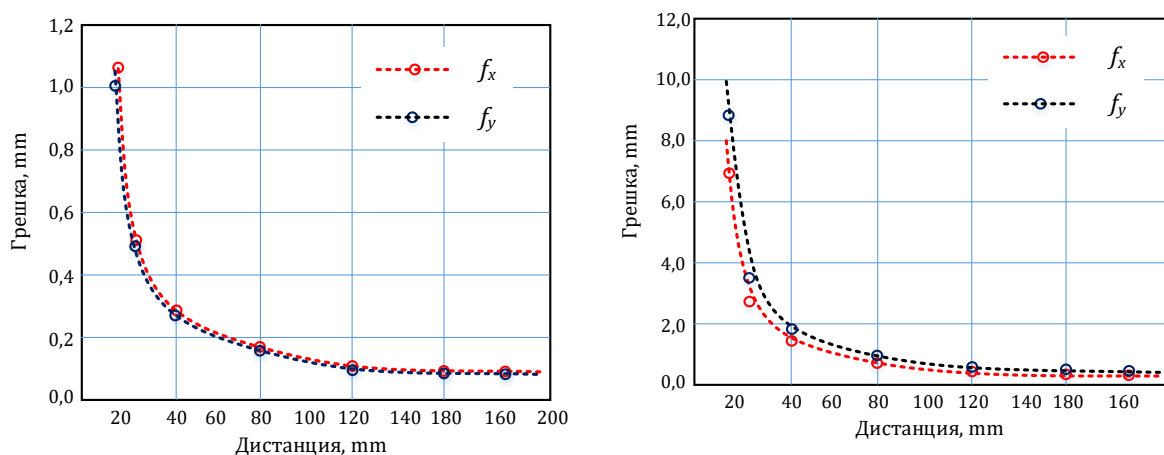
Таблица 3.7 показва, че изчислените стойности на фокусното разстояние, получени чрез предложения метод, са близки до стойността на фокусното разстояние на обектива на камерата.

Таблица 3.7. Резултати от измерването на фокусното разстояние на различни обективи

Обектив	f'_x, mm	$\Delta f'_x, mm$	f'_y, mm	$\Delta f'_y, mm$
8 mm	8,07	0,09	8,16	0,10
12 mm	11,98	0,14	12,10	0,15
20 mm	20,04	0,93	20,31	0,88
25 mm	25,24	0,77	25,40	0,75

На Фиг. 3.24 са показани графики на измерените стойности на фокусното разстояние на обективите за различни разстояния на еталонния обект.

От графиките на грешките се вижда, че грешката при измерване е по-голяма при малко преместване на шаблона за калибриране и намалява, когато стойността на преместването се увеличи (Δz).



(а)

(б)

Фиг. 3.24. Грешки при измерването на фокусни разстояния на обективи: (а) 8 mm и (б) 25 mm обектив

В сравнение с класическите методи за измерване на фокусното разстояние, предложеният метод има следните предимства: не е необходимо да се използват допълнителни оптични системи или устройства; процедурата на

измерване е съвсем проста; резултатът е надежден. Недостатъкът му е сравнително голямата грешка при малки премествания на еталонен обект за калибриране.

Алгоритъм за прецизно калибриране на широкоъгълни камери

В области, където големият ъгъл на наблюдение е от решаващо значение, се използват камери с широкоъгълни обективи (широкоъгълни камери). За съжаление при тях има голямо изкривяване на образа, което прави проблемно използването им при измерване и наблюдение в телевизионните системи (Yarishhev, Konyahin, & Timofeev, 2009; Konyahin, Timofeev, & Yarishhev, 2010; Korotaev, Konyahin, Timofeev, & Yarishhev, 2010).

Основните области на приложение на системите за широкоъгълно зрение са в сферата на навигацията на мобилни роботи и системите за видеонаблюдение.

През последното десетилетие използването на мобилни роботи в нашето общество значително нарасна. Роботите се нуждаят от сензорни системи за извличане на информация от околната среда, за да решават проблеми с картографирането и локализирането. Камерите се превърнаха в един от най-разпространените компоненти в мобилната роботика поради голямото количество информация, която те предоставят на робота. За решаването на сложната задача за едновременно локализиране и картографиране (т.нар. SLAM) тези системи все по-често се използват самостоятелно или в конфигурация с други сензорни системи (Berenguer, Payá, Valiente, Peidró, & Reinoso, 2019). Целта на това изследване е разработване на математически обоснован модел и ефективен практически подход за калибриране и коригиране на изкривяването на изображението при широкоъгълните камерите тип "рибешко око".

Методология

Обект на изследване са техническите параметри (данни) на модела на перспективната геометрия и използваните методи за калибриране и определяне на областите на приложение на предлагания подход.

Калибрирането на широкоъгълни оптични системи е изградено върху обединяващата теория на Гейер и Данилидис (C. Geyer, K. Daniilidis, 2000) за централни панорамни системи, според която всяка перспективна и катадиоптрична проекция може да бъде центрирана чрез изобразяване на триизмерна сфера в ефективните пиксели. Ying и Hu (Ying & Hu, 2004) разширяват тази теория за обективи тип "рибешко око" с ъгъл на наблюдение по-малък от 180°.

Унифицираният модел на образа на обекта - осигурява подходяща рамка за разглеждане на различни типове камери: стандартна, катадиоптрична перспектива и разнообразни типове обективи тип "рибешко око".

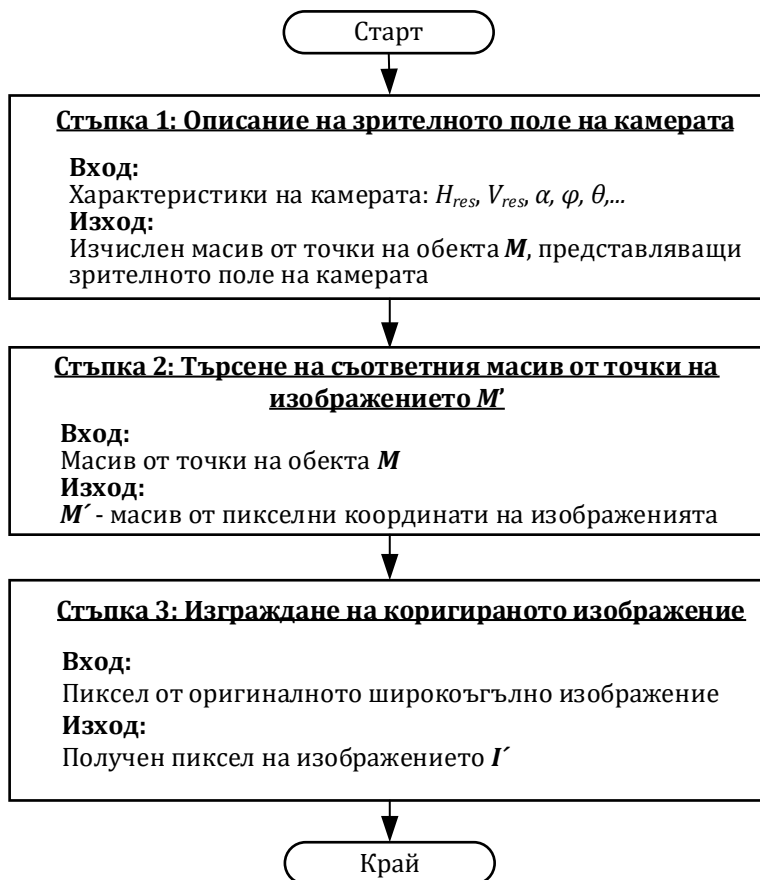
Калибрирането протича в три фази.

Първата фаза е формирането на облак от триизмерни точки в пространството на обекта, съответстващи на зрителното поле на един вид виртуална перспективна камера.

Във *втората* фаза се определят координатите на образите на тези точки в равнината на сензора. За целта се използва предавателната функция на оптоелектронното устройство, съставена с помощта на процедурата за калибриране на широкоъгълна камера.

Третата фаза е поелементното (пикселно) формиране на изходния образ от оригиналното широкоъгълно изображение, като се използват координатите, намерени във втората част.

Алгоритъмът се състои от три основни стъпки (Фиг. 3.25).



Фиг. 3.25. Трите основни стъпки на алгоритъма за калибриране на широкоъгълна камера

Експериментални резултати

Широкоъгълната камера е калибрирана с помощта на инструментариума OCamCalib. За тази цел са направени девет изображения на тестов еталонен обект във формата на шахматна дъска с калибрираната камера. При експериментите за калибриране се установи, че обикновено девет изображения са достатъчни за намиране на определените коефициенти. Използва се двумегапикселова IP камера с монтиран на нея супер широкоъгълен обектив тип "рибешко око" (Fujinon FE185CO46HA-1: фокусно разстояние 1,4 mm, диапазон на диафрагмата F1,4-F16, ъгъл на видимост 1/2").

След калибриране и задаване на входните параметри за камерата (Фиг. 3.26) се получават координатите, които се използват за изчисляване на средната квадратична грешка на повторното проектиране.

Средната квадратична грешка на репроектирането (с други думи грешката на функцията на пряката връзка на координатите на world2cam) е по-малка от размера на един пиксел; това е показано на Фиг. 3.26 (б). Такава точност е достатъчна както за задачите за наблюдение, така и за повечето изчислителни задачи. На Фиг. 3.26 (б) резултатът от експерименталното калибриране е позицията, в която точките на калибриране и репроектираните точки съвпадат, което потвърждава правилното определяне на параметрите на калибриране.



Фиг. 3.26. Резултати от калибрирането с помощта на софтуера OCamCalib. (а) Пример за неправилно определяне на параметрите на калибриране (Scaramuzza, Martinelli, & Siegwart, 2006); (б) Пример за правилно определяне на параметрите на калибриране

Кръстчетата обозначават определените точки на калибриране на изпитвания обект, а кръгчетата - резултата от проектирането на точките на калибриране с триизмерни координати, изчислени по време на процеса на калибриране, обратно върху изображението. Размерът на всяко квадратче от тестовия обект е 20 mm.

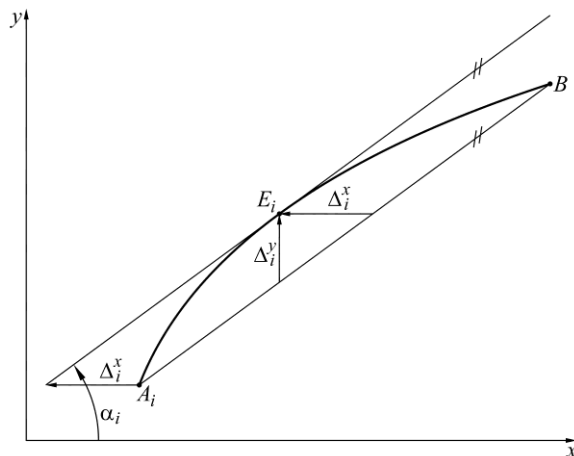
3.2.3 Линеаризиране и апроксимация

Адаптивен алгоритъм за линейна интервална апроксимация

Цел на изследването е да се разработи нов подход за решаване на задачата за линеаризация на сензорни характеристики, представляващи диференцируеми функции с променлив знак на кривина. При този подход *едновременно* се решават задачите за намиране на обратната сензорна характеристика и нейната линеаризация (Marinov M. , et al., 2022).

Подход

Подходът се реализира по следния начин. Определя се екстремалната стойност на Δ_1^x в интервала $x \in [x_{A_1}, x_B]$. Ако $|\Delta_1^x| < |\Delta^x|$, то функцията се апроксимира в целия интервал с отсечката A_1B и процедурата приключва. В противен случай се определя подинтервалът $x \in [x_{A_1}, x_{A_2}]$, в който е изпълнено $\Delta_1^x = \Delta^x$ (Фиг. 3.34).



Фиг. 3.34. Графично представяне на предложения подход за линеаризация

След това се определя екстремалната стойност на Δ_2^x в интервала $x \in [x_{A_2}, x_B]$. Ако $|\Delta_2^x| < |\Delta^x|$, то функцията се апроксимира в целия интервал с отсечката A_2B и процедурата приключва; в противен случай се определя подинтервалът $x \in [x_{A_2}, x_{A_3}]$, в който е изпълнено $\Delta_2^x = \Delta^x$, и т.н.

В резултат на прилагане на подхода, сензорната характеристика $y(x)$ се апроксимира с начупената линия $A_1A_2A_3 \dots A_{n-1}B$, $B \equiv A_n$, $A_i(x_{A_i}, y_{A_i})$, $i = \overline{1, n-1}$, $A_n(x_B, y_B)$. Обратната сензорна характеристика $x(y)$ в координатната система Oyx се апроксимира с полигоналната линия $A_1A_2A_3 \dots A_{n-1}B$, $B \equiv A_n$, $A_i(y_{A_i}, x_{A_i})$, $i = \overline{1, n-1}$, $A_n(y_B, x_B)$, като

$$x(y) = x_{A_i} + (y - y_{A_i}) \frac{x_{A_{i+1}} - x_{A_i}}{y_{A_{i+1}} - y_{A_i}}, y \in [y_{A_i}, y_{A_{i+1}}], i = \overline{1, n-1}. \quad (3.41)$$

В общия случай, във всички интервали с изключение на последния, максималните грешки от апроксимацията са равни помежду си и са равни на зададената максимално допустима грешка Δ^x . Грешката $\Delta_i^x(x)$ във всеки от интервалите се определя по формулата

$$\Delta_i^x(x) = x - x_{A_i} - (y(x) - y_{A_i}) \frac{x_{A_{i+1}} - x_{A_i}}{y_{A_{i+1}} - y_{A_i}}, x \in [x_{A_i}, x_{A_{i+1}}], i = \overline{1, n-1}. \quad (3.42)$$

От уравнение (3.42) може да бъде определена и грешката $\Delta_i^x(y)$, с отчитане на

$$\Delta_i^x[y(x)] = \Delta_i^x(x), x \in [x_{A_i}, x_{A_{i+1}}], i = \overline{1, n-1}. \quad (3.43)$$

Линейна интервална апроксимация при съществуване на инфлексни точки на сензорните предавателни функции

В работата (Marinov, M.B.; Nikolov, N.; Dimitrov, S.; Todorov, T.; Stoyanova, Y.; Nikolov, G., 2022) е разработен нов метод за решаване на задачата за линеаризация на сензорни характеристики, представляващи диференцируеми функции с постоянен знак на кривината, при които *едновременно* се решават задачите за намиране на обратната сензорна характеристика и нейната линеаризация. Пример за такава сензорна характеристика е връзката между съпротивлението и температурата при платинените температурни сензори, зададена с уравнението на Callendar - van Dusen.

Подход

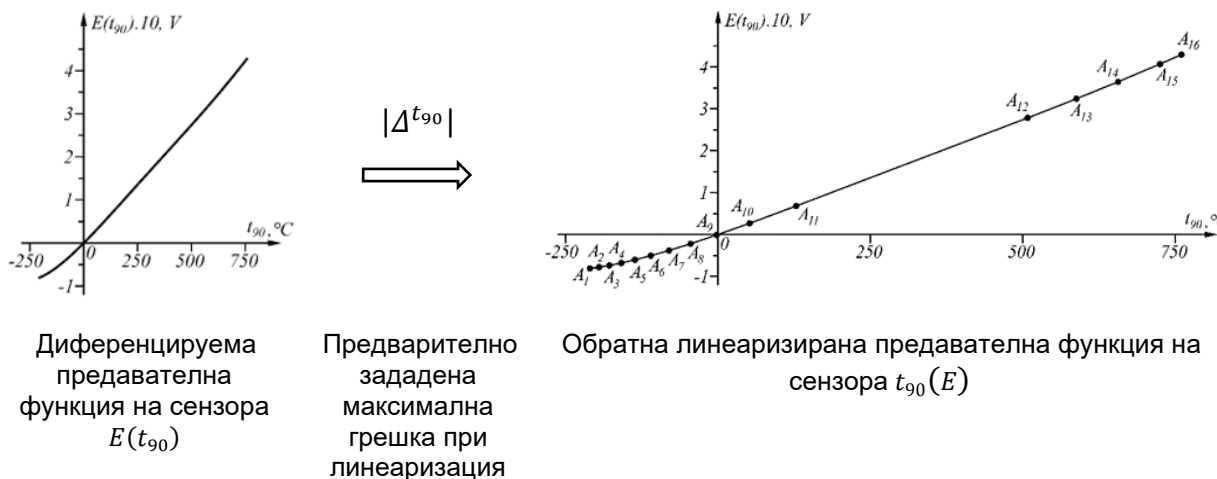
Характерно за подхода е, че при зададена максимално допустима грешка Δ^x при линеаризацията на обратната сензорна характеристика $x_i = x_i(y_i)$, $i = \overline{1, n}$ характеристиката се намира директно в линеаризиран вид.

Изследването цели изграждане на подход, при който във всеки отделен интервал се прави *линейна апроксимация* на сензорни характеристики, представляващи диференцируеми функции, при които знакът на кривината се променя, т.е. съществуват инфлексни точки. При това се запазват всички предимства на разработения подход в работата (Marinov, M.B.; Nikolov, N.; Dimitrov, S.; Todorov, T.; Stoyanova, Y.; Nikolov, G., 2022).

Предложеният *обобщен подход* за линейно апроксимиране на сензорни характеристики се прилага за всички сензорни характеристики, представляващи диференцируеми функции. Същността на подхода е илюстрирана на Фиг. 3.38.

Предварително зададената максимална грешка на линеаризация е единственият параметър в обобщения подход за линейно апроксимиране на

сензорни характеристики с точков интервал, от който зависи броят на сегментите на прекъснатата линия (обратна линеаризирана сензорна характеристика). По-малката стойност на параметъра (максималната грешка на линеаризация) води до повече сегменти. Конкретната стойност на този параметър се определя от приложението на сензора и поставеното изискване за точност.



Фиг. 3.38. Графично представяне на предложения подход за линеаризация

Метод за оптимална полилинеаризация

В това изследване е въведен иновативен числен метод за полигонална апроксимация (полилинеаризация) на несамопресичащи се сензорни характеристики (предавателни функции), зададени в точков или аналитичен вид. Целта на метода е оптимален избор на точките (върховете), заедно с техните позиции върху сензорните характеристики, така че максималното разстояние между апроксимиращия многоъгълник/полигон и характеристиката да е под определена допустима стойност, зададена от потребителя.

За да се илюстрира този метод се решават две алтернативни нелинейни оптимизационни задачи, чиято съществена разлика е в приетата количествена мярка за разделяне между предавателната функция и полигона.

В първия проблем, който се отнася до интегрируеми сензорни характеристики, полилинейната апроксимация се конструира чрез числено минимизиране на L1-нормата (мярка за разделяне, базирана на разстоянието), отнасяща се до първоначално неизвестен брой върхове на полигона и съответните им местоположения. Във втората задача, която обхваща квадратично интегрируемите характеристики на сензорите (т.е. тези, чиято енергия е крайна, но не е задължително да съществува представяне във вид на сходящи редове на Фурие), полилинейната апроксимация се конструира чрез числено минимизиране на L2-нормата (мярка за разделяне, базирана на дистанция/площ или енергия) за същия набор от оптимизационни променливи.

