



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет по електронна техника и технологии

Катедра „Електронна техника“

маг. инж. Стефан Милков Ризанов

ИЗСЛЕДВАНЕ И УСЪВЪРШЕНСТВАНЕ НА ЕЛЕКТРОННИ МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА РАЗВИТИЕ НА ИНТЕЛИГЕНТНО ЗЕМЕДЕЛИЕ И ОПАЗВАНЕ НА ОКОЛНАТА СРЕДА

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2 Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: „Електронизация”

Научен ръководител: Проф. д-р инж. Петър Иванов Якимов

София
2025 г.

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 18.12.2024 г..

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 12.05.2025 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Техническия университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед №ОЖ-5.2-05 от 17.01.2025г. на Ректора на ТУ-София в състав:

Научно жури:

1. чл. кор. проф. д.т.н. инж. Георги Славчев Михов - председател
2. доц. д-р инж. Любомир Валериев Богданов – научен секретар
3. проф. д.т.н. инж. Тодор Атанасов Стоилов
4. проф. д-р инж. Никола Вичев Колев, дссн
5. проф. д-р Кирил Методиев Алексиев

Рецензенти:

1. чл. кор. проф. д.т.н. инж. Георги Славчев Михов
2. проф. д-р инж. Никола Вичев Колев, дссн

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по Електронна техника и технологии на ТУ-София, блок № 1, кабинет № 1355.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Електронна техника“ на Факултет по Електронна техника и технологии. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Стефан Милков Ризанов

Заглавие: „Изследване и усъвършенстване на електронни методи и средства за развитие на интелигентно земеделие и опазване на околната среда”

Тираж: 30 бр.

Печатна база на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Ранната и автоматизирана диагностика на клинични заболявания при селскостопански животни е ключова за създаването на съвременни умни ферми, които гарантират високо качество на живот за отглежданите животни. Откриването на горски пожари е популярна тема в научните изследвания през последните 20 години, поради значителните материални и нематериални щети, които причиняват.

В рамките на този дисертационен труд са изследвани и предложени нови IoT системи за: инфрачервен биомедицински мониторинг на селскостопански животни; ранно откриване на горски пожар чрез улавяне на излъчвани акустични вълни и сонограмен анализ. Разработените системи бяха подложени както на лабораторна оценка, така и на реални тестове на място.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Цел:

Разработване, оценка и тестване на хардуерни и софтуерни системи за инфрачервена термографска биомедицинска скринингова диагностика на селскостопански животни и акустично ранно детектиране на горски пожари.

Задачи:

1. Създаване и изследване на инструментални системи за неинвазивни измервания на телесната температура на селскостопански животни.
2. Разработване на алгоритми за автоматично откриване на обект в инфрачервено изображение.
3. Проектиране на сензорен модул за ранно откриване на горски пожар, който открива и анализира акустичните вълни, излъчвани от пожар.
4. Изследване на стандарти и технологии за безжичен трансфер на данни в областта на интелигентното селско стопанство, земеделие, горско стопанство и опазване на околната среда.

Научна новост

Разработени и предложени са апаратни и програмни методи за автоматично идентифициране на клинични заболявания при животни и ранно детектиране на горски пожари.

Практическа приложимост

Приложимостта на разработените системни решения бе потвърдена чрез провеждането на лабораторни и полеви тестове – 1) в реална кравеферма за системите за безконтактна диагностика; 2) в условия на пожарно събитие за системите за детектиране на горски пожари.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 8 научни публикации, от които всички са в авторски колектив. Две от научните публикации са в издания с кuartил – съответно Q3 и Q4.