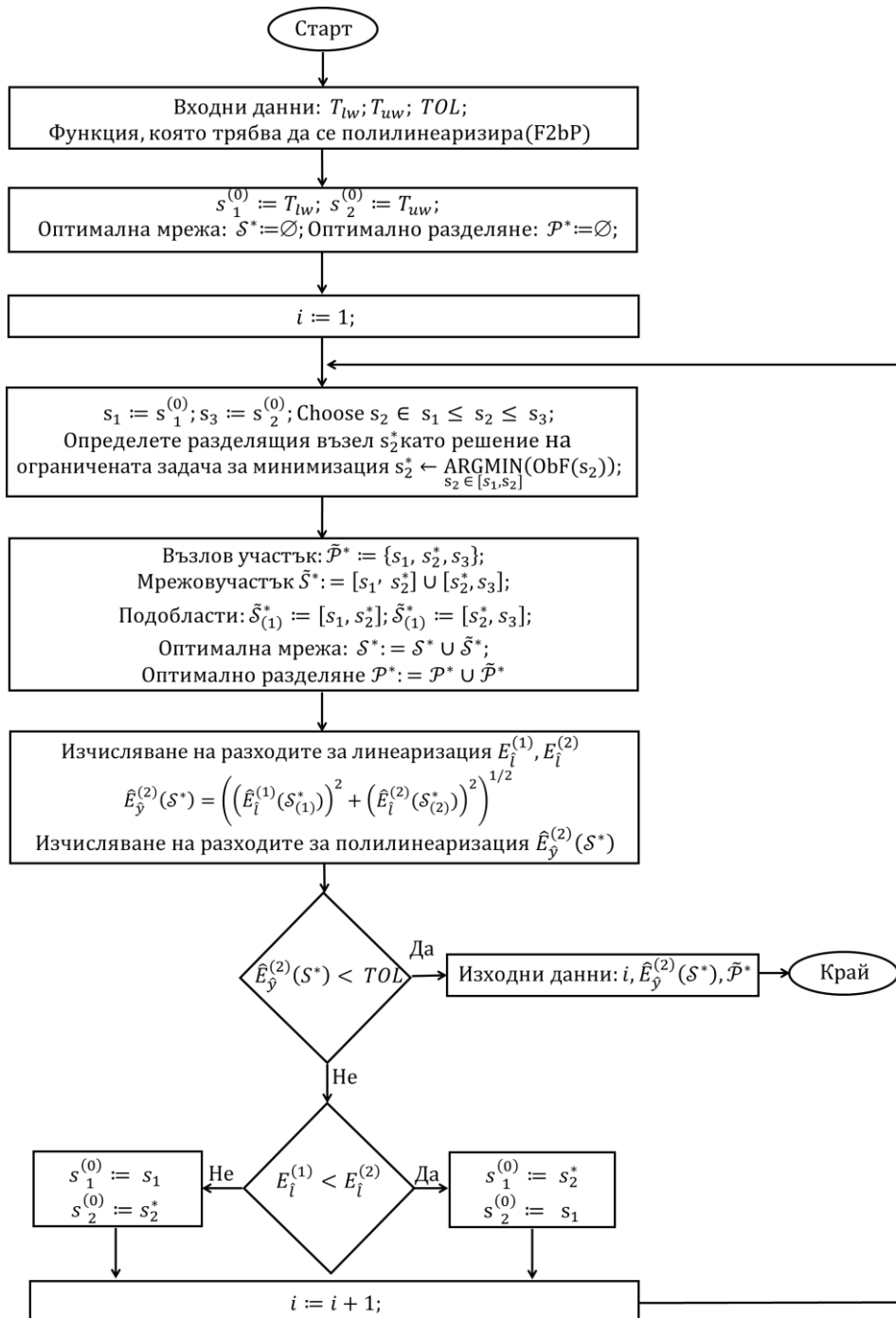
Редица изследвания показват, че за да се преодолеят проблемите, произтичащи от ограничените ресурси на интелигентните сензори и IoT устройства, са необходими подходящи "олекотени" алгоритми, които позволяват ефективна свързаност и интелигентно управление на процесите на измерване. Предложеният метод има съществени предимства за практически реализации: първо, за хардуерното внедряване на интелигентните сензорни устройства могат да се използват нискобюджетни микроконтролери; второ, оптималното

разделяне на измервателния обхват намалява пространството в паметта на микроконтролера, необходимо за съхранение на параметрите на линеаризираните характеристики.

Апроксимацията на дадени сензорни предавателни функции чрез полилинии, наричана по-долу полилинеаризация, се основава на три основни понятия: сегмент на крива, сегмент на (поли)линия и мярка за отдалеченост между тях. Докато сегментът на кривата е диференциално геометрично понятие, сегментът на полилинията възниква от много по-прозаичен проблем: необходимостта да се апроксимира "по най-добрия възможен начин" сегментът на кривата с компактна права линия. Концептуално процесът на полилинеаризация на дадена сензорна характеристика се състои от три алгебрични етапа. Първият е представянето на предавателната функция на сензора, т.е. извеждането на нейните алгебрични уравнения от физичните принципи (което не е предмет на настоящата работа). Вторият етап е количественото определяне на отдалечеността между кривата и всеки от апроксимиращите я полилинейни сегменти. И накрая, третият и в много отношения най-важен етап е как да се построи полилинията, която е най-близка до цялата крива, въз основа на измерването на отдалечеността между кривата и отсечките, изграждащи тази полилиния.

Формулирана и решена е задачата за минимизиране на площта с ограничение, изразено в понятията на конкретна мярка за отдалеченост; нейното решение, в рамките на зададения от потребителя толеранс (*TOL*), ни осигурява управляемата полилиния на кривата.

Основните стъпки на алгоритъма за полилинеаризация са представени на Фиг. 3.41.



Фиг. 3.41. Основни стъпки на алгоритъма за полилинеаризация

3.2.4. Сливане

Изследване на конфигурации на филтри на Калман за локализиране на работи

Позиционирането на мобилни системи с висока точност е предпоставка за интелигентно автономно поведение както в полевата роботика, така и в индустриална среда. Изследването цели създаването на роботизирана платформа и нейното използване за тестване и оценка на конфигурациите на филтъра на Калман. Конфигурацията се реализира с помощта на мобилен робот Husky A200 и сензор LiDAR. Разработени са пет различни сценария за тест на

предложената конфигурация. С тях са тествани филтрите за тяхната ефективност по отношение на точността на определяне на позицията на обекти.

Сравнение на EKF2D, UKF2D и EKF3D

Прави се сравнение между трите варианта на филтри EKF2D, UKF2D и EKF3D. Направеното сравнение е само между резултатите от глобалния EKF, тъй като резултатите от локалния EKF се оказват недостатъчно точни. Въпреки че те показват приемлива грешка на крайното положение, междувременно се отклоняват много силно от истинското положение. Това прави резултатите от местния EKF неизползваеми за определяне на местоположението на обекта и поради това те не са включени в сравненията. Резултатите от сценарий 4 стават неизползваеми, поради много силни ефекти на отражение и *многолъчево разпространение* и затова също се пренебрегват в следващите сравнения.

3.2.5. Оценка на методи базирани на дълбоко обучение за откриване и сегментиране на облаци

Подходите за цифрово прогнозиране на времето и прогнози, базирани на геостационарни спътници, са ограничени по отношение на пространствената и времевата си разделителна способност. Те са твърде неточни за краткосрочни прогнози. Така че използването на наземно базирано изображение на небето при прогнозиране е обещаващ подход за оценка на облачната покривка (Chow, C.W., Urquhart, B., Lave, M., Dominguez, A., Kleissl, J., Shields, J. and Washom, B., 2011).

Обект на детайлно изследване е подходът, използващ невронни мрежи и сравнението на реализации на тяхна база. Подробности за използвания хардуер и невронни мрежи са дадени в (Hensel, Marinov, Koch, & Arnaudov, 2021).

Направено е сравнение между методи за конвенционална обработка на изображения и двата метода, използващи дълбоко обучение - Mask R-CNN и CloudSegNet. Конкретните числа са показани в Таблица 3.17.

Таблица 3.17. Сравнение на изследваните методи за откриване на облаци

Метод	Степен на попадение (Hit rate)	Точност (Accuracy)	F-Score
Класическа обработка на изображения	0,692	0,767	0,728
Mask R-CNN	0,583	0,500	0,538
CloudSegNet	0,862	0,843	0,846

Предимство на Mask R-CNN е прогнозирането на ограничаващите полета, което позволява да се използва като директен вход за последващото проследяване и прогнозиране на движението на отделни облаци. Сегментирането по пиксели се използва за прогнозиране на общото облачно покритие. И двата алгоритъма са сравнително бързи при оценката (не при обучението) и превъзхождат класическия подход, при който първо трябва да се генерират HDR изображения от малка поредица от изображения.

В заключение може да се обобщи, че CloudSegNet показва по-добри резултати за сегментиране и откриване на облаци. Ефикасността на Mask R-CNN може да се подобри чрез увеличаване на количеството данни за обучение.

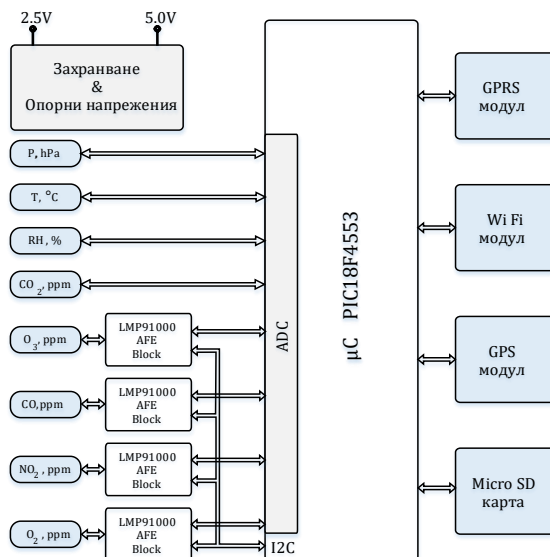
4 РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ НА СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ ЗА МОНИТОРИНГ НА КАЧЕСТВОТО НА ВЪЗДУХА

Обект на изследване в тази глава са сензорни системи за мониторинг на качеството на въздуха на открито и закрито и на системи за пречистване на въздуха.

4.1 Мониторинг в урбанизирана среда

Мултисензорни системи за мониторинг

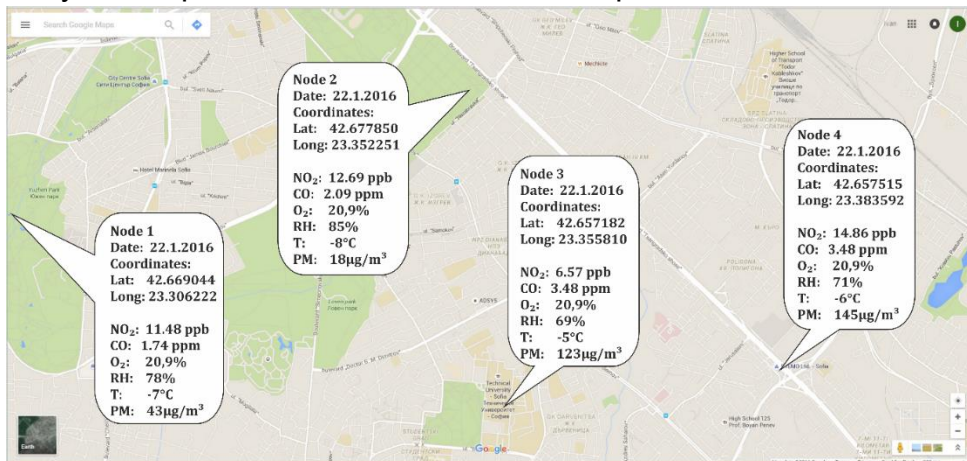
Напредъкът в областта на нискобюджетните газови сензори и в развитието на интелигентните системи дават възможност за нови, достатъчно точни и достъпни инструменти за мониторинг на качеството на въздуха. Представен е подход за икономически ефективно измерване на основни параметри на околната среда в реално време и реализацията на мултисензорни модули чрез използване на амперометрични, оптични и недисперсни инфрачервени газови сензори. Блок-схема на разработения модул за провеждане на изследванията е представена на Фиг. 4.1.



Фиг. 4.1. Блок-схема на разработения модул

Мащабиране на сигналите от амперометричните газови сензори

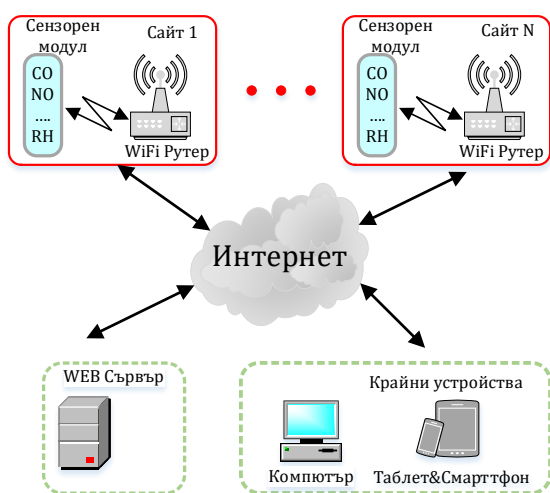
Пример за документиране на резултати от измервания на качеството на въздуха, направени на 22.01.2016 г. в София е даден на Фиг. 4.2.



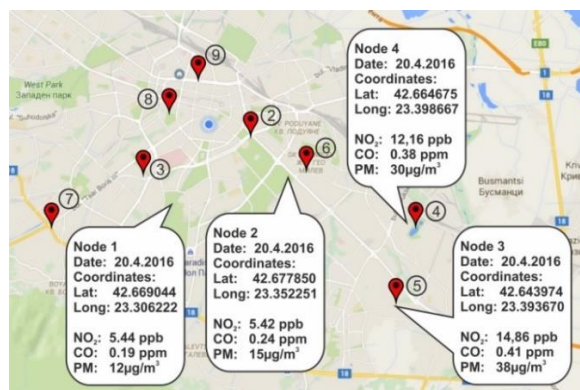
Фиг. 4.2. Резултати от измервания на качеството на въздуха, направени на 22.01.2016 г. в София

Схемите за първична обработка на сигналите от амперометричните сензори се основават на потенциостатична схема. За реализацията е избран конфигурируемият аналогов модул (AFE) - потенциостат за сензорни приложения с ниска мощност LMP91000 (Texas Instruments Inc., 2014). За измерването на концентрацията на азотен диоксид е използван амперометричен сензор NO₂-A42F от Alphasense, за който е направено двуточково калибриране (Alphasense, 2015).

В (Marinov M. , Nikolov, Gieva, & Ganev, 2016) по-детайлно е представена архитектурата на реализираната система, наречена OutSense. Както е показано на Фиг. 4.4, тя включва няколко основни компонента: сензорни възли, безжични маршрутизатори, сървър и крайни устройства, които са описани по-нататък, заедно със спецификата на комуникацията между тях. Резултати от измерванията със системата са показани на Фиг. 4.5.



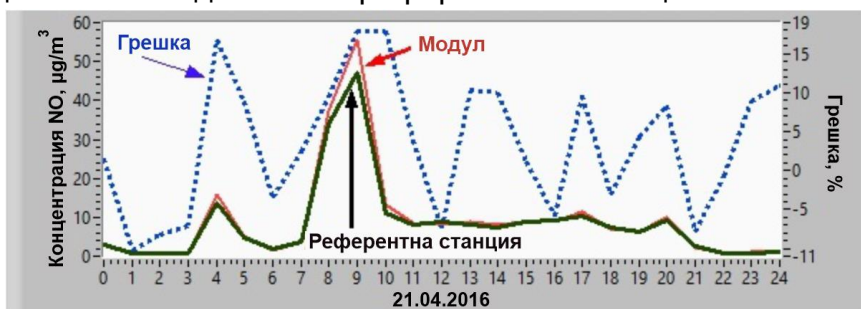
Фиг. 4.4. Архитектура на системата OutSense



*дадени са номерата на модулите и местоположението на стационарните измервателни станции

Фиг. 4.5. Резултати от измервания на качеството на въздуха, направени в райони на София

За да се потвърди точността на получените резултати, те са сравнени с измерванията на местните фиксирани станции за мониторинг. Последните се извършват непрекъснато и се публикуват ежедневно на уебсайт (European Environmental Agency, 2019). Модул 3 е разположен на разстояние, по-малко от 200 m от фиксирана измервателна станция на контролния орган. Както може да се види от резултатите на Фиг. 4.6, стойностите, получени от Модул 3, в повечето случаи са доста близки до тези на референтната станция.



Фиг. 4.6. Стойности на NO, измерени с модул 3, и стойности, получени от фиксираната контролна станция № 3 Младост

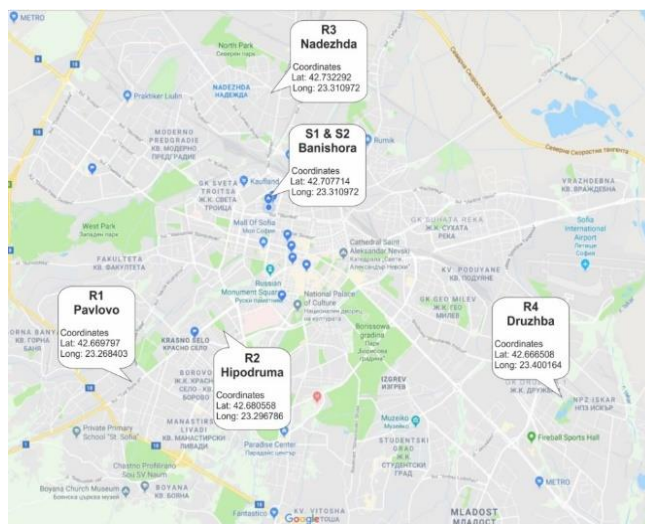
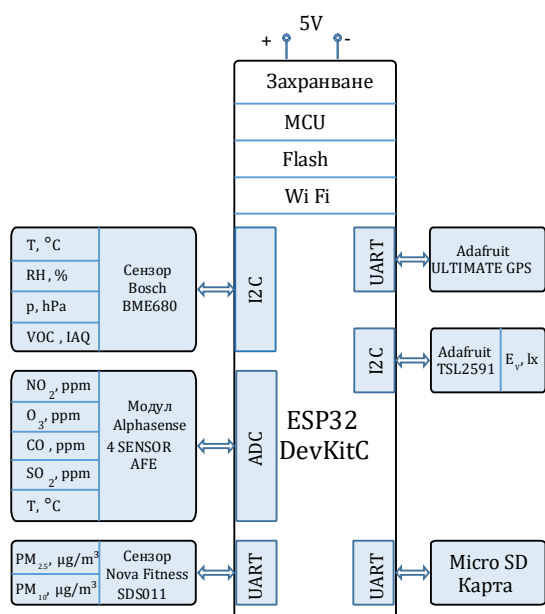
Когато се сравняват измерванията на нивата на NO, виждаме, че нивата на относителната грешка при повечето измервания не надвишават $\pm 10\%$.