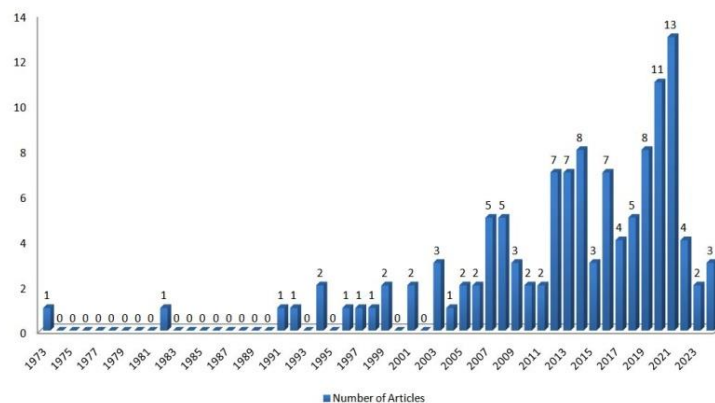
Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 187 страници, като включва увод, 5 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 120 литературни източници, като 120 са на латиница и 0 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 91 фигури и 16 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

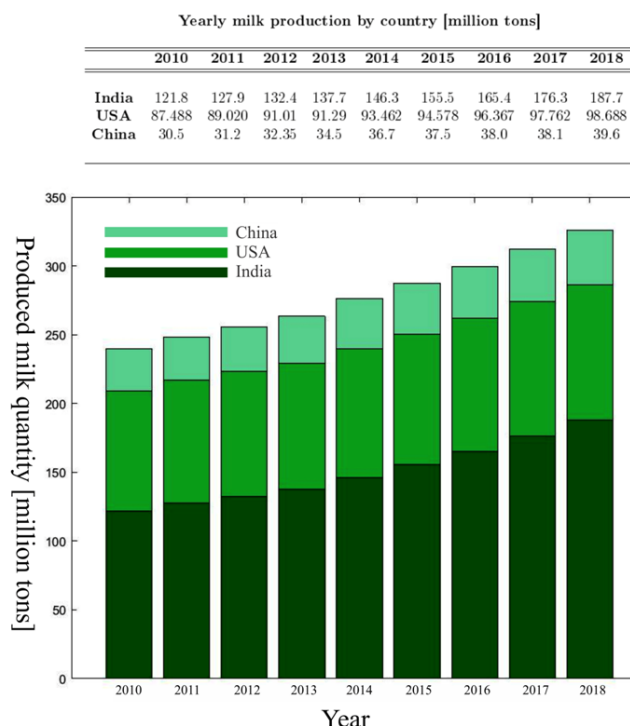
ГЛАВА 1. ОБЗОР ПО ПРОБЛЕМА

В рамките на литературното проучване, свързано с представения дисертационен труд, са използвани и цитирани общо 120 научни публикации, книги и веб-източници. Графично на Фиг. 3 чрез хистограма е представен броят на цитираните литературни източници във функция от годината на публикуване. Основната цел на научното проучване бе насочеността към научни трудове, публикувани през последните 10 години. Графиката показва, че е извършено задълбочено проучване, като са взети под внимание най-новите предложени методи, технологични решения и резултати от измервания.



Фиг. 3. Брой на цитираните източници във функция от годината на публикуване

Сред най-често отглежданите животни са кравите, поради големите количества мляко, които могат да дават. Фиг. 2 показва статистическа извадка, описваща произведеното количество мляко за най-големите страни, производителки на млечни продукти през периода 2010-2018 г.



Фиг. 2. Производство на млечни продукти през периода 2010-2018 г. на Индия, САЩ и Китай

Средният годишен ръст на количеството млекопроизводство за периода 2010-2018 г. е: Индия – 8.238 млн. тона/година; САЩ – 1.401 млн. т/год.; Китай – 1.138 млн. т/год. Освен това кравите осигуряват големи количества месо, критериите за чието качество са повишени и строго урегулирани. Поради тези причини, ефективното отглеждане на млекодайки крави изисква строги мерки за подкрепа и опазване на благосъстоянието на животните.

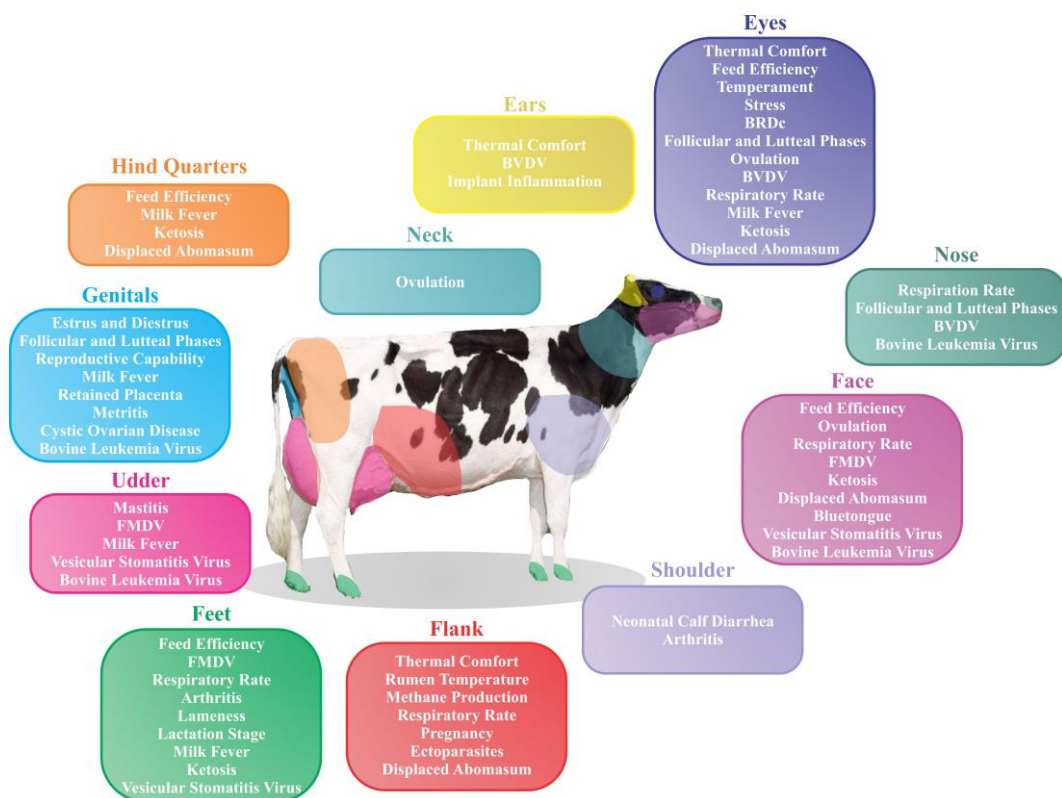
За откриването на горски пожари са предлагани решения и методи, обхващащи различни области на науката като: физика, спектроскопия, комуникационни системи, изкуствен интелект, математическо описателно моделиране, вградени сензорни системи и др. Горските пожари са изключително трудни за моделиране. Техният профил на разпространение, скорости на разширение, температура, дим, газове и емисии на частици често се моделират като стохастични системи и процеси. За такъв тип описателни модели скритите модели на Марков са с най-висока точност, като уравненията на Навие-Стокс се използват допълнително за моделиране на разпространението на дим и частици, тъй като те се разглеждат като флуиди. Фиг.7 показва графично представяне на съвременната екосистема за откриване на горски пожари.



Фиг. 7. Графично представяне на съвременна технологична екосистема за откриване на горски пожари