Мобилен модул за мониторинг на качеството на въздуха

Цялостната архитектура на системата е представена на Фиг. 4.9. Тя е организирана като устройство с основен управляващ модул и допълнителни модули. На основния модул са разположени микроконтролерът, паметта и USB комуникацията. За този проект е избрана развойна платка, базирана на микроконтролера ESP32 на Espressif Systems (Systems, 2019). На допълнителната платка са разположени субмодулите, които се променят в зависимост от желаната добавка на функционалност.

Освен това разработеният модул разполага с модул за GPS приемник, базиран на чипсет MT3339. Всички данни от сензорите, заедно с GPS информацията, се записват в микро SD паметта.

В случай че всички съседни сензори отчитат почти едни и същи резултати или поне резултатите са силно корелирани, може да се използва методът за „сляпо“ калибриране (Wang, et al., 2016; Balzano, L.; Nowak, R., 2007). Примерна конфигурация, подходяща за осъществяване на „сляпо“ калибриране, е показана на (Фиг. 4.11).



- S1 и S2 - нискобюджетни сензорни модули
- R1, R2, R3 и R4 - референтни сензорни станции

Фиг. 4.9. Архитектура на системата

Фиг. 4.11. Сценарий за "сляпо" калибриране на сензорни модули

Картографиране на концентрацията на ФПЧ

Създаването на профил на замърсяването на въздуха чрез използване на мобилни сензори е крачка към по-добро управление на околната среда и подобряване на живота на обществото. Мобилните сензори предоставят възможност за измерване в реално време на качеството на въздуха в различни места. Този подход е особено полезен, защото предоставя по-голяма прецизност и гъвкавост в събирането на данни.

Мобилните сензори събират информация от различни точки на града, предоставяйки големи обеми данни за замърсяването. Профилът на замърсяването може да бъде от изключителна полза за изграждането на интелигентни градове, където мерките за подобряване на качеството на въздуха се основават на качествени актуални данни. Събраните данни могат да послужат

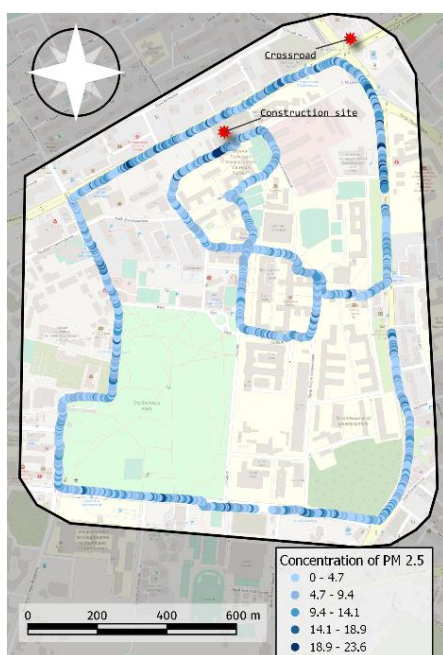
за формулиране на ефективни стратегии за намаляване на замърсяването, подобряване на общественото здраве и създаване на устойчива градска среда. Такъв проект може да стимулира активното участие на обществото и властите в борбата със замърсяването и насърчи иновациите в областта на екологичните решения. В изследването е използван оптичен брояч на частици (OPC-N3) за оценка на нивата на замърсяване в кампуса на ТУ - София през пролетта на 2021 г. Изследването измерва фракции на ФПЧ с размери между $0,35$ и $40 \mu m$, категоризирани в 24 контейнера, откъдето се извличат данни за основните фракции: ФПЧ 1, ФПЧ 2,5 и ФПЧ 10.

Методи и инструментариум

Предложената система за мобилен сензорен модул за мониторинг на ФПЧ използва микроконтролер (ESP32), оптичен брояч на частици (OPC-N3 на Alphasense) за наблюдение на различни по големина фракции на замърсяване с прахови частици (а именно ФПЧ 1, ФПЧ 2,5 и ФПЧ 10) и GNSS модул.

Експериментални резултати

Концентрациите на ФПЧ 2,5 и ФПЧ 10 в $\mu g/m^3$, наложени върху географска карта на маршрутите, са представени на Фиг. 4.25 и Фиг. 4.26. Те представят общата средна концентрация на всеки замърсител на разстояния от приблизително $3,2 m$, от които са взети проби през периода на събиране на данни. На 3 места по външния маршрут има невалидни точки с данни от GPS модула, което се дължи на преминаването на автобуси или големи превозни средства в близост до сензорния модул. Въпреки това получените данни са със задоволителна разделителна способност.



Фиг. 4.25. Резултати от картографирането на концентрациите на ФПЧ 2,5

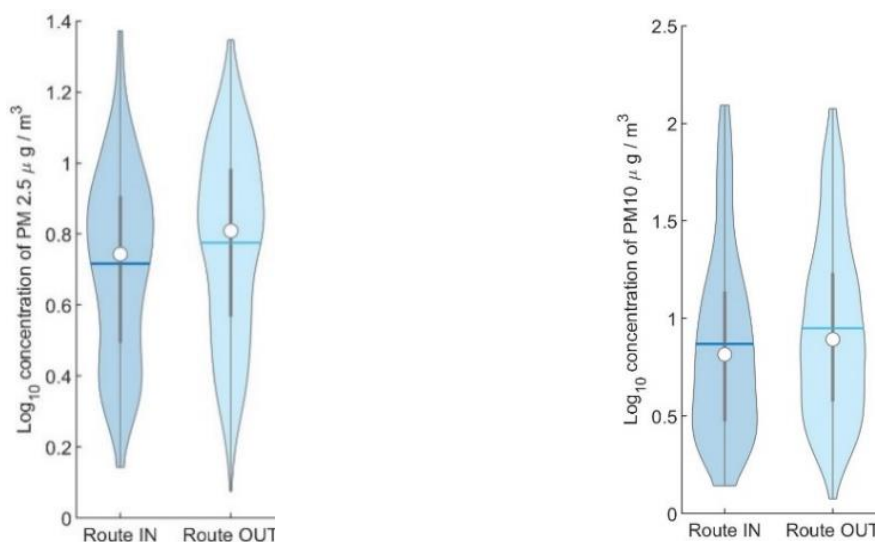


Фиг. 4.26. Резултати от картографирането на концентрациите на ФПЧ 10

Фиг. 4.27 представя така наречената диаграма тип цигулка (Violin plot), която представлява разпределението на всички наблюдавани концентрации на замърсители на въздуха. На графиката са показани медианната стойност (бяла

точка), средната стойност (синя линия) и междуквартилните диапазони (1-ви и 3-ти кватил). Използва се логаритмична скала (Bechtold, 2016).

Произходът на праховите частици играе важна роля при техния мониторинг. В конфигурацията на маршрута се разграничават два различни източника на прахови частици - строителни дейности и транспорт. Концентрациите на ФПЧ 2,5 и ФПЧ 10 са по-високи в близост до строителната площадка, отбелязана на фигурите. Ясно изразените повишени нива на двата размера частици при всяко преминаване в близост до строителната площадка са ясен показател за замърсяването, причинено от механизирани изкопни дейности.



Фиг. 4.27. Диаграми тип цигулка за картите от Фиг. 4.25 и Фиг. 4.26

Стойностите на ФПЧ 1 по маршрута OUT се увеличават значително, когато измерванията се извършват в близост до най-натоварените кръстовища по пътя, отбелязани на фигурите. За разлика от тях, стойностите на ФПЧ 2,5 и ФПЧ 10 не показват значително повишение.

4.2 Мониторинг на закрито

Реализация и тест на мултисензорни устройства

За да се изследва ефективността на използването на нискобюджетни сензори за различни приложения, е изследвана група от четири сензора NDIR CO₂ (S100, ELT Sensor; MinIR, GSS; IRC-A1, Alphasense; K30, SenseAir). Всички те имат гарантирани измервателни обхвати 0–5000 ppm и тегло под 20 g.

Сензори за летливи органични съединения (ЛОС)

Често срещаните ЛОС включват съединения от групите на бензола, толуола, трихлоретилена, алкохолите и акролеина. ЛОС се отчитат основно като общо показание на ЛОС (общо количество ЛОС - tVOC). С този термин се признава комбинираното въздействие на съединения, което не е установено по друг начин поради ниските нива на концентрация.

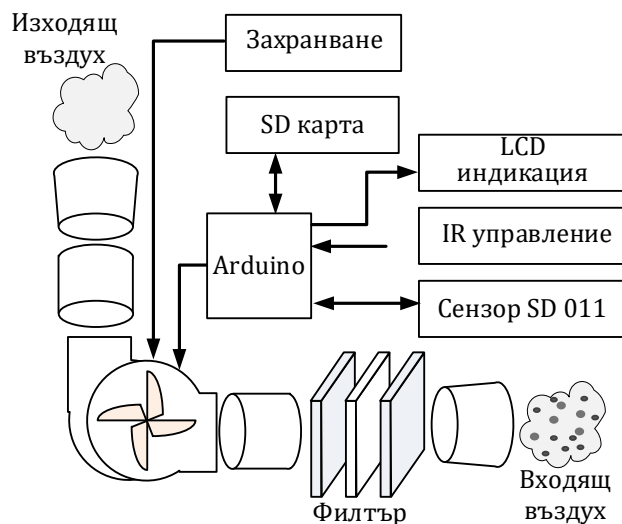
Четири избрани съвременни сензори за оценка на качеството на въздуха са сравнени въз основа на тяхната наличност, ниска цена и възможност за лесно включване в системи за събиране на данни (вградени интерфейси): CCS811 (ams, 2016), MICS-VZ-89TE (SGX Sensortech, 2018), BME680 (Bosch Sensortec, 2017), BME688 (Bosch Sensortec, 2021). От тях BME680 и BME688 предоставят

данни не само за качеството на въздуха, но и за неговите температура, влажност и налягане. За целите на изследването е избран сензорът VME680. При изследванията са използвани по три устройства от всеки модел сензор.

Реализация на система за пречистване на въздуха

Дизайн на преносимия пречиствател на въздуха

Структура на преносимия пречиствател на въздуха е показана на Фиг. 4.32.



Фиг. 4.32. Архитектура на преносимия пречиствател на въздуха

Най-ефективният начин за използване на пасивни филтри изисква въздушният поток да преминава равномерно през целия филтър, вместо да се изтласква през средата му. По този начин се удължава животът на филтъра и се увеличава ефективното време на филтриране на въздухопречиствателя. За да се изпълнят тези две задачи, скоростта и посоката на въздушния поток трябва да бъдат предварително определени. Това се постига с помощта на мощен вентилатор и конусен входящ канал.

4.3 Обобщение и изводи по глава 4

Проучванията представят разработването на интелигентни мултисензорни модули за онлайн наблюдение на ключови параметри на въздуха. В сравнение с други решения, описани в литературата, предложеният подход разчита на мобилни сензорни модули с ниска консумация на енергия, оборудвани с дълготрайни акумулаторни батерии и Wi-Fi комуникационни модули. Това позволява сензорните устройства да бъдат лесно премествани и поставяни в райони, където има Wi-Fi покритие.

Появата на нискобюджетни сензори в съчетание с концепциите, залежали в интернет на нещата (IoT), дава възможност да се промени начинът на наблюдение на качеството на въздуха. В пространствата между стационарните станции за мониторинг на качеството на въздуха могат да се добавят рентабилни стационарни или преносими станции за мониторинг. Чрез тези станции могат да се получават данни с приемливо качество и да се постигне *голяма времева и пространствена разделителна способност*.

Резултатите от измерванията с нискобюджетни сензори показват, че измерванията, получени с тях, в ограничени измервателни обхвати са сравними по своята точност с тези от референтни фиксирани станции със скъпоструваща

апаратура. Това позволява нискобюджетни сензори да бъдат използвани за събиране на данни за качеството на въздуха с висока разделителна способност в урбанизирана среда.

Използването на многопараметрични системи за измерване на качеството на въздуха дава възможност за подробен анализ и локализиране на основните източници на замърсяване. Тези измервателни системи са важни компоненти в много реални проекти за интелигентни градове (Department for Health and Environment of the City of Munich (Germany), 2014).

Представено е проучване на възможностите за приложение на нов инструмент за изследване на качеството на въздуха на различни височини и в труднодостъпни райони, който е приложим за широк кръг потребители. Подходът се основава на използването на нискобюджетни БЛА (безпилотни летателни апарати) и нискобюджетни сензори за качеството на въздуха. Изследвани са възможностите персонализиран, стандартен БЛА, оборудван с мобилни устройства за мониторинг, да бъде използван като ефективно, универсално и неконвенционално средство за събиране на триизмерни данни за концентрацията на замърсители във въздуха.

Безпилотният летателен апарат дава възможност за по-добро описание на поведението на замърсителите в градските райони. Той е мощен инструмент за измерване на концентрациите в близост до вероятен източник на замърсители.

Анализът на "горещите" проблемни точки и динамиката на промените в концентрациите на ФПЧ в урбанизирана среда е от особено значение за идентифициране на *места и часови зони*, където съществуват постоянни заплахи за човешкото здраве и благосъстояние. Той ще подпомогне усилията за разработване на съвременни разпоредби и стандарти, които да се прилагат в големите градове.

Обект на изследване е и потенциалът и жизнеспособността на подход за мобилен мониторинг за оценка на финото пространствено-времево разпределение на замърсителите на въздуха в урбанизирана среда.

Получените резултати показват хетерогенността на концентрациите на ФПЧ във времето и пространството и потвърждават, че по-фините компоненти на ФПЧ са причина за по-голямата част от замърсяването с ФПЧ в градската среда.

Предложената мобилна мониторингова система е в състояние да измерва ФПЧ с висока честота на дискретизация, което позволява получаването на резултати с висока степен на достоверност. Това позволява и точното проследяване на източниците на ФПЧ.

Тенденцията за мониторинг на качеството на въздуха се превърна в доминираща концепция както в развитите, така и в развиващите се страни. Прогнозирането на условията на качеството на въздуха на закрито е основна грижа за подобряване на общественото здраве и благосъстояние, за подобряване на „интелигентността“ на жизнените пространства.

Понастоящем се наблюдава нарастващ интерес към въздействието на замърсяването на *въздуха в помещенията върху човешкото* здраве. Традиционните измервателни устройства често са скъпи и с точност, която е много по-висока от тази, необходима за оценка на нивата на замърсяване в помещенията.

В изследванията е представена оценка на точността на нискобюджетни сензори за наблюдение на основни параметри на околната среда в затворени помещения. Проведени са експерименти със симулация на източници на замърсители на въздуха в помещенията, които са осъществени при различни температури и нива на относителна влажност.

Технологичният напредък откри възможност за по-ефективно наблюдение и управление на качеството на въздуха в помещенията. Резултатите от изследването показват, че много от *нискобюджетните сензори имат потенциал да бъдат използвани за осигуряване на безопасна урбанизирана и вътрешна среда.*

В тази връзка е представено разработването на преносим пречиствател на въздух с набор от филтри за подобряване на качеството на въздуха в жилищни помещения и офиси. Представени са основни стъпки при разработването на хардуера и софтуера и са проведени експерименти в реална офис среда.

Изследванията в четвърта глава и резултатите от тях могат да се обобщят както следва:

- Представено е проектирането и реализацията на мултисензорна система на базата на амперометрични сензори за измерване на основни параметри на въздуха в урбанизирана среда.
- Разработени са интелигентни мултисензорни модули за онлайн наблюдение на параметри на въздуха и е изследвано приложението им в реални условия.
- Проектиран е и е реализиран мобилен сензорен модул, според стандарта за интелигентни сензорни системи IEEE 1451.
- Представен е подход за мониторинг на замърсяването с ФПЧ чрез БЛА. Подходът позволява осъществяване на мониторинг в труднодостъпни райони – на височини до около 500 м и локализация на замърсители.
- Изследвани са методи и инструментариум за картографиране на концентрацията на ФПЧ. Те позволяват осъществяване на ефективен мониторинг на замърсители на въздуха на достъпна цена на транспортни артерии и на големи площи, чрез монтаж на мобилни/транспортни средства.
- Разработени са сензорни модули за мониторинг на параметри на въздуха в закрити помещения и са дадени резултати от техните реализации.
- Разработен е и са изследвани основните характеристики на преносим пречиствател на въздуха.

5 РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ НА СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ ЗА МОНИТОРИНГ НА ВОДА И ПОЧВА

Обект на изследване в тази глава са сензорни системи за мониторинг на качеството на води и почви.

5.1 Изследване на вода

Качеството на водата също е много съществен фактор за здравето на хората и опазването на околната среда. Съществуват много физични и химични методи за неговия анализ с различна точност, сложност и времеемкост.

Реализация на сензорна система за мониторинг на вода на базата на колориметричен метод

Качеството на водата се определя от наличието на примеси в нея, които са вредни за човешкото здраве. *Органичните замърсители* включват микроорганизми, като патогенни бактерии, вируси и водорасли, които могат да причинят заболяване или смърт на човека. *Химичните замърсители* включват канцерогени, тежки метали (мед, желязо, арсен, олово и манган), нитрати (странични продукти от торове) и продукти от пречистването като хлорамини (Таблица 5.1). За измерване на органичните замърсители съществуват само косвени методи, докато химичните замърсители могат да се измерват директно благодарение на хомогенното им разпределение, различните химични свойства и съвременната химична сензорика.

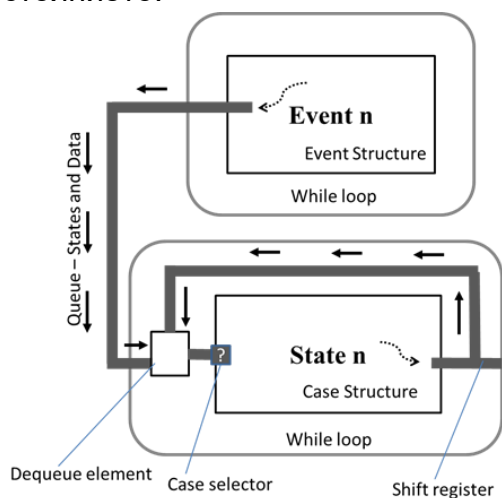
Таблица 5.1. Примери на замърсители на водата, откриваеми с колориметър

Замърсител	Обхват, mg/L	Реагент	Цвят	Дължина на вълната
Без съдържание на хлор, Cl_2	0,02 до 2,00	DPD	розов	520 nm
Хлорен диоксид, ClO_2	0,04 до 5,00	Глицин	розов	520 nm
Формалдехид, CH_2O	0,003 до 0,5	МВТН	син	640 nm
Нитрати, NO_3	0,2 до 30,0	Хромotropна киселина	жълт	460 nm
Фосфор, PO_4^{3-}	1,0 до 100,0	Молибдат в киселина	жълт	460 nm
Йод, I_2	0,07 до 7,00	DPD	розов	520 nm
Алкалност, $CaCO_3$	25 до 400	TNT870	нюанс на синьо	640 nm
Бром, Br_2	0,05 до 4,50	DPD	розов	520 nm
Твърдост, $CaCO_3$	0,008 до 1	Твърдост, ULR комплект	нюанс на синьо	640 nm

Проектиране на виртуалната система за оценка на качеството на вода Проектиране на софтуера

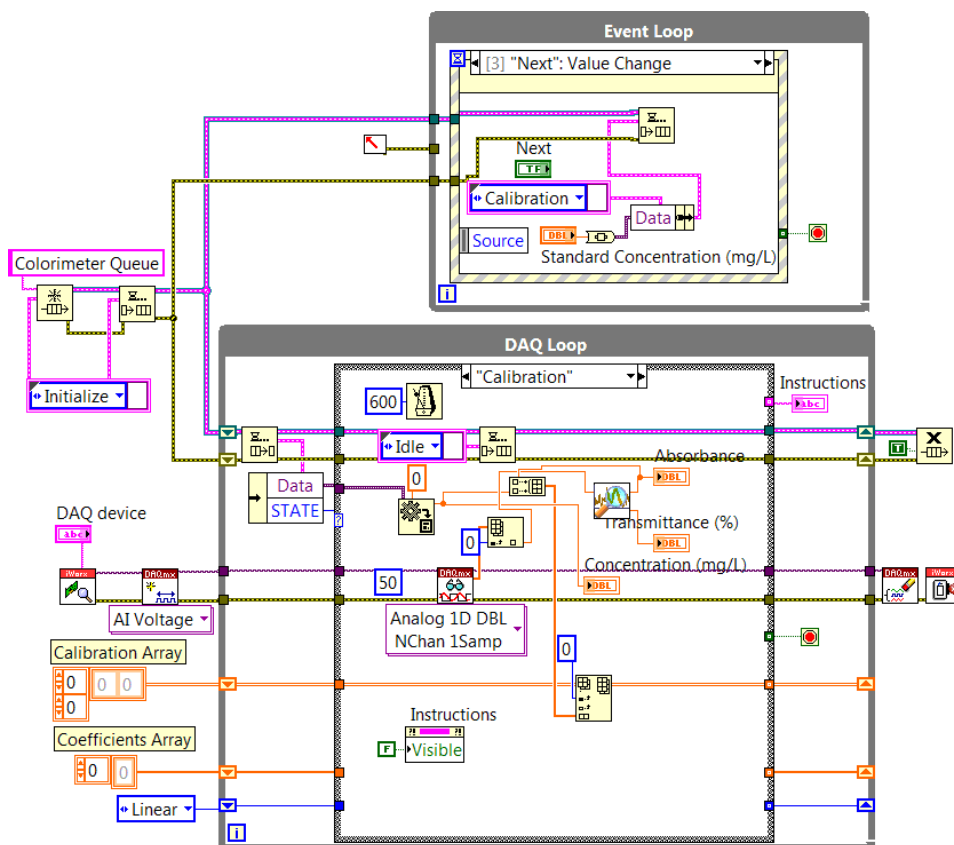
Софтуерът на виртуалната система е реализиран чрез използване на т.нар. архитектура на машини със състояния, управлявани от събития. По дефиниция събитийно управляемата машина на състоянията е вариант на крайната машина на състоянията, но преходът от едно състояние в друго се иницира от събития или съобщения. Типична схема на архитектура на машина на състоянията, управлявана от събития, е показана на Фиг. 5.1. Този шаблон за проектиране се състои от три основни компонента - **Queue reference** - опашка,

User events - събития на потребителя и **Main state machine** - основна машина на състоянието.

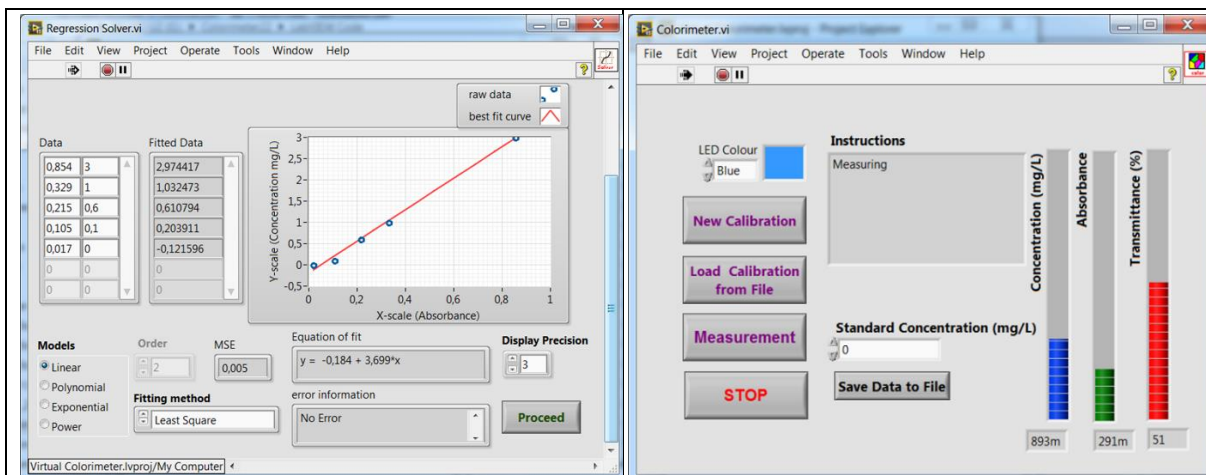


Фиг. 5.1. Схема на архитектура на машина на състоянията, управлявана от събития

На Фиг. 5.2 е показана реализация на машината на състоянията, управлявана от събития в средата на LabVIEW



Фиг. 5.2. Реализацията в средата на LabVIEW на машината на състоянията, управлявана от събития



Фиг. 5.3. Получената крива за калибриране и определяне на концентрацията на свободен хлор

Фиг. 5.4. Лицев панел на виртуалния колориметър с резултатите от измерванията

След като се получи уравнението за калибриране, е възможно да се измери концентрацията на свободен хлор в проба вода. Процесът на определяне на концентрацията на свободен хлор в проба вода от плувен басейн е показан на Фиг. 5.3 и Фиг. 5.4. Концентрацията на хлор е $0,9 \text{ mg/L}$ при ниво абсорбция на синя светлина равна на $0,3$.

Изборът на физикохимичните параметри, които са наблюдавани в разработената система, се основава на взаимодействието между основните физикохимични параметри и химичните/биологичните замърсявания във водата. Параметрите, предложени за мониторинг, са обобщени в Таблица 5.2.

Таблица 5.2. Физикохимични параметри за измерване

Параметър	Обхват	Мерни единици
Разтворен кислород	0 - 18	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
pH	6,5-8,5	pH
Електрическа проводимост	500-1000	$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$
Мътност	0-5	NTU
Температура	0-100	$^{\circ}\text{C}$



Фиг. 5.5. Блок схема на разработената виртуална система за анализ на вода (Nikolov, Marinov, Ruskova, & Gieva, 2017)

Системата се състои от пет нискобюджетни сензора (P/N IXCEK, 2015), многофункционална система за събиране на данни, персонален компютър и графична среда за програмиране LabVIEW (Фиг. 5.5). Средата за програмиране

улеснява процедурите за калибрирането на сензорите и по-нататъшната обработка на данните с цел подходяща визуализация.

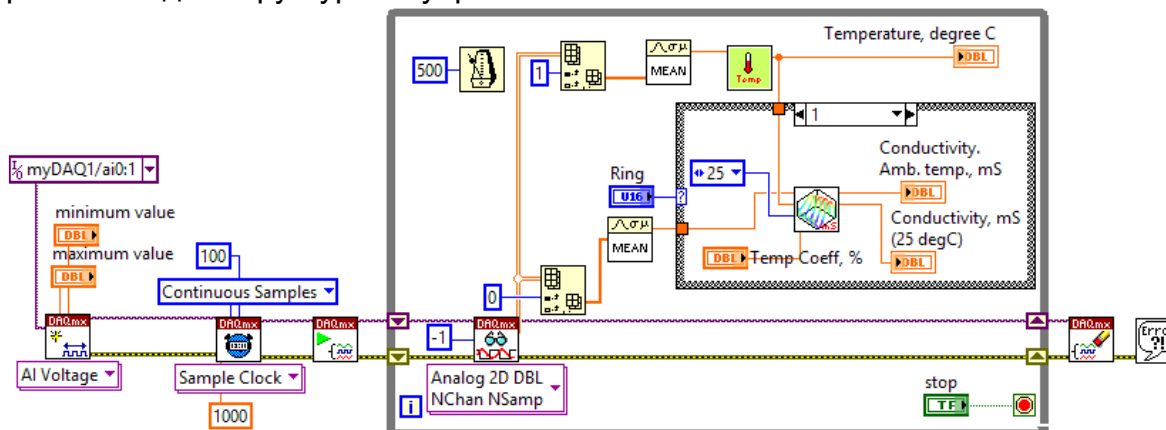
Хардуер

Сензор за разтворен кислород

В предложената виртуална система сензорът е D02N 300E сензор за разтворен кислород. Той включва адаптер, чрез който се задава поляризационно напрежение $-0,8\text{ V}$ за работния електрод на кислородните сензори тип "Кларк". С помощта на I-V-преобразувател, токът, пропорционален на концентрацията на разтворен кислород, се преобразува в напрежение.

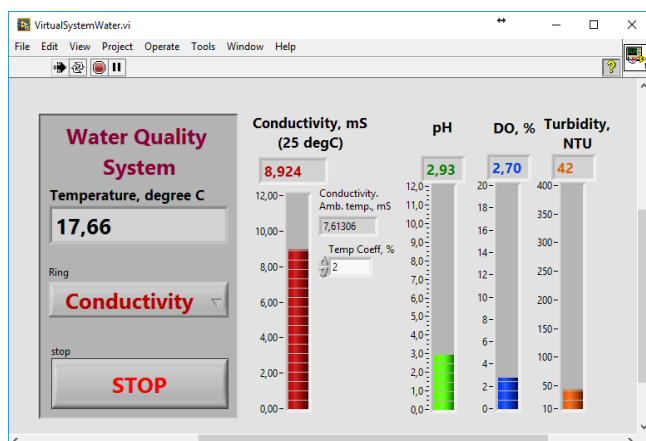
Проектиране на софтуера

Процесът на измерване на качеството на водата се контролира от софтуер LabVIEW. Блок-схемата на реализирания графичен програмен код е показана на Фиг. 5.6. Основните компоненти на софтуера са: драйвери DAQmx за конфигуриране, измерване на времето, стартиране на процеса на събирането на данни, четене на данни и освобождаване на ресурси на системата за събиране на данни. За измерване на различни параметри на водата се използва пръстеновидна структура за управление.



Фиг. 5.6. Блок-схема на разработената виртуална система за измерване на качеството на водата в средата на LabVIEW

Специфичните уравнения за калибриране и зависимостта от температурата на всеки сензор са направени като подпрограми (т.нар. subVI). Лицевият панел на представената виртуална система за анализ на вода е показан на Фиг. 5.8.



Фиг. 5.8. Лицев панел на виртуалната система

Резултати и обсъждане

В проведеното изследване са извършени редица измервателни процедури с водни проби от различни налични в търговската мрежа бутилирани източници и вода от водопроводната мрежа. Водните проби са подбрани с различни параметри, съгласно етикетите на бутилките на производителя. За различните проби количеството на разтворените твърди вещества варира от 50 mg/l до 436 mg/l, рН от 8,3 до 9,5 и електропроводимост от 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ до 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Пробите са обработени с потопен клиноптилолит за една седмица. Както може да се очаква, няма голяма разлика между измерените параметри на водата преди и след третирането на бутилираната вода.

5.2 Изследване на почва

Реализация на система за измерване на влажност на почва

Целта на изследването е да проучи възможността за използване на подходящи нискобюджетни сензори за мониторинг на влажността на почвата и за прецизно земеделие.

Видове почви и методи за определяне на влажността им

Видове почви

Не е възможно да се направи класификация на почвите, валидна за всички региони. Обикновено за различните страни и географски региони съществуват специфични системи за класификация на почвите. Често тези класификации се основават на коренно различни критерии.

Почвите могат да бъдат разделени условно на *пясъчни*, *тинести*, *глинести*, *кредни* и *торфени* типове, въз основа на преобладаващия размер на отделните частици в тях (Ritchey, McGrath, & Gehring, 2015). Това разделение е използвано при изследванията в дисертацията.

Обект на изследване е глинестата почва, която е и най-често използваната в градински условия. Съставът на почвата се определя по метода на хидрометъра и триъгълника на почвената текстура.

Методи за измерване на влажността на почвата

Съдържанието на влага в почвата (Soil moisture content - SMC) най-често се определя въз основа на теглото и обема на почвата. Съответните параметри са гравиметрично съдържание на влага (gravimetric moisture content - GMC) или обемно съдържание на влага (volumetric moisture content - VMC):

$$GMC = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}}, \quad (5.7)$$

$$VMC = GMC \frac{\rho_{soil}}{\rho_{water}} = \frac{V_{water}}{V_{water} + V_{air} + V_{soil}}. \quad (5.8)$$

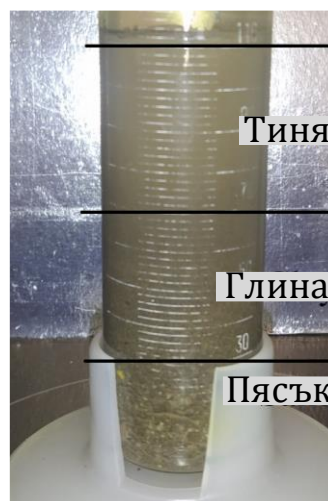
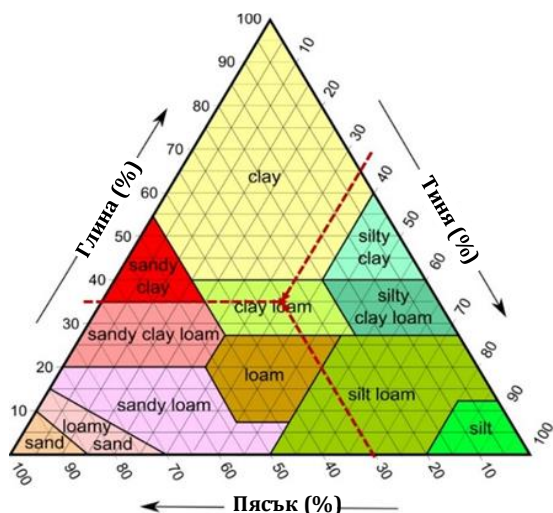
Тук m_{wet} е масата на прясната почвена проба, m_{dry} е масата на изсушената почвена проба, ρ_{soil} е обемната плътност на сухата почва, а ρ_{water} е плътността на водата (обикновено се приема $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$), V_{water} е обемът на водата, V_{air} е обемът на въздуха, а V_{soil} е обемът на твърдия материал.

Опитна постановка и експериментални резултати

Състав на почвата

За нуждите на изследването е използвана обикновена градинска почва. Съставът на почвата се определя по опростения метод на хидрометъра и триъгълника на почвената текстура (Фиг. 5.11). Последният се определя чрез измерване – в случая съставът е пясък 30 %, глина 35 % и тиня 35 %. С помощта му е лесно да се определи каква е почвата - глинеста.

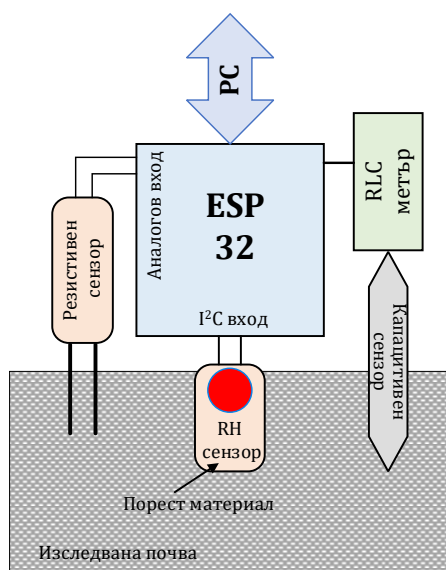
Резултатите от измерването на съдържанието на почвата, с помощта на мензура, са показани на Фиг. 5.12.



Фиг. 5.11. Триъгълник на почвената текстура (Eagle, 2016) Фиг. 5.12. Измерване на състава на почвата

Опитна постановка

Опростена блокова схема на използваната опитна постановка е показана на Фиг. 5.13. Използваните при изследванията три вида нискобюджетени сензора за почвена влага са показани на Фиг. 5.14.



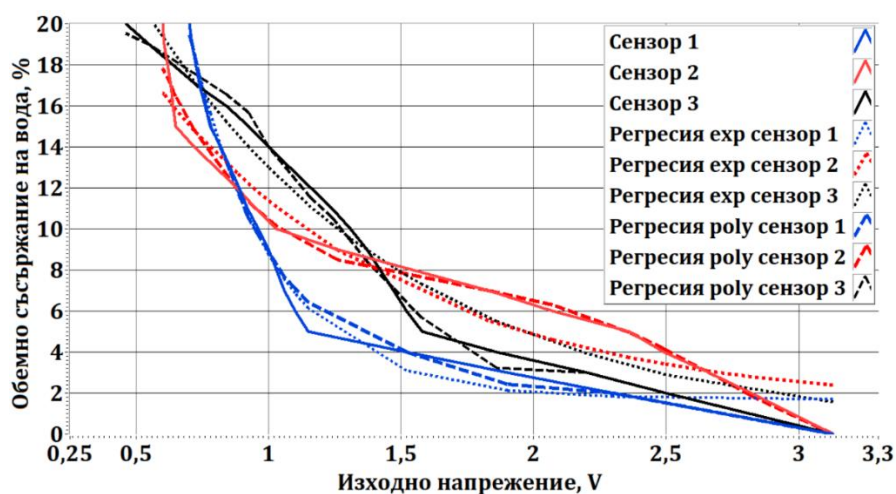
а) б) в)

Фиг. 5.13. Опитна постановка Фиг. 5.14. Тествани сензори за почвена влага

Калибриране на сензора

Най-подходящите за използване сензори са от резистивен тип. Въпреки сравнително малкия им обхват на измерване на обемното съдържание на влага ($0 \div 20\%$ VMC), той е напълно достатъчен за повечето масово отглеждани култури. Съществуват значителни разлики в изходното напрежение на отделните сензори. Този факт изисква калибриране на всеки сензор, преди той да бъде използван в конкретно приложение.

На Фиг. 5.18 са показани резултатите, получени с помощта на виртуален инструмент "Regression solver.vi" (National Instruments Corp., 2020). Най-добри резултати се получават при използване на модел, който е експоненциален или полином от четвърта степен. Средноквадратичната грешка при използване на полиномиален модел е около 0,2, а на експоненциален - около 0,47.



Фиг. 5.18. Изход от резистивни сензори и регресионни функции

Мултисензорна система за мониторинг в областта на земеделието

В дисертацията е представено внедряването на система за наблюдение на някои основни параметри на околната среда, необходими за точен анализ на растежа на растенията. Наблюдаваните параметри са температурата на въздуха и относителната влажност на три различни височини, температурата и влажността на почвата в още две точки, разположени на различна дълбочина (Ganev, Hristov, Laskov, Popov, & Marinov, 2022).