1.1 Диагностика на животни

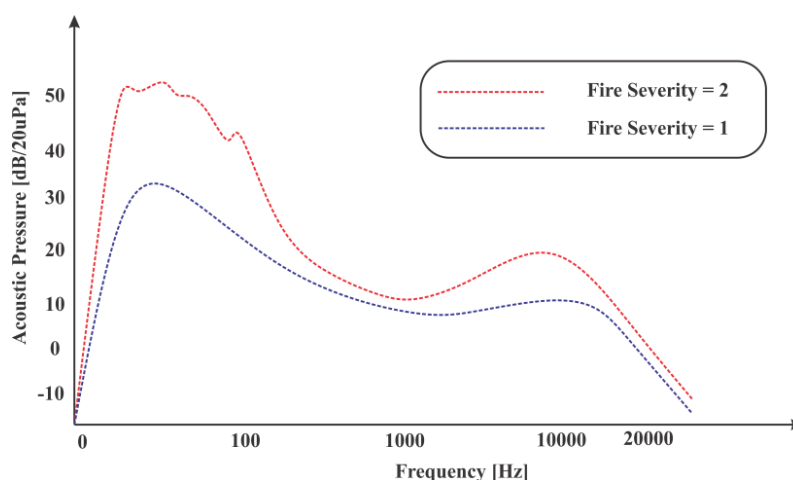
Повишената телесна температура е резултат от много заболявания, но локалните промени на температурата имат по-малко етиологии. Измерването както на абсолютната стойност, така и на скоростта на промяна на повърхностната температура може да бъде добър индикатор за налична инфекция или възпалителен процес. Има телесни зони, за които наличието на температурни промени е показателно за определени клинични състояния - тези региони са известни като термопрозорци. Определени клинични състояния водят до температурни промени само в един термичен прозорец, но други клинични състояния водят до промени в няколко различни термични прозореца. Това създава възможност за конструирането на термографска сигнатура на различни клинични състояния въз основа на температурните промени, които те предизвикват върху един или повече термични прозорци. Термичните прозорци са локализирани анатомични зони, които позволяват топлинен обмен с околната среда чрез кожна вазодилатация на кръвоносните съдове в близост до повърхността. Термичните прозорци в идеалния случай имат липсващо космено покритие и артериовенозна анастомоза. Фиг. 4 показва основните термични прозорци и кои клинични състояния и инфекциозни заболявания могат да бъдат детектирани посредством измерване на повърхностната им температура.



Фиг. 4. Термични прозорци за инфрачервена диагностика

1.2 Излъчени акустични вълни от горски пожари

Излъчената звукова вълна по време на процес на горене е ефект, причинен от високотемпературното разширение на въздуха в близост до източника на огън. Спектърът на тази акустична вълна се съдържа както в инфразвуковия, така и в чуваемия звуков диапазон. Изгарянето на дървесина е сравнително бавен процес, така че съответната звукова мощност е по-ниска в сравнение с горенето на други материали. Звуците, излъчвани от сходни източници, притежават сходни спектрални характеристики. Количеството налична горяща биомаса влияе пряко върху сонограмата на излъчваните акустични вълни.



Фиг. 9. Примерен акустичен спектър на два пожара с различна степен на развитие

Шумовите спектри на различните типове пожари (повърхностни и коронни пожари) се различават – повишаване на нивото на акустичното налягане при по-ниските честоти за повърхностни горски пожари, а за коронни горски пожари може да се наблюдава камбанообразна форма на кривата, описваща спектралния състав. Фиг.9 показва примерен аудио спектър за горски пожар при две степени на развитие.

Изводи

Измерването на повърхностната температура на животните е силен и ефективен инструмент за диагностика на селскостопански животни и неговата точност зависи от:

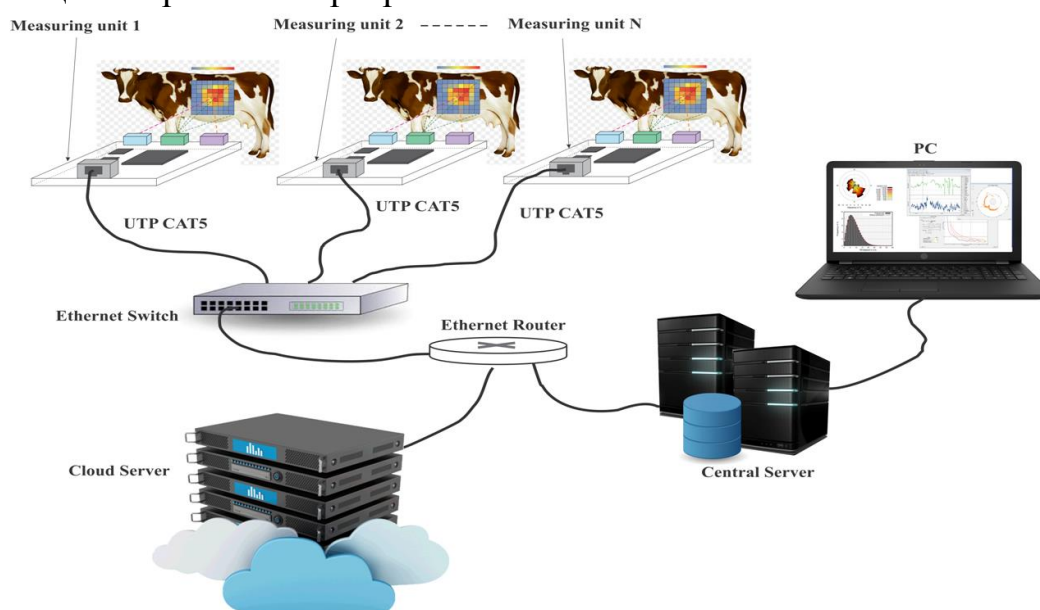
- Различни здравословни състояния - възпалителни и инфекциозни клинични патологии, бременности и репродуктивни състояния, възраст и генетична селекция
- Топлофизични свойства на тъканите – съдържание на подкожни тлъстини, космено покритие и др.
- Стрес, болка и социални взаимодействия – условия във фермата, контакт с хора, модели на хранене, методи за ваксиниране

Откриването на горски пожари е от голямо значение за устойчивото опазване на околната среда и перспективните насоки за неговото развитие са:

- Избор на сензори и технологии за откриване на горски пожари;
- Преодоляване на специфичното влияние на условията на околната среда.

ГЛАВА 2. ETHERNET СИСТЕМА ЗА ИНФРАЧЕРВЕНА ДИАГНОСТИКА НА СЕЛСКОСТОПАНСКИ ЖИВОТНИ

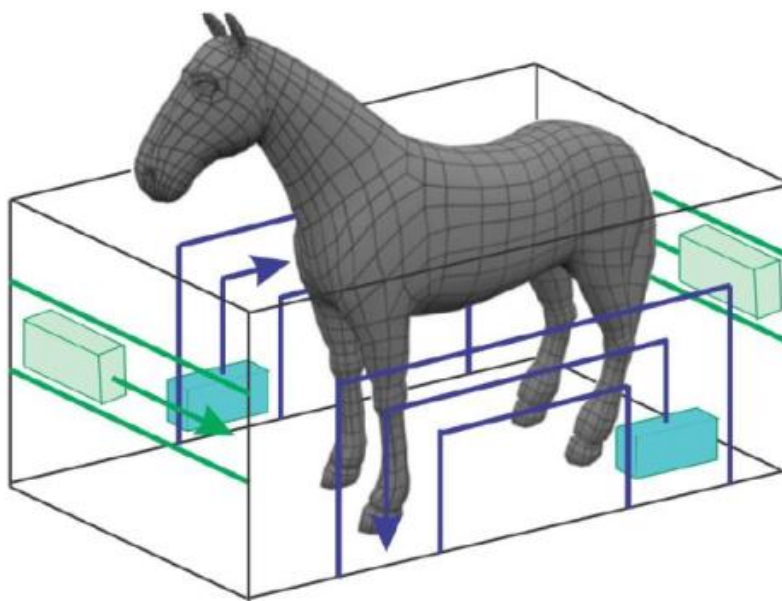
Фиг.11 показва блокова схема на разработената система. Тя разгръща класическия трислоен IoT модел със слоеве за възприемане, мрежова организация и приложна програма.