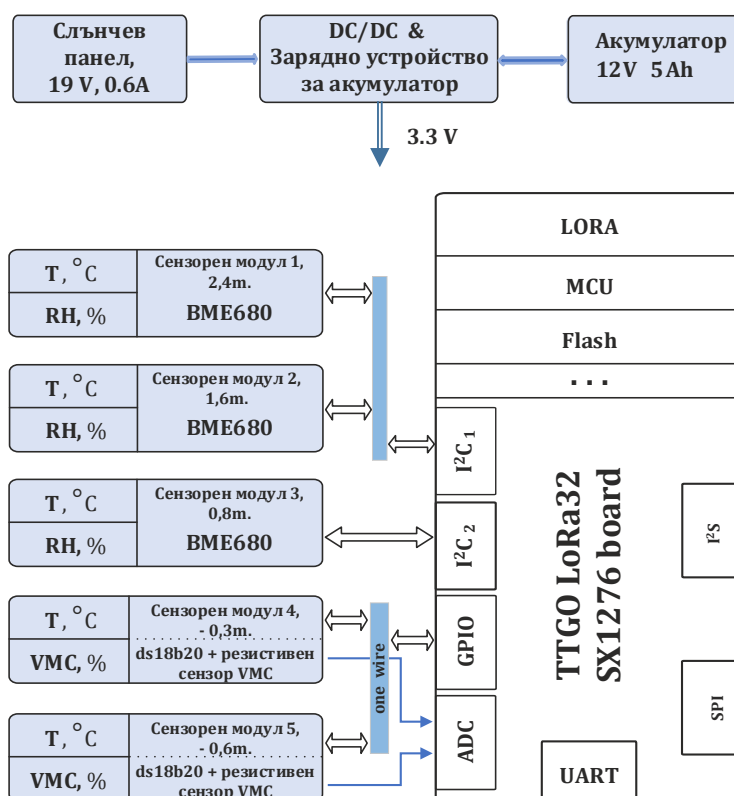
Разработената система е реализирана в овощна градина в Югозападна България. Почвата е алувиално-ливадна (FLUVISOLS), а хумусно-аккумулятивният хоризонт е с дебелина 5–40 cm в различните райони. Съдържанието на хумус също варира от 0,5 до 1,5 %.

Описание на сензорния модул

На Фиг. 5.20 е показана блок-схема на сензорен модул. Всеки сензорен модул се захранва от оловно-киселинна батерия с голям капацитет (5 Ah), за да се осигури автономност на възела при лоши условия през зимата. Компонентите на захранващия блок са подбрани така, че при нормални условия батерията да може да се зареди от 20 % до 100 % за не повече от 7 часа.

Първите три сензорни точки, предназначени за измерване на температурата и относителната влажност за 2,4, 1,6 и 0,8 m, са реализирани с помощта на сензора ВМЕ680. Връзката с тези сензори се осъществява чрез два

отделни I2C интерфейса. Тъй като дължината на свързващите проводници надхвърля спецификациите на този интерфейс, скоростта на предаване на данни е намалена, за да се гарантира надеждна комуникация. За измерване на температурата на почвата е използван сензор DS18B20, разположен в херметичен корпус. Точността му е $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ в температурния диапазон $-10 \div 85^{\circ}\text{C}$. Сензорът VMC е от резистивен тип. За всеки сензор предварително е извършено калибриране за конкретния тип почва по метода, описан в (Nikolov G., Ganev, Marinov, & Galabov, 2021).



Фиг. 5.20. Блок схема на разработения сензорен възел

Използван е микроконтролер ESP32, заедно с комуникационен модул SX127x LoRa, монтиран на платка Heltec Wi-Fi LoRa32. С тази избрана конфигурация е възможно реализирането на сензорен възел, LoRa шлюз или LoRa Range extender. Разликата между различните модули се състои в управляващата програма за микроконтролера.

За намаляване на грешките се извършват няколко измервания, филтриране и осредняване на отчетите. След като данните бъдат събрани, те се криптират и се предават чрез комуникационния модул. В приемника се извършва проверка и ако приемането е извършено правилно, се връща пакет; ако в получените данни има грешка, шлюзът Lora изисква повторно предаване на данните. Модулът на сензорния възел повтаря предаването няколко пъти на произволни интервали. Повторението се прекратява в случай че е получен пакет, потвърждаващ правилното приемане, или е достигнат максималният брой повторения, след което модулът преминава в режим на намалена мощност, за да пести енергия. След определен интервал от време сензорният модул се активира и горната процедура се повтаря.

За да се знае състоянието на сензорите и дали в показанията са възникнали грешки, се предават допълнителни променливи, чиято стойност може да се използва за преценка на състоянието на всеки от сензорите, както и на състоянието на целия модул. Разработената система позволява да се наблюдават както текущите стойности на измерваните параметри (Фиг. 5.21), така и графичното представяне на резултатите за избран период



Фиг. 5.21. Моментни стойности на относителната влажност и температурата на въздуха

5.3 Обобщения и изводи по глава 5

Обобщени и представени са по-важните замърсители на водата. Разработен е виртуален колориметър и е предложена виртуална система за анализ на вода чрез колориметричен метод. Тя позволява лесно калибриране и бърз анализ на данните за различни замърсители на водата. Акцентът е върху софтуерната част на виртуалната система, използваща програмиране, управлявано от събития. Като пример, чрез избраната методика се определя концентрацията на свободен хлор във водата.

В дисертационния труд е проведено оценяване на три вида нискобюджетни сензори, които могат да се използват за измерване на влажността на почвата. Недостатъкът им е необходимостта от периодично калибриране, което се дължи на промените в някои параметри на сензора, както и на колебанията в концентрациите на някои елементи в почвата.

Резултатите от изследванията в пета глава могат да се обобщят както следва:

- Реализация на нискобюджетна сензорна система за мониторинг на вода, на базата на колориметричен метод.
- Реализация на виртуална система за анализ на питейна вода, на базата на нискобюджетни сензори.
- Задълбочен преглед на методи за постигане на ефективна дезинтеграция на клетъчните граници, за изследване на биологични параметри. Систематизирани са техните технологични особености и изискванията към необходимия инструментариум. Различните методи са обобщени в шест категории: *химични, механични, електрически методи, термични,*

лазерни и други методи за лизис. Въз основа на резултатите, получени при прилагане на всеки от изследваните подходи, са открити предимствата и недостатъците им.

- Проектиране и реализация на система за измерване на влажност на почва. Системата използва нискобюджетни сензори и за подобряване на качеството на измерванията е необходимо периодичното им калибриране.
- Разработена е мултисензорна система за мониторинг в областта на земеделието. Тя предоставя ценна и надеждна информация, която може да се използва в процеса на цифровизация на селското стопанство.

6 РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ НА СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ ЗА МОНИТОРИНГ НА ШУМ И ВИБРАЦИИ

Обект на изследване в тази глава са разработката и реализацията на сензорни системи за мониторинг на шум и за измерване на вибрации и мониторинг на технически обекти

6.1 Мобилни системи за мониторинг на шум

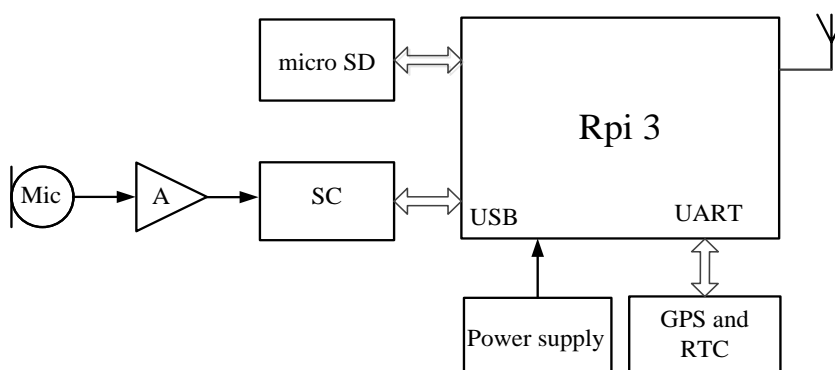
Изисквания за проектиране

При проектирането са взети предвид основни изисквания при измерването на шумови параметри в урбанизирана среда:

- Осигуряване на изчислителен капацитет за извършване на изчисления в мобилното устройство; мащабируема архитектура, която поддържа лесни разширения с периферни и спомагателни устройства (звукови карти, микрофони, сензори за параметри на околната среда).
- Точността на измерване трябва да отговаря на изискванията на IEC 61672 за шумомери от клас 2 (Международна електротехническа комисия, 2002 г.) (International Electrotechnical Commission, 2002).
- Данните, които се записват, трябва да покриват изискванията на актуалните стандарти за измерване на нивото на шума (Imagine workgroup, 2011).

Хардуер

Данните, които се записват, трябва да покриват изискванията на актуалните стандарти за измерване на нивото на шума (Imagine workgroup, 2011). Платформата Raspberry Pi разполага с различни възможности за пренос на данни - основно чрез Ethernet, Wi-Fi или Bluetooth връзка (Фиг. 6.1). Най-подходящата алтернатива е използването на вградения Wi-Fi чип, базиран на IEEE 802.11n. Модулът работи на честота $2,4\text{ GHz}$ и осигурява скорост на трансфер до 150 Mbit/s . Разстоянието от станцията до точката за достъп може да бъде до 300 m (Marinov, M. B., 2017).



Фиг. 6.1.
Архитектура
на мобилната
система за
мониторинг
на шум

Софтуер

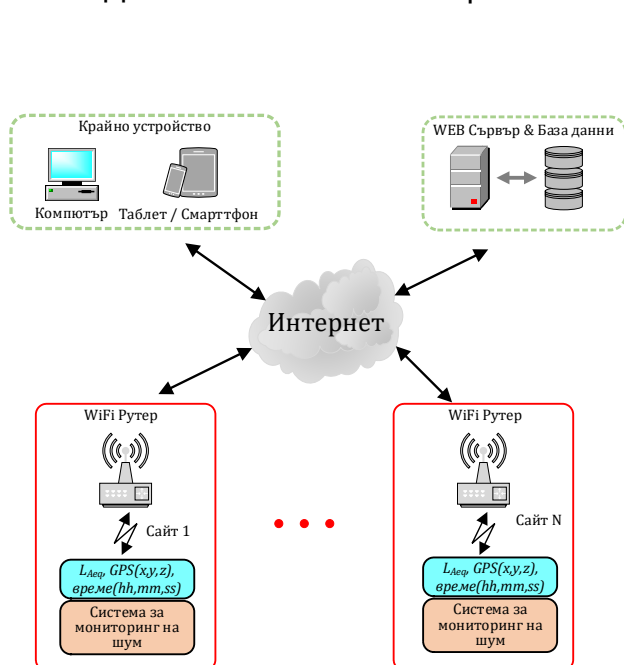
Софтуерната архитектурата на проектираната система следва комуникационния модел клиент-сървър. Отделните компоненти и връзките между тях са показани на Фиг. 6.2. Сървърът осигурява потребителския интерфейс и необходимите ресурси за приемане и обработване на клиентските заявки. Той е отговорен за съхранението на информацията и нейното извличане от базата данни (Marinov, M. B., 2017). Измерванията от станцията са достъпни за крайните потребители посредством интернет терминали. Всяко мобилно или стационарно устройство с вграден браузър, като таблет,

смартфон или компютър, може да бъде използвано в качеството на терминал за достъп до уеб-базирания интерфейс.

Системата разполага и с възможност за отдалечено управление от централен компютър, на който е инсталиран специализиран софтуер за дистанционна поддръжка и обслужване от разстояние. Комуникацията между елементите в така изградената структура се извършва чрез стандартни интернет протоколи. Тяхното широко разпространение улеснява интегрирането на системата и включването на допълнителен брой измервателни точки с цел изграждане на мрежа от станции и разширяване на площта, в която се измерват нивата на шум.

Алгоритъм на основната програма

Алгоритъмът на основната програма е показан на Фиг. 6.3. Първоначално се извършва инициализация на системата, която включва конфигуриране на звуковата карта и осъществяване на връзка с базата данни. След това програмата влиза в безкраен цикъл, прочитащ и обработващ постъпващите отчети. Данните са честотно и времево А-претеглени.

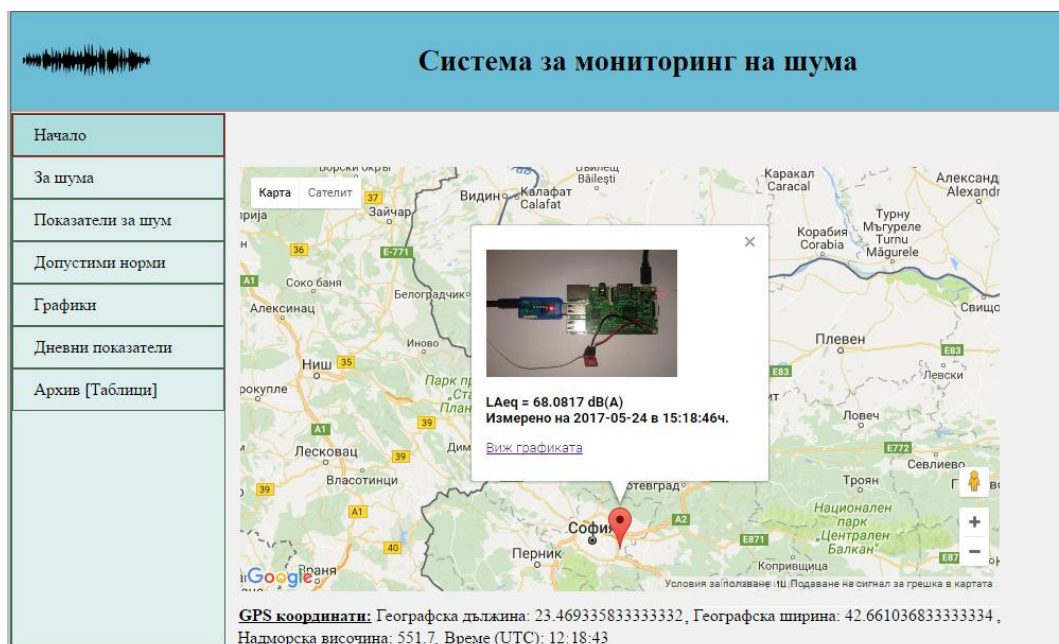


Фиг. 6.2. Архитектура на системата за мониторинг на шума



Фиг. 6.3. Алгоритъм на основната програма

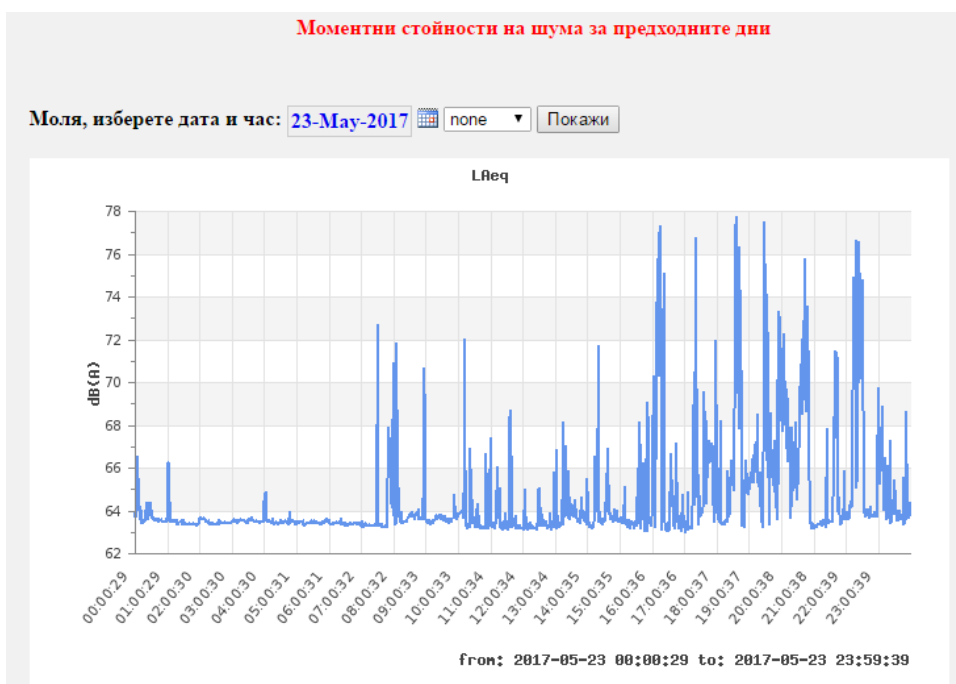
След като се определи коефициентът a на предаване, може да се определи зависимостта между входното звуково налягане в паскали (Pa) и получената изходна цифрова стойност. Тази зависимост се задава като коефициент в програмния код. При проведените изследвания на функционалността на системата се получават коефициенти от порядъка на $0,001214089 \text{ Dig}/Pa$. На Фиг. 6.5 е показана създадената географска карта. Тя е разположена на началната страница на потребителския интерфейс. Изписани са географските координати на системата и е добавен маркер, който указва текущото ѝ местоположение.



Фиг. 6.5. Позициониране на GPS координати на географска карта

Структура на базата данни и генериране на справки

Информацията от измерванията се съхранява в MySQL база от данни. Достъпът до MySQL се осъществява с помощта на специално разработени PHP програми. PHP езикът дава възможност за динамично управление на съдържанието, четене, запис и извършване на специфични за MySQL действия върху конкретната база. Софтуерът показва графика на моментните стойности на шума за желания календарен ден. Извършва се справка с базата данни за избрана дата или дата и час. Стойностите за искания времеви период се прехвърлят към PHP-базиран код, който на свой ред изчертава графиката и я показва на страницата (Фиг. 6.8).



Фиг. 6.8. Графика за нивата на шума на 23.05.2017

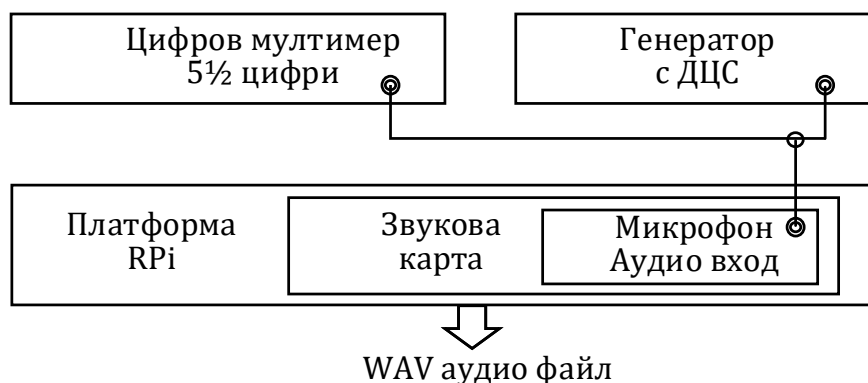
6.2 Система за определяне на психоакустични параметри

Системата за определяне на психоакустични параметри също е реализирана на базата на платформата Raspberry Pi 3 и конвенционален микрофон ADMP404. След продължителни тестове, измерената средна консумация на ток е около 440 mAh (5 V), което позволява непрекъснато измерване на устройството повече от 24 часа, като се приема, че ефективността на акумулаторния пакет е по-голяма от 80 %.

Калибриране на акустичната система

За калибриране на системата първо е необходимо да се определи коефициентът на предаване на звуковата карта. За целта е реализирана опитната постановка, показана на Фиг. 6.13.

Синусоидален сигнал, с честота 1 kHz и различни амплитуди, се осигурява от генератор (GW Instek SFG-1013 DDS Function Generator). Амплитудата на сигнала се измерва с цифров мултимер, показващ истинска ефективна стойност (HP3478A DMM) и се съхранява с помощта на звукова карта в паметта във формат на аудио файл (wav). Средноквадратичните стойности на напрежението от генератора трябва да са по-малки от 350 mV , тъй като над тази стойност общото хармонично изкривяване се увеличава значително.



Фиг. 6.13. Работна среда за оценка на коефициента на предаване на звуковата карта

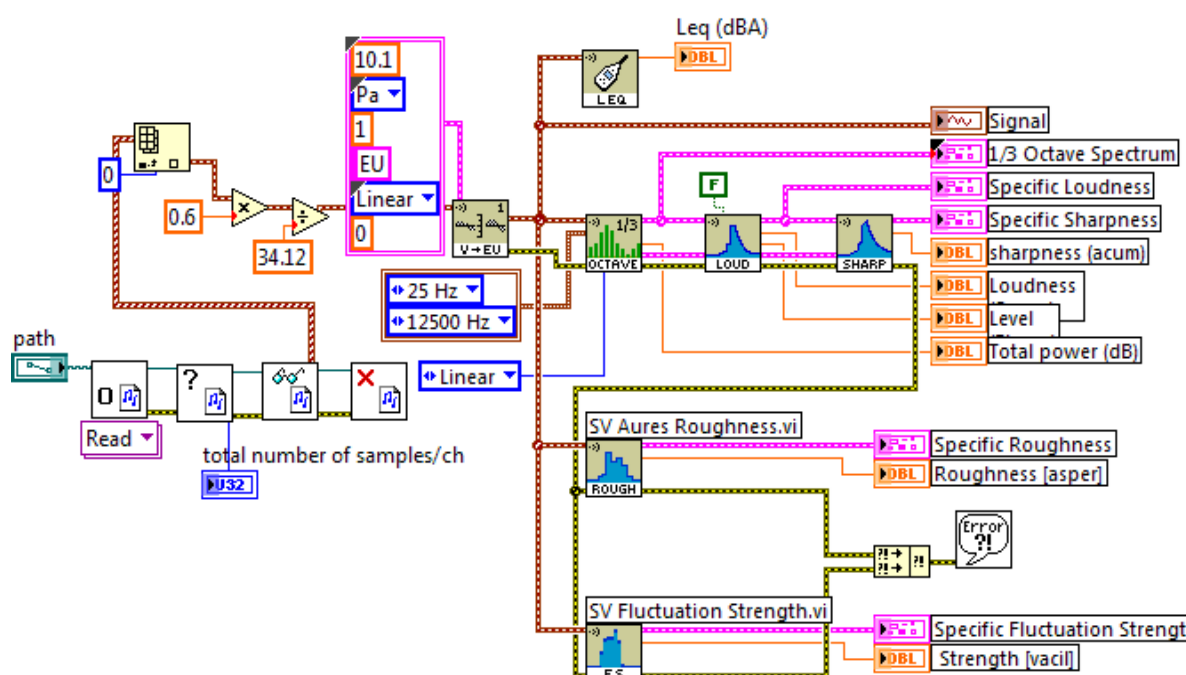
Съхранените аудио файлове с различни амплитуди се обработват в среда на LabVIEW, за да се изчислят техните средни стойности. Коефициентът на предаване на аудио картата може да бъде получен на базата на средноквадратични стойности, измерени с цифровия мултимер и средноквадратичните стойности, изчислени от wav файловете. В този конкретен случай изчисленият коефициент на пренос на аудио картата е равен на 0,6. След като се получи коефициентът на предаване на звуковата карта, е възможно да се преобразува измереният шум в паскали (Pa) в средата на LabVIEW. За целта се използва чувствителността на микрофона ADMP404 и усилването на предусилвателя.

Реализация на психоакустичен анализатор в средата на LabVIEW

Програмният пакет за измерване на звук и вибрации на National Instruments предоставя виртуални инструменти на LabVIEW, с които се реализира набор от алгоритми за изследвания в областта на психоакустиката. Този пакет изчислява спектъра от 1/3 от октава, специфична сила на звука, специфична рязкост, специфична грапавост и специфична сила на флуктуация

на едноканален входен сигнал във времевата форма. Тези показатели за качество на звука са в съответствие със стандартите за качество на звука ISO 532B, ANSI, IEC и JIS. Блок схемата на разработения графичен софтуер за оценка на качеството на звука е показана на Фиг. 6.14.

Първите четири функции отварят и четат данни от предварително съхранен wav файл и ги преобразуват в масив от форми на сигналите. След това с функцията *Index array* се избира първият масив и се умножава по коефициента на предаване. Първият виртуален инструмент, използван от Sound and Vibration Measurement Suite, е SVL *SVL Scale Voltage to EU.vi*. Той мащабира сигнала от волтове до инженерни единици, в конкретния случай до паскали. Както може да се види на Фиг. 6.14, клъстерът с информация за канала определя информация за измервателната система. Първата числова стойност 10,1 е чувствителността на сензора, която определя чувствителността на микрофона в mV/Pa .



Фиг. 6.14. Блокова диаграма в средата на LabVIEW на системата за оценка на качеството на звука

6.3 Измерване на вибрации и мониторинг на технически обекти (ТО)

Акселерометри

Използването на микромеханични акселерометри е предпочитан подход при мониторинга на ТО. Тук са представени по-нови разработки, в които се използват съвременни сензори и методи за с на данни и използването на методи на машинното обучение (МО).

Сливане на сензорни данни за следене състоянието на ТО

Понастоящем са налични много мобилни приложения, които използват вградени в тях сензори за проследяване на основни параметри на асансьорите, като скорост, ускорение и т.н. (Bosch Software Innovations, 2017). Ограничените

възможности на хардуера (честота на дискретизация и др.) обаче не позволяват да бъдат използвани за подробно наблюдение и прогнозна поддръжка.

Представеното тук изследване е насочено главно към проектирането и внедряването на интелигентни сензорни устройства тип "plug-and-play", които улесняват неинвазивното инсталиране на асансьорите, интегрираната обработка и съхранение на данни, и безжичната свързаност, които могат да предоставят подробна информация за състоянието на асансьора.

6.4 Обобщения и изводи по глава 6

Платформата и методите, избрани за разработване на софтуер за мобилна система за мониторинг на шума, предлагат редица предимства. Най-важните от тях са универсалност, ниска цена на компонентите и лесно интегриране на крайното устройство в съоръжения на открито, което го прави част от сензорна мрежа като модул.

Резултатите от изследванията в шеста глава могат да се обобщят както следва:

- Разработка и реализация на нискобюджетни мобилни сензорни системи за мониторинг на шум.
- Реализирана интелигентна сензорна система за разпределен мониторинг на шум, която е тествана на различни транспортни средства и обекти - гари и спирки на обществения транспорт.
- Реализация в средата на LabVIEW на виртуална система за определяне на психоакустични параметри в урбанизирани среди.
- Системата позволява получаване не само на добре познати и широко използвани акустични параметри за количествено определяне на шума, като нивото на звуковото налягане, но и допълнителна информация, като широко приетите в литературата психоакустични величини, които пряко се отнасят до човешкото възприятие на звука. По-подробна информация дава възможност да се идентифицират по-лесно основните източници на шум, особено на специфични локации - така наречените „точки, представляващи интерес“, където преминават много хора.
- Разработка и реализация на мултисензорни системи за измерване на вибрации и мониторинг на технически обекти.
- Предложен е съвременен подход за получаване на основни параметри за мониторинг на състоянието на асансьори. Описаната схема за обработка на сигналите на неинвазивната автономна сензорна система е интегрирана в различни видове асансьори и работоспособността ѝ е проверена чрез различни полеви тестове. Въз основа на получените данни може да се приложи прогнозна поддръжка и да се намали времето за престой. Предвижда се системата да бъде разширена с допълнителни функции и да бъде свързана със софтуерна среда за обработка, за да се даде възможност за определяне на качеството на возене, съгласно стандарт ISO 18738-1 (Standard ISO 18738, 2012).

7 РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ НА СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ ЗА ЛОКАЛИЗАЦИЯ И КАРТОГРАФИРАНЕ

Автономните системи могат да бъдат разгледани като клас киберфизични системи, характеризиращи се с интегрирането на вградени компютри и физични компоненти, които са свързани помежду си и се контролират от сложен софтуер. Тези системи проявяват различно поведение в зависимост от каналите за комуникация с външната среда.

7.1 Методи за локализация и картографиране

Едновременно локализиране и картографиране (SLAM)

SLAM включва едновременна оценка на състоянието на робот, оборудван с бордови сензори, и изграждане на модел (карта) на възприеманата от тези сензори среда.

SLAM се състои от паралелно изграждане на модел на средата (карта) и оценка на положението на робота/обекта, който се движи в нея. През последните 30 години в областта на технологиите SLAM е постигнат значителен напредък, което дава възможност за широкомащабни приложения в реалния свят и позволява стабилен преход на тези технологии към промишлеността. Методът се занимава с проблема за едновременна оценка на позицията на робот или сензор в непозната среда, като същевременно постепенно се създава карта на средата. Използваните сензори най-често са енкодери на колела, IMU, LiDAR или камери. Съществуват три основни парадигми, използвани за решаване на SLAM проблеми, които използват различни подходи:

- EKF-SLAM, базиран на разширения филтър на Калман;
- FastSLAM, базиран на филтър за частици;
- Graph-SLAM, който решава проблеми SLAM чрез нелинейни методи за оптимизация.

Поради голямото разнообразие от нелинейни методи за оптимизация и разделянето на две основни части: „фронт-енд“ и „бек-енд“, Graph-SLAM се е наложил като един от най-популярните и ефективни подходи от 2010 г. насам (Siciliano & Khatib, 2016).

7.2 Сензорни системи за едновременна локализация и картографиране

Експериментална постановка за оценка на алгоритми за SLAM

Представена е реализацията и настройката на експериментална автономна платформа и нейното използване за оценка на алгоритми за *едновременна локализация и картографиране* (Фиг. 7.4).

Сравнени са два принципно различни подхода. Оценен е т.нар. локален метод, базиран на съпоставяне на облака от точки, получен от LiDAR, и интегриране на инерционни измервателни единици. Последващото съпоставяне прави възможно създаването на триизмерен облак от точки, който може да се използва като карта при последващи навигации. Вторият подход е т.нар. пълен SLAM алгоритъм, базиран на графови релаксационни модели, включващ пълния набор от сензори - одометрия, инерционни сензори и данни от 3D лазерно сканиране.



Фиг. 7.4. Платформа Husky с допълнителен процесор и базова станция (преносим компютър).

Сензори

Сателитната навигация не е подходяща за използване в промишлени сгради, минно дело, гори или гъсто застроени градски райони. Тъй като голям брой автономни приложения са разположени в тези среди, съвременните мобилни системи са оборудвани с комбинация от външни сензори - за възприемане на околната среда, и вътрешни сензори - за определяне на текущото състояние. Карта, създадена или вече съществуваща по време на изпълнение, също може да се интерпретира като допълнителен сензор, често наричан виртуален сензор. Сливането на сензорните данни на всички системи накрая води до точното позициониране на системата.

Всички компютри работят под операционна система Linux Ubuntu. Комуникацията се осъществява чрез TCP/IP протоколи.

Обобщение на различните качествени критерии е представено в Таблица 7.1.

Таблица 7.1. Качествени критерии за алгоритми SLAM

Критерии	LOAM 3D SLAM	Cartographer 2D SLAM	Cartographer 3D SLAM
Тип карта	3D облак от точки	2D мрежа на заетост	2D мрежа на заетост
Изчислителна сложност	ниска	висока	много висока
Устойчивост	много висока	много висока	висока
Сложност на сензорната система	LiDAR	LiDAR, IMU, одометрия	LiDAR, IMU
Последваща използваемост на картата	не	да	да

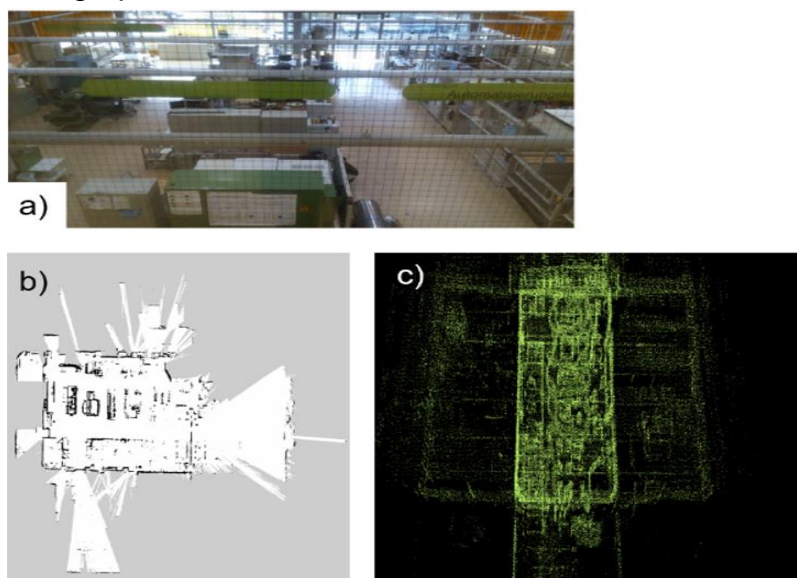
Първо са избрани типични сценарии за приложение на мобилни роботизирани системи. Пътуването в рамките на университетската сграда отразява използването в офис сгради или поддръжка в болници. Университетските лаборатории за металорежещи машини и автоматизация са използвани за оценка в индустриална среда. Накрая е тествано движение в открита среда, която предлага само няколко ориентира за 2D системи и симулира използването в неструктурирана среда за полева роботика. Във всеки сценарий са извършени пътувания с различна дължина, като се извършва връщане или многократно преминаване в едни и същи точки, които представляват интерес. Тези пътувания са означени като циклични, но трябва да се вземе под внимание, че Cartographer SLAM може да използва затваряне на цикли, но не и метода

LOAM. Количествените резултати са показани в Таблица 7.2. Показано е относителното отклонение на началната и крайната точка в посока X и Y на картата.

Таблица 7.2. Количествено оценяване на алгоритми SLAM

Сценарии	Изминато разстояние, m	LOAM 3D SLAM		Cartographer 2D SLAM		Cartographer 3D	
		Грешка X, %	Грешка Y, %	Грешка X, %	Грешка Y, %	Грешка X, %	Грешка Y, %
На закрито, късо	61	0,08	0,43	0,03	0,02	0,54	0,13
На закрито, дълго	475	0,18	0,24	0,48	0,18	0,23	0,14
Дълъг контур на закрито	500	0,07	0,27	0,41	0,06	0,15	0,2
Къс контур, индустриална среда	50	1,22	0,14	0,6	0,04	0,24	0,01
Индустриална среда 2 контура	115	0,24	0,04	0,18	0,02	0,01	0,16
На открито, късо	75	0,31	0,11	0,64	0,65	0,11	0,21
На открито, дълго	500	0,03	0,1	0,24	0,14	0,18	0,33

Примерни резултати за индустриален сценарий и за сценарий на открито са показани на Фиг. 7.6.a)-c). Показани са примерно видео изображение, генерираната карта на облака от точки LOAM и растерната карта, генерирана в Cartographer-2D.

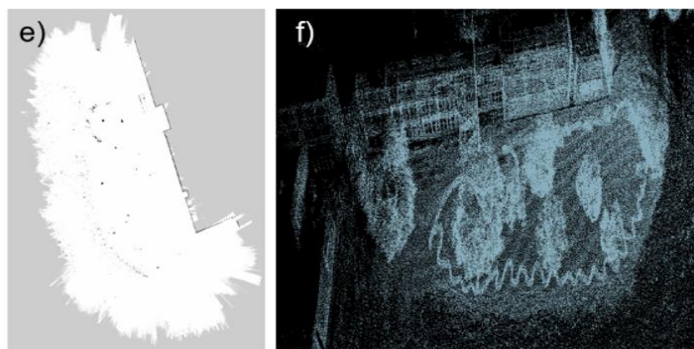


Фиг. 7.6. Примерен резултат от оценката на сценария в индустриална среда с (a) видео изображение, (b) 2D карта на Cartographer и (c) LOAM 3D карта с облак от точки

Резултатите показват, че Cartographer SLAM е малко по-добър от метода LOAM по отношение на точността. Предимството на метода LOAM, от друга страна, е високата скорост на обработка и възможността за лесно получаване на относителна локализация. В неструктурирани зони с малко ориентири 3D методите дават по-добри резултати в сравнение с 2D методите.

Най-голямото системно предимство на Cartographer SLAM е създаването на растерна карта, която служи като директен вход за последващата навигация на робота и в която могат да се използват утвърдени методи.

От друга страна, 3D облакът от точки на метода LOAM осигурява визуално атрактивно представяне на навигираната област, което обаче трябва да се запази за последващо локализиране. Навигацията е по-трудна за движещи се системи поради липсата на индикатори, например проходим терен, но е достатъчна за откриване на препятствия за летящи роботи, като например дронове. Резултати от оценката на сценария на открито е дадена на Таблица 7.2.



Фиг. 7.7. Примерен резултат от оценката на сценария на открито с (d) видео изображение, (e) карта с Cartographer 2D и (f) карта с облак от точки с LOAM 3D

7.3 Реализация на визуално-инерциални системи

В дисертационния труд е разработен нов подход за синхронизиране и калибриране на камера и инерционен измервателен модул (IMU) в ориентираната към изследвания визуално-инерционна рамка за картографиране и локализиране Matlab. Картографирането и локализирането се основава на откриването на различни характеристики в околната среда. В допълнение към възможността за създаване на карти при единично преминаване, разгледаните алгоритми позволяват обединяване на карти за повишаване на точността на картографиране и получаване на широкообхватни карти. При това алгоритмите могат да се използват за оптимизиране на събраните данни. Предварителните резултати показват, че след подходящо калибриране и синхронизиране Matlab може да се използва ефективно за картографиране, особено в помещения и среда на малки сгради. Влиянието върху различни фактори, предизвикано от процеса на оптимизация, е обобщено в Таблица 7.4.

Таблица 7.4. Процес на оптимизация при картографиране с роботизирана платформата

Свойство	Преди оптимизацията	След оптимизацията	Промяна, %
Брой на върховете	2302	329	-85,70
Брой ориентири	63831	38219	-40,12
Брой наблюдения	641042	87954	-86,27
Брой кантове на IMU	2301	328	-85,74
Изминато разстояние, <i>m</i>	230,49	181,08	-21,44
Потребност от памет на картата VI, <i>MB</i>	43,8	8,9	-79,68

7.4 Система за откриване и проследяване на обекти с БЛА

Възможността за автономно летене без човешка намеса позволява използването на безпилотни средства във все по-сложни среди и сценарии, като например прецизно земеделие, наблюдение за военни и промишлени приложения или логистика. Те се използват и за широкомащабен екологичен мониторинг.