Фиг. 11. Системна структура на разработената Ethernet система

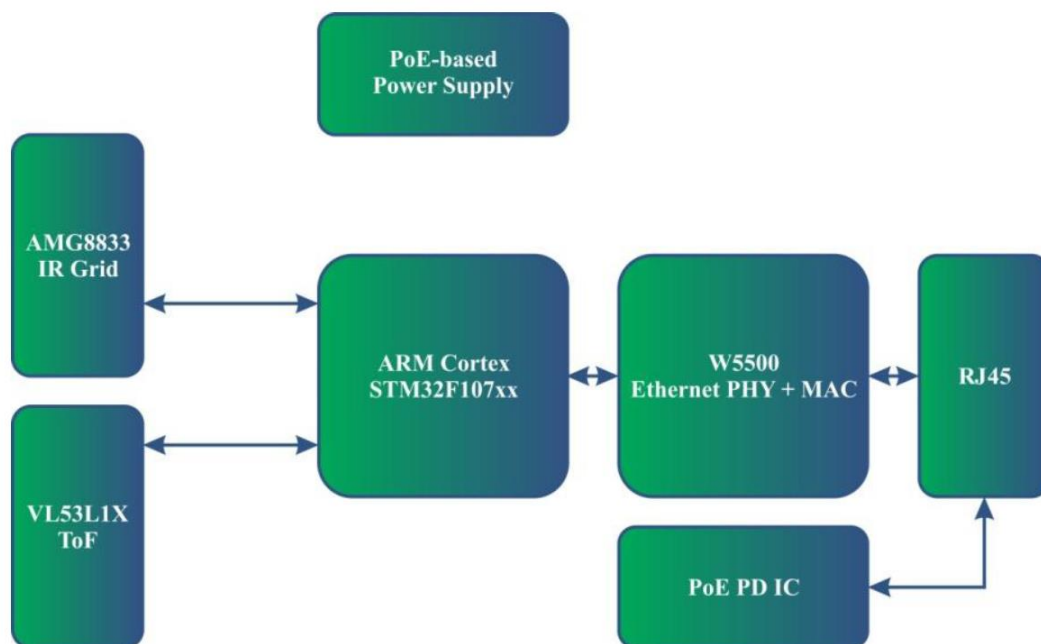
Разработената система включва сензорни крайни възли, като всеки от тях може да наблюдава повърхностната кожна температура на отделно животно. Освен заснемането на термографски изображения, сензорните модули могат да измерват автоматично разстоянието камера-обект. Всеки сензорен възел е монтиран физически върху носещата рамка на кошарата на животното. Позиционирането на модула се ръководи основно от факта, че трябва да се анализират различни области от тялото на животното, за да се извърши цялостна диагностична процедура. Крайните устройства са свързани чрез физическа Ethernet връзка към локален централен сървър. Комуникацията с крайните устройства се осъществява чрез TCP/IP базиран протокол и с помощта на разработено клиент-сървър приложение.

Липсата на необходим надзор от оператор и възможността за автоматизация драстично намалява финансовите разходи за поддръжка на такава система и позволява на квалифициран оператор да наблюдава дистанционно здравословното състояние на стотици животни в реално време. Като допълнителна функционалност на системата, която би позволила по-голяма гъвкавост, е изграждането на мониториращи стендове за наблюдение, които да интегрират 4 термографски измервателни модули. В рамките на тази предложена концепция - всеки сензорен модул е монтиран върху релсова система, като контролираното движение на сензора по фиксираната траектория се контролира посредством DC стъпков мотор. Фиг. 12 показва графично този концептуализиран стенд.



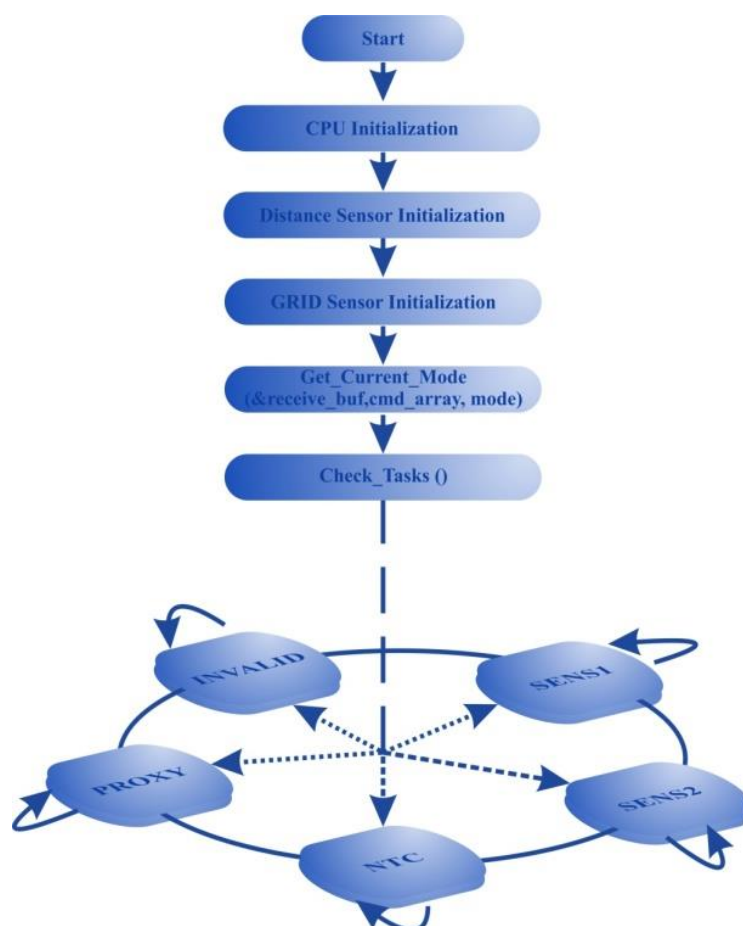
Фиг. 12. Предложена структура на термографски мониториращ стенд

Фиг.13 представя блокова схема на разработената система. Структурата на устройството може да бъде разделена на четири основни блока – микропроцесорен блок, сензорен блок, комуникационен блок и захранващ блок.



Фиг. 13. Блокова диаграма на разработеното Ethernet устройство

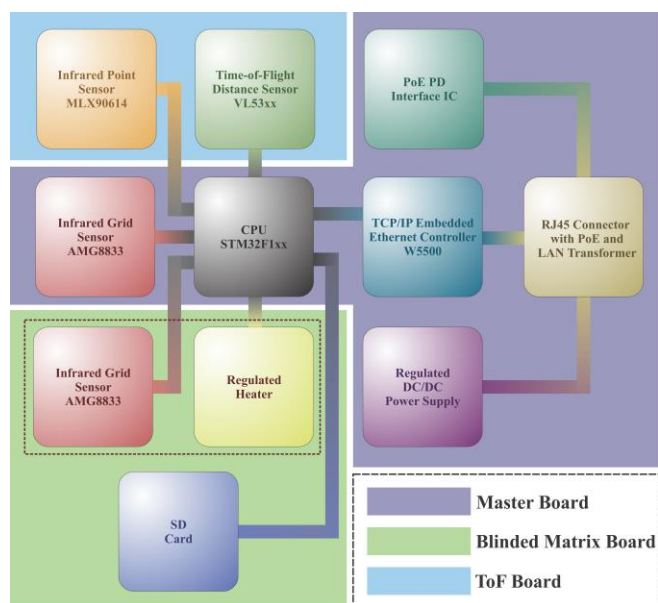
Фиг.23 показва блок-схема на работния цикъл на разработеното програмно осигуряване.