Откриване на обекти

Откриването на обекти е техника за компютърно зрение. Тя може да се използва за идентифициране и локализиране на обекти в рамките на изображение или видеоклип. Откритите обекти се маркират с ограничителна рамка. Това позволява на потребителите да определят къде са разположени обектите в кадъра. Най-важните параметри на измерването са точността и скоростта. Откриването на обекти осигурява основа за по-нататъшни задачи на компютърното зрение, особено за сегментиране, разпознаване на изображения и проследяване на обекти.

Реализация

Структура на системата и комуникация

На първия етап от изпълнението беше определена основната архитектура на системата. Единственият критерий тук беше модулната структура на компонентите. Системата и отделните модули трябва да бъдат лесно разширяеми и взаимнозаменяеми. Системната архитектура на работата се основава на модела клиент-сървър. Сървърът играе ролята на междинен софтуер.

Между сървъра и безпилотния обект трябва да има постоянна комуникация. Комуникацията се осъществява чрез Wi-Fi мрежа, която се създава от безпилотния апарат. Устройството, на което е инсталиран сървърът, може да се свърже с тази мрежа. На Фиг. 7.16 е показан преглед на комуникацията между клиента-сървър и безпилотния апарат. Комуникацията чрез Wi-Fi е особено подходяща, тъй като в днешно време почти всички крайни устройства могат да използват тази технология. Това означава, че безпилотният апарат може да се управлява от много различни устройства. Безпилотният апарат се управлява от SDK Olympe. За да се изпратят команди към дрона, трябва да се изпрати съобщение за връзка от сървъра след свързване към Wi-Fi мрежата. Ако то бъде прието от безпилотния апарат, никое друго устройство не може да изпраща команди.



Фиг. 7.16. Общо описание на комуникацията между клиента-сървър и дрона

Комуникацията между клиента и сървъра се осъществява основно чрез REST интерфейс. Всички основни команди за управление на безпилотния апарат се изпращат от клиента към сървъра чрез този интерфейс. Те включват например стартиране и спиране на безпилотния апарат, изчисляване на данните за полета и включване и изключване на видеопотока. След успешно изпълнение сървърът изпраща потвърждение на клиента. Освен това е осигурена двупосочна

комуникация чрез уеб портове. Това позволява да се обменят допълнителни асинхронни съобщения. Тази комуникация се използва за обявяване на позициите на откритите обекти.

Редът на извикване на интерфейса е от решаващо значение. Промяната на реда не е позволена в този случай и би довела до прекъсване на комуникацията. Обработката на грешки не се разглежда в този пример. Първо се установява връзка с безпилотния самолет. В същото време клиентът се свързва с уеб порта на сървъра. Впоследствие данните могат да бъдат предадени към зоната за наблюдение.

След изчисляване на маршрута на полета безпилотния апарат може да бъде стартиран. Може да се реши дали да се показва потокът на живо от дрона. По време на прелитането на безпилотния апарат местоположението на откритите обекти се публикува чрез комуникационния канал на уеб порта. След приключване на полета се връща и преглед на откритите обекти. В него са посочени класовете и съответният брой открити обекти към съответния клас. В последната стъпка се извършва приближаване към избраната цел.

7.5 Картографиране с магнитни сензори

Разглежда се приложимостта на характеристиките на локалните магнитни полета за по-точно определяне на местоположението на субекти и/или обекти в закрити помещения, например железопътни гари, летища, изложбени зали, шоуруми или търговски центрове. Направено е проучване, за да се установи дали и как нискобюджетни сензори за магнитни полета и мобилни роботизирани платформи могат да се използват за създаване на карти, които подобряват точността и надеждността на по-късната навигация със смартфони или други устройства.

На Фиг. 7.24 е показан използваният робот и експерименталната уредба с компютър и сензор за магнитно поле и IMU.



Фиг. 7.24. Платформа за мобилен робот (вляво) и експериментална уредба, комбинирана със сензор за магнитно поле IMU (вдясно)

Изследването показва, че Гаусовата регресия е напълно подходяща за създаване на пълна и използвана карта (на непрекъснати характеристики) от отделни измервания. Създадените карти са достатъчно подробни. Предимствата в сравнение с по-евтините методи се състоят в лесното интегриране на нови

измервания, наличието на мярка за качество под формата на ковариационна матрица и, въз основа на това, естественото интегриране в стохастични методи за локализация. Моделирането също така позволява въвеждане на гранични условия и познания за модела. Всичко това обаче е за сметка на обширни изчисления.

Картите са създадени с разделителна способност от 5 cm, като потенциалът за точност на позициониране е в рамките на няколко дециметра до метри, което вече е достатъчно за непрекъснатото усъвършенстване и коригиране на дрейфа на инерциалните сензори.

7.6 Обобщения и изводи по глава 7

В глава 7 е представена разработката на различни сензорни системи за едновременна локализация на обекти и картографиране на среди на открито и закрито.

Едната система е за тест и оценка на сложни процедури за локализация и картографиране. Разработените подходи са подходящи за надеждна локализация при сложни сценарии, например в индустриална среда, проучване и наблюдение в полевата роботика и приложения в сервизната роботика.

Втората система е SLAM система, базирана на 3D LiDAR устройства. В изследването е показано, че софтуерният пакет *hdl_graph_slam* с отворен код за SLAM в реално време, в комбинация с LiDAR OS1 от Ouster и алгоритмите за съвпадение на сканирането FAST_GICP и FAST_VGICP, постигат много добри резултати при картографиране.

Реализацията на визуално-инерциални системи е друг резултат от изследванията в тази глава.

Въз основа на положителните резултати при картографиране на открито, може да се твърди, че софтуерният продукт *marlab* е подходящ за използване не само в сградни комплекси, но и за картографиране на зони извън тях.

В резултат на изследванията и въз основа на опита, натрупан при работата с *marlab*, са разработени различни сценарии за приложение. Една от възможностите е автоматичното следване на предварително програмирани траектории в сгради.

Разработката на *система за проследяване с БЛА* показва, че е възможно реализирането на приложение за откриване и позициониране на обекти в реално време.

Изследването показва, че Гаусовата регресия е подходяща за създаване на пълна и *използваема карта в резултат на измервания на магнитното поле* в помещения. Създадените карти са достатъчно подробни.

Картите са създадени с разделителна способност от 5 cm, като потенциалът за подобряване на точността на позициониране е в рамките на няколко дециметра до метри, което вече е достатъчно за непрекъснатото усъвършенстване и коригиране на дрейфа на инерционните сензори.

Резултатите в седма глава и получените от тях резултати могат да се обобщят както следва:

- Разработени и реализирани са сензорни системи за едновременна локализация и картографиране (SLAM).

- Реализиране и настройка на експериментална автономна платформа и нейното използване за оценка на *алгоритми за едновременно локализиране и картографиране*.
- Разработени са различни тестови сценарии за оценка на алгоритмите. Сценариите за изпитване съответстват на обичайни ситуации за основни приложения.
- Реализация в средата matlab на визуално-инерционна сензорна система за картографиране и локализиране, която използва подход за синхронизиране и калибриране на камера и инерционен измервателен модул (IMU).
- Реализация на система, базирана на конволюционни невронни мрежи за навигация и картографиране. Системата е монтирана в автомобил, проектиран и конструиран в съответствие с изискванията на правилата на Eco Marathon - автономно шофиране и тествана в реални условия.
- Реализиране и тестване на система за откриване и позициониране на обекти с помощта на БЛА. Доказана е ефективността на системата и нейните възможности да открива статични обекти в реално време и да определя позициите им с висока степен на точност.

Реализирана е система за картографиране с магнитни сензори. Изследвана е приложимостта на характеристиките на локалните магнитни полета за по-точно определяне на местоположението на субекти и/или обекти в закрити помещения. Резултатите показват, че нискобюджетни сензори за магнитни полета и мобилни роботизирани платформи могат да се използват за създаване на карти, които подобряват точността и надеждността на навигацията на закрито.

8 ЗАКЛЮЧЕНИЕ, ПРИНОСИ

8.1 Заключение

Дисертационният труд, посветен на интелигентни сензорни системи за мониторинг на околната среда, съдържа обстоен преглед на проблематиката, технологиите и методологиите, свързани с повишаването на знанието и компетенциите при оценката, регистрирането и откриването на различните видове екологични замърсители в градски условия.

Целите и задачите на изследването включват проучване на нови подходи, методи и алгоритми за подобряване на качеството на данните, получени от нискобюджетни сензорни системи и IoT устройства при мониторинга на околната среда. В този контекст дисертационният труд представя решение на основната задача за анализ на точността на сензорните данни и нови методи за нейното подобряване, приложими за нискобюджетните сензорни системи и интелигентни сензорни системи, базирани на тях, които са тествани чрез прототипи, обработващи данни на базата на машинно обучение. Предложени са методи за повишаване на точността на сензорните данни и са представени резултатите от различни експерименти и реализации.

В Увода на дисертационния труд е показана важността на предмета на изследването и са разгледани основните проблеми, които са в основата на провеждането му. Направена е извадка заедно със съответния анализ на ключови термини и понятия, използвани в областта, необходими за по-голяма яснота и прецизност в изложението.

Във втората глава е направен обзор на текущото състояние на изследваната област, представени са съществуващите сензорни технологии, директивите на Европейския съюз относно мониторинга на околната среда и основите за оценка на качеството на въздуха, водата, почвата и за нивата на шумово замърсяване. Набелязани са задачите, които определят основните цели на дисертационния труд.

Третата глава се фокусира върху теоретичната рамка за повишаване на точността на данните при широкомащабно наблюдение на околната среда. Предложени са методи за калибриране на сензори на базата на оценка на техните метрологични параметри с цел подобряване на качеството на данните от сензорите. Разработени са методи за линеаризиране на предавателните характеристики на сензори и калибриране на сензорни устройства за увеличаване на надеждността на данните. Чрез включването на разработените ключови методи в теоретичната рамка за мониторинг на околната среда се постига повишаване на точността, надеждността и ефективността на сензорните данни в широкомащабни приложения за мониторинг на околната среда. Предложената методология е ефективен инструмент за оптимизиране и усъвършенстване на възможностите на интелигентните сензорни системи за мониторинг на околната среда.

В четвъртата, петата и шестата глава подробно са представени и коментирани резултатите от разработването и внедряването на сензорни системи за мониторинг на качеството на въздуха, качеството на водата, замърсяването на почвата и шумовото въздействие. Показан е процесът на проектиране и тестване на мултисензорни системи за наблюдение на различни параметри на околната среда в градска и жилищна/работна среда. В дисертационния труд се акцентира върху използването на интелигентни сензорни модули за онлайн наблюдение и

картографиране за нуждите на мониторинга в труднодостъпни райони с помощта на безпилотни автоматизирани системи.

Глава седма е посветена на системите за локализиране и картографиране, използвани за документиране на резултатите от широкомащабния мониторинг. Анализирани са възможностите за използване на безпилотни автоматизирани системи (дронове и автономни мобилни системи) при реализирането на тези процеси и са представени подходи за обработка на получените данни с помощта на изкуствен интелект с цел подобряване и повишаване на пространствената и времева разделителна способност.

Като цяло, дисертационният труд представя комплекс от методологии и технологии за подобряване на качеството на данните при мониторинга на околната среда. В основата са заложили разработването на иновативни сензорни системи и използването на усъвършенствани алгоритми за подобряване на мониторинга на качеството на въздуха, качеството на водата, замърсяването на почвата и шумовото замърсяване в градска среда. Представеното изследване стимулира разработката на нови интелигентните сензорни системи за мониторинг на околната среда и поставя основата за бъдещи изследвания в тази област.

8.2 Приноси в дисертационния труд

Научни приноси

Научните приноси са свързани със **създаване на нови методи (подходи) и алгоритми**.

1. Предложени са нов адаптивен алгоритъм и обобщен подход за линейно апроксимиране на сензорни характеристики и за линейна интервална апроксимация, с които се решава задачата за линеаризация на сензорни характеристики, представляващи диференцируеми функции с постоянен знак на кривината. Новост е гарантирането на зададено ниво на грешката от линеаризация.
2. Предложен е иновативен подход за полигонална апроксимация на несамопресичащи се сензорни предавателни функции, зададени в точков или аналитичен вид.
3. Обосновани са две алтернативни нелинейни оптимизационни задачи, възникващи при полилинеаризацията и е предложен подход за оценка на шумови параметри на сензори и на методи и алгоритми за повишаване точността на сензорни данни.
4. Предложени са нови методи за локализация и откриване на обекти и числени алгоритми за калибриране и повишаване на точността на устройства за екологичен мониторинг.
5. Предложен е нов стохастичен подход за оценка на шумови параметри на сензори и на методи и алгоритми за повишаване точността на сензорни данни, които се основават на използването на Средно-квадратично отклонение на Алън (СКО).

Научно-приложни приноси

1. Разработена е експериментална постановка за изследване на филтри на Калман, свързани със сливането на данни и оценка на ефективността им и са предложени методи за краткосрочно прогнозиране на облачно покритие и възможностите за прогнозиране на добива на енергия от фотоволтаични централи;

2. Разработени са система за навигация, реализирана на базата на конволюционни невронни мрежи за автономно шофиране и система за откриване и проследяване на обекти с използване на безпилотни летателни апарати, която е реализирана на базата на детектора YOLO;
3. Разработени са интелигентни сензорни системи за мониторинг на параметри на въздух, питейна вода, почва и на шум в урбанизирани среди.
4. Разработени са мултисензорни системи и мащабируеми мобилни сензорни системи за мониторинг на основни параметри на въздуха на базата на нискобюджетни сензори и контролери с ограничени изчислителни ресурси.
5. Разработени са сензорни системи за изследване на специфичните параметри на въздуха на закрито.
6. Разработени са сензорен модул, който позволява лесна интеграция на устройството в изследвани среди, и система за оценка на качеството на водна среда на базата на колориметрични методи.
7. Разработени са сензорна система за измерване на влажността на почвата и мултисензорна система за мониторинг в областта на земеделието.
8. Разработени са мобилни безжични системи за измерване и картографиране на основни шумови параметри.
9. Предложени са подходи за сливане на сензорни данни с използването на акселерометри и са реализирани сензорни системи, използващи вградено машинно обучение.
10. Реализирана е експертна система за диагностика на неизправностите в металорежещи машини с цифрово управление и е предложена индустриална платформа за IoT.
11. Реализирани са сензорни системи за едновременна локализация и картографиране, използващи инерциални модули, одометрия, 3D LiDAR и визуална система, използващи сливане на данни за подобряване на точността при локализация.
12. Предложен е подход за използване на магнитни сензори за картографиране на помещения.

8.3 Списък на публикациите по дисертационния труд

Структурата на публикациите по дисертационния труд е следната.

Общият брой публикации е 64, от които 49 са в реферирани и индексирани в световно известни бази данни с научна информация, а 15 са в не реферирани списания и конференции с научно рецензиране.

Четири от публикациите са самостоятелни, като три са в български списания и една е на международна конференция.

Останалите 60 публикации са в съавторство и включват: един учебник, 40 са представени на международни конференции, от които 32 са реферирани в Scopus и/или WoS, 5 са глави от книги, 19 са в списания, от които 12 са в международни списания с импакт фактор и/или импакт ранг, реферирани и индексирани в базите данни Scopus и/или WoS.

С оглед анализ и оценка на получената публичност на предложения дисертационен труд, може да се отбележи, че към декември 2023 в Scopus са забелязани над 280 цитирания (без автоцитати) на авторски публикации.

Съществуват цитирания и в други бази данни (например Google Scholar >500, Researchgate >400).

2004

- A1. **M. Marinov**, T. Djamiykov, I. Topalov, V. Zerbe, Remote Machine Condition Monitoring Based on Wireless Connectivity. Proc. 13th International Scientific and Applied Science Conference - ELECTRONICS 2004, Sozopol, 22. - 24.09.2004, Vol. 2, pp. 76 - 81.

2005

- A2. **M. Marinov**, S. Dimitrov, T. Djamiykov, S. Ovcharov, V. Zerbe, An Adaptive Linearization Approach for Intelligent Sensor Devices, Proc. 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (IWK), Ilmenau, Germany, 19. – 23.09.2005, pp. 303-310.

2009

- A3. **M. Marinov**, G. Nikolov, P. Logofetova – Trifonova, Intelligent Sensor System for Air Quality Monitoring, Annual Journal of Electronics, v.3 Number 1, ISSN 1313-1842, pp. 164-167, Sofia, 2009.

2010

- A4. **М. Маринов**, Г. Николов, П. Логофетова-Трифенова, Мултисензорен модул за мониторинг на параметри на въздуха в затворени помещения, Електроника 2010, ISSN 1313-3985 (print), (CD) 954-90209-3-3 (2006).

2013

- A5. **M.B. Marinov**, G.T. Nikolov, T. Djamiykov, S. Hensel, "Accuracy improvement of CO2 concentration measurement". Annual Journal of Electronics, 2013, ISSN 1314-0078, p. 128 – 131.

2015

- A6. **M.B. Marinov**, „Mobile Multisensor Node for Monitoring Environmental Parameters in Urban Areas“, Electrotechnica & Electronica, E+E, Vol. 50. No 7-8/2015, p. 19–25, ISSN 0861-4717.

2016

- A7. (Scopus) **M.B. Marinov**, I. Topalov, E. Gieva, G. Nikolov, Air Quality Monitoring in Urban Environments. 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 18-22 May 2016, Pilsen Czech Republic, pp. 443-448, ISSN: 2161-2528, DOI: [10.1109/ISSE.2016.7563237](https://doi.org/10.1109/ISSE.2016.7563237). SJR 0,148, (<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100338720&tip=sid&clean=0>)
- A8. (Scopus) G. Nikolov, E. Gieva, B. Nikolova, **M.B. Marinov**. Virtual Colorimeter for Water Analysis Proc. XXV International Scientific Conference Electronics - ET2016, September 12 - 14, 2016, Sozopol, Bulgaria, pp. 139-142, ISSN: 2161-2528, DOI: [10.1109/ET.2016.7753471](https://doi.org/10.1109/ET.2016.7753471).

2017

- A9. (Scopus) **M.B. Marinov**, D. Nikolov, B. Ganev, G. Nikolov, Environmental Noise Monitoring and Mapping, 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 10-14 May, 2017, Sofia, Bulgaria, pp. 1-7, ISSN: 2161-2528, DOI: [10.1109/ISSE.2017.8000992](https://doi.org/10.1109/ISSE.2017.8000992). SJR 0,136.
- A10. (Scopus) G. Nikolov, **M.B. Marinov**, I. Ruskova, E. Gieva, Virtual System for Analysis of Treated Water, 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 10-14 May, 2017, Sofia, Bulgaria, pp. 1-6, ISSN: 2161-2528, SJR 0,136.
- A11. **M.B. Marinov**, "Design of Mobile Noise Monitoring System," Proceedings of Technical University Sofia, vol. 67, no. 3, pp. 113-122, 2017, ISSN 1311-0829.
- A12. **M.B. Marinov**, "Mobile Noise Monitoring System - Software Design and Experimental Results," Proceedings of TU Sofia, vol. 67, no. 3, pp. 123-132, 2017, ISSN 1311-0829.

2019

- A13.** (Scopus, IF) S. Hensel, **M.B. Marinov**, R. Schwarz, Ivan Topalov, Ground Sky Imager Based Short Term Cloud Coverage Prediction. FABULOUS 2019 - 4th EAI International Conference on Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures March 28-29, 2019, Sofia, Bulgaria, doi: 10.1007/978-3-030-23976-3_33. SJR 0,15, Q4.
- A14.** (Scopus) **M.B. Marinov**, **I. Topalov**, B. Nikolova, G. Nikolov and T. Djamiykov. Smart Multisensor Node for Environmental Parameters Monitoring in Urban Areas, Proc. X National Conference with International Participation Conference "Electronica 2019", May 16 - 17, 2019, Sofia, Bulgaria, pp. 1-4.
- A15.** (Scopus) **M.B. Marinov**, Dimitar Iliev Iliev, Todor Stoyanov Djamiykov, Ivan Vladimirov Rachev, Katya Konstantinova Asparuhova, Portable Air Purifier with Air Quality Monitoring Sensor, Proc. XXVII International Scientific Conference Electronics – ET2019, Sept. 12 – 14, 2019, Sozopol, Bulgaria, ISBN: 978-153866692-0.
- A16.** (Scopus) **M.B. Marinov**, I. Topalov, B. Ganev, E. Gieva, V. Galabov, UAVs Based Particulate Matter Pollution Monitoring, Proc. XXVII International Scientific Conference Electronics – ET2019, September 12 – 14, 2019, Sozopol, Bulgaria, ISBN: 978-153866692-0.
- A17.** (Scopus) S. Hensel, **M.B. Marinov**, F. Sprich, B. Ganev, Image-Based Automated Hit Detection and Score Calculation on a Steel Dartboard, Balkan Light 2019, September 20 – 22, 2019, Plovdiv, Bulgaria, ISBN: 978-153866730-9.
- A18.** S. Hensel, **M.B. Marinov**, F. Sprich, Automated Acoustic Hit Detection and Score Calculation on a Steel Dartboard, Proceedings of the 9th FDIBA Conference - Challenges of the Digital World, Sofia, Bulgaria, 28–29 November 2019, Vol. 5, 2019, pp. 75-78, ISSN 2535-132X.
- A19.** S. Hensel, **M.B. Marinov**, M. Schmitt, Experimental Setup for Investigation and Evaluation of a Mapping and Localization System, Proceedings of the 9th FDIBA Conference - Challenges of the Digital World, Sofia, Bulgaria, 28–29 November 2019, Vol. 5, 2019, pp. 81-84, ISSN 2535-132X.

2020

- A20.** (Scopus) D.N. Nikolov, **M.B. Marinov**, B.T. Ganev, T.S. Djamiykov, Nonintrusive Measurement of Elevator Velocity Based on Inertial and Barometric Sensors in Autonomous Node, 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 10-14 May 2020, Demanovska Valley - Slovakia, pp. 1-5, ISSN: 2161-2528.
- A21.** (Scopus) **M. B. Marinov**, D. N. Nikolov, B. T. Ganev and T. S. Djamiykov, "Smart Multisensor Node for Remote Elevator Condition Monitoring," 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA49118.2020.9167049, SJR 0,12(2019).
- A22.** (Scopus, IF) S. Hensel, **M.B. Marinov**, C. Kehret, M. Stefanova-Pavlova, (2020) Experimental Set-up for Evaluation of Algorithms for Simultaneous Localization and Mapping..) EuroSPI 2020. Communications in Computer and Information Science, vol 1251. Springer, Cham, pp. 433-444. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56441-4_32, ISSN 1865-0929, IF 0.49, SJR 0,19(2019), Q3.
- A23.** (Scopus) J. Peng, G. Michael, A. Kimmig, **M.B. Marinov**, J. Wang, and J. Ovtcharova, "An Advanced IoT Platform and its Implementations Focused on Modern Information Technology Generation," 2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305135, SJR 0,11(2020).
- A24.** (Scopus) B. Ganev, D. Nikolov and **M.B. Marinov**, "Performance Evaluation of MEMS Pressure Sensors," 2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305140, SJR 0,11(2020).
- A25.** (Scopus) S. N. Yaryshev, L. Li, **M.B. Marinov** and T. S. Djamiykov, "Development of a Digital Camera-Based Method for Bridge Deformation Measurement," 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET50336.2020.9238322. (<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9238322>).
- A26.** (Scopus) **M.B. Marinov**, "In-situ Calibration of Networked Air-Quality Sensor Nodes," 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi:

10.1109/ET50336.2020.9238168. (<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9238168>), **SJR 0,11(2020)**.

- A27.** (Scopus) D. Nikolov, B. Ganev, **M.B. Marinov** and N. Nikolov, "Smart Sensor Node for Distributed Noise Monitoring," 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET50336.2020.9238169, **SJR 0,11(2020)**. (<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9238169>)
- A28.** (Scopus) S. Hensel, **M.B. Marinov**, and M. Schmitt, "System Setup for Synchronized Visual-Inertial Localization and Mapping," 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET50336.2020.9238295, **SJR 0,11(2020)**. (<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9238198>)

2021

- A29.** (Scopus) **M.B. Marinov**, B.T. Ganev and D.N. Nikolov, "Indoor Air Quality Assessment Using Low-cost Commercial Off-the-Shelf Sensors," 2021 6th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/EFEA49713.2021.9406260.
- A30.** (Scopus, IF) E. Grigorov, B. Kirov, **M.B. Marinov**, V. Galabov, Review of Microfluidic Methods for Cellular Lysis. *Micromachines* 2021, 12, 498. <https://doi.org/10.3390/mi12050498>, **IF 2.523, SJR 0,58, Q2**.
- A31.** (Scopus, IF) S. Hensel, **M.B. Marinov**, M. Schmitt (2021) **Object Detection and Mapping** with Unmanned Aerial Vehicles Using Convolutional Neural Networks. In: Perakovic D., Knapcikova L. (eds) *Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures. FABULOUS 2021. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol. 382. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78459-1_19.
- A32.** (Scopus, IF) S. Hensel, **M.B. Marinov**, T. Schwikl, D. Nikolov (2021) Application of Gaussian Process Estimation for Magnetic Field Mapping. In: Perakovic D., Knapcikova L. (eds) *Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures. FABULOUS 2021. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol 382. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78459-1_21.
- A33.** (Scopus, IF) M. Grethler, **M.B. Marinov**, V. Klumpp (2021) Embedded Machine Learning for Machine Condition Monitoring. In: Perakovic D., Knapcikova L. (eds) *Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures. FABULOUS 2021. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol 382. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78459-1_16.
- A34.** (Scopus) (18M) B. Ganev, **M.B. Marinov**, D. Nikolov, and A. Ivanov, "High-resolution Particulate Matter Monitoring and Mapping in Urban Environments," 2021 12th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513728.
- A35.** (Scopus) B. Ganev, T. Djamiykov, **M.B. Marinov** and K. Asparuhova, "Experimental Setup for Performance Evaluation of Optical Sensors," 2021 12th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513663.
- A36.** (Scopus) M. Grethler, **M.B. Marinov** and J. Ovtcharova, "Analysis and Design of Intelligent Signal Processing Strategies," 2021 12th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513665.
- A37.** (Scopus, IF) S. Hensel, **M.B. Marinov**, M. Koch, D. Arnaudov, Evaluation of Deep Learning-Based Neural Network Methods for Cloud Detection and Segmentation. *Energies* 2021, 14, 6156. <https://doi.org/10.3390/en14196156>, **IF 3,004, SJR 0,6, Q2**.
- A38.** (Scopus) G. Michael, J. Peng, **M.B. Marinov**, and J. Ovtcharova, "Research on Fault Diagnosis Expert System of CNC Machine Tool Based on Expert Knowledge," 2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET52713.2021.9579568.
- A39.** (Scopus) R. Khlynov, V. Ryzhova, S. Yarishev, I. Konyakhin, T. Djamiykov and **M.B. Marinov**, "Optoelectronic Methods for Non-invasive Analysis of Hematocrit Level," 2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ET52713.2021.9579776.
- A40.** (Scopus) B. Ganev, A. Ivanov, **M.B. Marinov**, N. Nikolov and L. Kochev, "Pendulum Experimental Study and Analysis with MEMS Accelerometer," 2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET52713.2021.9579906.

- A41. (Scopus) S. Hensel, **M.B. Marinov**, A. Seigel and B. Ganey, "Experimental Setup for Neural Networks and Camera-Based Navigation of Mobile Systems," *2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET)*, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ET52713.2021.9579521.
- A42. (Scopus) (19M) G.T. Nikolov, B.T. Ganey, **M.B. Marinov** and V.T. Galabov, "Comparative Analysis of Sensors for Soil Moisture Measurement," *2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET)*, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ET52713.2021.9580162.

2022

- A43. (Scopus, IF) **MT.B. Marinov**, N. Nikolov, S. Dimitrov, T. Todorov, Y. Stoyanova, G.T. Nikolov, Linear Interval Approximation for Smart Sensors, and IoT Devices. *Sensors* **2022**, 22, 949. <https://doi.org/10.3390/s22030949>, IF 3,576, SJR 0,64, Q2.
- A44. S. Hensel, **M.B. Marinov**, M. Obert, D. Trendafilov, Design and Implementation of a LIDAR Based Range Sensor System, Международна конференция Статистиката и машинното обучение в електрониката, 12-13 май, 2022, София, България, In: Marinov M., Hensel S., Ivanova M. (Eds.), *Complex Control Systems* 4(1), 2022, 16-21, ISSN: 2603-4697 (Online), URL: http://ir.bas.bg/ccs/2022/4_hensel.pdf.
- A45. (Scopus, IF 2,2) Nguyen, Cong T., Ruslan D. Khlynov, Victoria A. Ryzhova, Alexey A. Gorbachev, Sergey N. Yarishev, Igor A. Konyakhin, Todor S. Djamiykov, and **Marin B. Marinov**. 2022. "Calibration Methods of a Portable Polarizing System for Monitoring Optically Inhomogeneous Media" *Computation* 10, no. 8: 131, <https://doi.org/10.3390/computation10080131>, IF 2,2, CiteScore 3,3, SJR 0,389, Q2.
- A46. (Scopus, IF 2,2) S. Hensel, **M.B. Marinov**, M. Obert. 2022. "3D LiDAR Based SLAM System Evaluation with Low-Cost Real-Time Kinematics GPS Solution" *Computation* 10, no. 9: 154. <https://doi.org/10.3390/computation10090154>, IF 2,2, CiteScore 3,3, SJR 0,389, Q2.
- A47. (Scopus, IF) S. Hensel, **M.B. Marinov**, M. Schmitt, (2022). Evaluation of an Inertial and Optical Sensors Based Mapping and Localization System. In: Perakovic, D., Knapcikova, L. (eds) *Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures. FABULOUS 2022. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol 445. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15101-9_1 (SJR 0,19, Q4).
- A48. (Scopus) B. Ganey, H. Hristov, L. Laskov, A. Popov and **M.B. Marinov**, "Multi-sensor System for Monitoring in Agriculture," *2022 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA55578.2022.9874374.
- A49. (Scopus) Cong T. Nguyen; Ruslan D. Khlynov; Alexey A. Gorbachev; Victoria A. Ryzhova; Sergey N. Yarishev; Igor A. Konyakhin, Todor S. Djamiykov, **Marin B. Marinov**, "Determining the Focal Length of a Video Camera Using a Calibration Pattern," *2022 XXXI International Scientific Conference Electronics (ET)*, 2022, pp. 1-4, doi: [10.1109/ET55967.2022.9920285](https://doi.org/10.1109/ET55967.2022.9920285).
- A50. (Scopus, IF 2,2) V.P. Lazarenko, V.V. Korotaev, S.N. Yaryshev, **M.B. Marinov**, T.S. Djamiykov, Precision Calibration of Omnidirectional Camera Using a Statistical Approach. *Computation* **2022**, 10, 209. <https://doi.org/10.3390/computation10120209>, IF 2,2, CiteScore 3,3, SJR 0,389, Q2.
- A51. (Scopus, IF) R.D. Khlynov, V.A. Ryzhova, S.N. Yarishev, I.A. Konyakhin, V.V. Korotaev, Y.E. Shelepin, T.S. Djamiykov, **M.B. Marinov**, Analysis of Polarization Images in the Microphysical Blood Parameters Research for the Hematocrit Diagnostics. *Micromachines* 2022, 13, 2241. <https://doi.org/10.3390/mi13122241>, IF 3.523, SJR 0,58, Q2.
- A52. S. Hensel, **M.B. Marinov**, Christopher Kupitz, Dimitre Trendafilov, Experimental Setup for Testing and Evaluation of Kalman Filter Configurations, Proceedings of the 12th FDIBA Conference – Engineering 4.0 and The Internet of Everything, Sofia, Bulgaria, 24-25 November 2022, Vol. 8, 2022, pp. 61-64, ISSN 2535-132X.
- A53. S. Hensel, **M.B. Marinov**, C. Kupitz, D. Trendafilov, Evaluation of Kalman Filter Configurations for Robot Localization Using Sensor Data Fusion, Proceedings of the 12th FDIBA Conference - Engineering 4.0 and The Internet of Everything, Sofia, Bulgaria, 24-25 November 2022, Vol. 8, 2022, pp. 95-98, ISSN 2535-132X.

2023

- A54. (Scopus, IF) **M.B. Marinov**, N. Nikolov, S. Dimitrov, B. Ganey, G.T. Nikolov, Y. Stoyanova, T. Todorov, L. Kochev, Linear Interval Approximation of Sensor Characteristics with Inflection Points. *Sensors* **2023**, 23, 2933. <https://doi.org/10.3390/s23062933>, IF 3,847, SJR 0,64, Q2.

- A55.** (Scopus, IF) R.D. Khlynov, V.A. Ryzhova, V.V. Korotaev, S.N. Yarishev, T.S. Djamiykov, **M.B. Marinov**, Noninvasive polarization-based technique for hematocrit monitoring (2023) *Journal of Optical Technology* (A Translation of *Opticheski Zhurnal*), 90 (1), pp. 33 - 41, DOI: 10.1364/JOT.90.000033.
- A56.** D. Markov, E. Grigorov, B. Kirov, J.A. Denev, V. Galabov, **M.B. Marinov**, Low-Cost Three-Dimensionally - Printed Inverted Plug and Play Optical Instrument for Microfluidic Imaging. *Micro* 2023, 3, 537-548. <https://doi.org/10.3390/micro3020036>.
- A57.** (Scopus), S. Hensel, **M.B. Marinov**, R. Panter, D. Trendafilov, "Global Positioning of Optically Detected Objects with UAV" *2023 14th National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*, 2023, pp. 1-4.
- A58.** (Scopus) S. Hensel, **M.B. Marinov**, J. Fischer, "Optimization of Bowl Feeders Structure for Arbitrary Parts with Machine Learning," *2023 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Split/Bol, Croatia, 2023, pp. 1-4, doi: 10.23919/SpliTech58164.2023.10193444.
- A59.** (Scopus), S. Hensel, **Marinov, M.B.**; A. Dreher, D. Trendafilov, "Monocular Depth Estimation for Autonomous UAV Navigation Based on Deep Learning," *2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET)*, 2023, pp. 1-5.
- A60.** (Scopus) D.I. Iliev, **M.B. Marinov** Embedded System for E-Waste Recognition Using Computer Vision, *2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET)*, 2023, pp. 1-5.
- A61.** (Scopus) D.I. Iliev, **M.B. Marinov**, Performance Analysis of An Embedded System for E-Waste Recognition, *2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET)*, 2023, pp. 1-5
- A62.** (Scopus, IF 2,2) S. Hensel, **M.B. Marinov**, R. Panter, Design and Implementation of a Camera-Based Tracking System for MAV Using Deep Learning Algorithms, *Computation* **2023**, IF 2,2.
- A63.** (Scopus, IF 2,2) (Scopus, IF) **M.B. Marinov**, S. Dimitrov, Generalized Approach to Optimal Polylinearization for Smart Sensors and IoT Devices, *Computation* **2024**, 12, 63; <https://doi.org/10.3390/computation12040063>, CiteScore 3,3, SJR 0,389, Q2, IF 2,2.
- A64.** **M.B. Маринов**, Й. Марчева, "Електронни системи за екологичен мониторинг", Учебник, Технически университет - София, 2024.

Summary

The thesis "Smart Sensor Systems for Environmental Monitoring" comprehensively explores the application of intelligent sensor systems to monitor various environmental parameters in urban settings.

The key objectives of this research and the encountered challenges are outlined. The stress is on the importance of the sensor data accuracy and reliability: they are crucial for the effective monitoring of air quality, water quality, soil moisture, and noise pollution. The significance of enhancing data quality in environmental monitoring through low-cost sensors and IoT devices is underlined.

The primary objective of the research is to investigate novel approaches, methods, and algorithms to improve the data quality provided by smart sensor systems and IoT devices used for monitoring essential environmental parameters in urban environments. The dissertation analyzes developed smart sensor systems and their underlying architecture, defining their fundamental characteristics and performing experimental measurements of major pollutants in urban settings to enhance monitoring capabilities.

Furthermore, the research is focused on evaluating the data accuracy of low-cost sensors for measuring environmental pollutants and developing approaches for filtering and fusing sensor data to enhance overall data quality.

Various methods for linearizing sensor transmission characteristics and calibrating sensor devices are developed to meet challenges related to data accuracy and reliability of sensor measurements.

The research aims to prototype intelligent sensor systems and their testing in real-world environments to assess their performance in monitoring environmental parameters.

The use of drones and autonomous vehicles to map pollution levels in hard-to-reach areas is explored, demonstrating innovative environmental monitoring approaches that use advanced data collection and analysis technologies.

The research results demonstrate the advantages of low-cost MEMS pressure sensors for various applications and highlight the importance of understanding the error and noise parameters to improve the reliability of these sensors. The development of experimental setups for investigating and characterizing integrated optical sensors is also presented, demonstrating a commitment to developing sensor technologies for environmental monitoring applications.

In addition, the thesis represents the development of intelligent multi-sensor modules for online monitoring of key air parameters, with an emphasis on low-power mobile sensor modules equipped with rechargeable batteries and Wi-Fi communication modules to improve mobility and data transfer capabilities. This approach facilitates the deployment of sensor devices in Wi-Fi coverage areas, facilitating real-time monitoring of air quality parameters in urban and indoor environments.

In conclusion, valuable insight into the challenges and progress in the field of intelligent sensor systems for environmental monitoring is provided in the thesis. By addressing the need for accurate data collection, exploring innovative sensor technologies, and developing robust data processing algorithms, the research contributes to ongoing efforts to enhance environmental monitoring methods in urban environments.