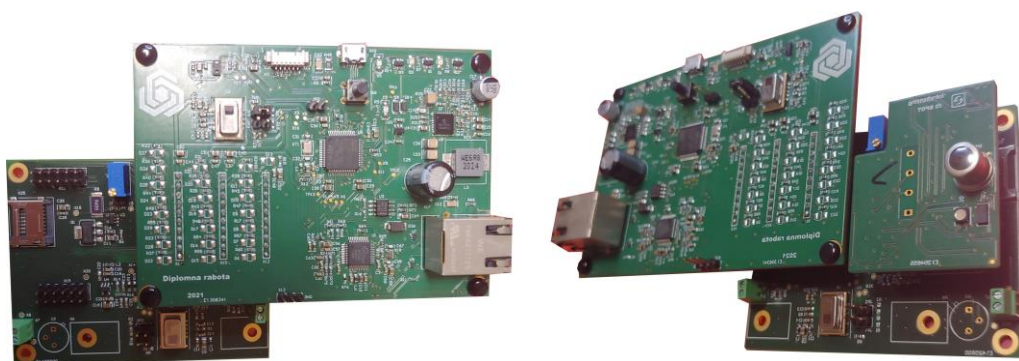
Фиг.23. Оперативен алгоритъм на разработената система

Фиг. 34 показва блокова диаграма на подобрената термографска измервателна система, внедряваща OEVT (One-Eyed Bandit Technology) за

компенсиране влиянието на външни фактори върху точността на измерванията. Фиг. 86 показва снимки на пълната измервателна система.



Фиг. 34. Блок диаграма на разработената система за диференциално измерване на телесна температура



Фиг. 86. Снимки на прототипираната система за диференциално измерване на телесна температура

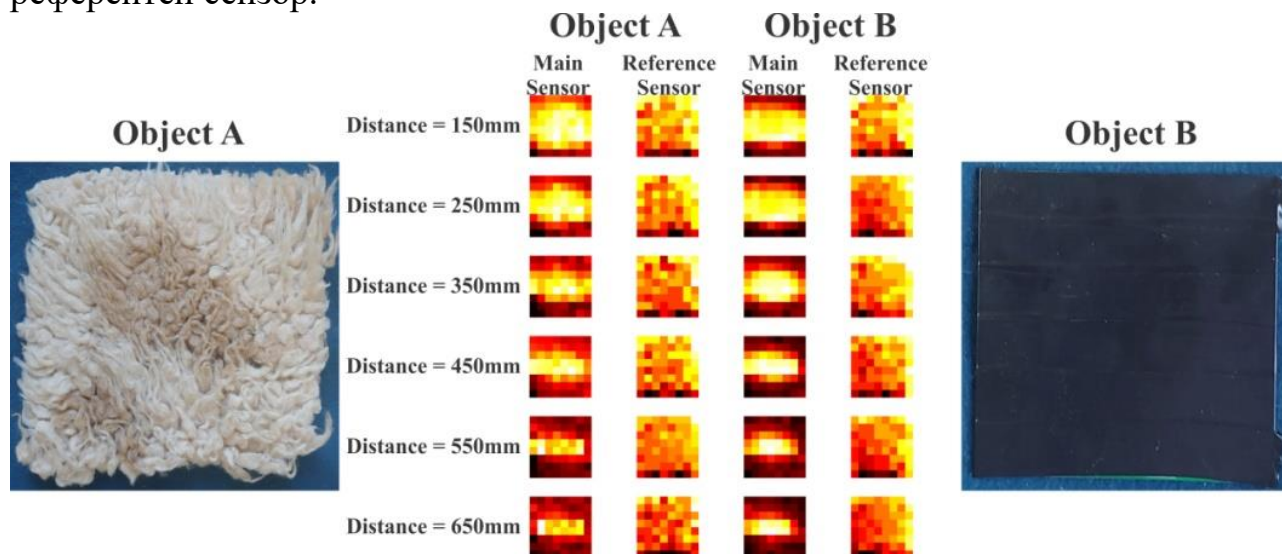
Уравнение 1 описва методиката ОЕВТ за изчисляване на корекционен коефициент.

$$IR_{AVG_{REAL}} = IR_{AVG_{RAW}} * C = IR_{AVG_{RAW}} * \frac{T_{Contact_{REF_OBJ}}}{T_{IR_{REF_OBJ}}} \quad (1)$$

За да се оцени функционалността и потвърди полезността на ОЕВТ - бе разработена експериментална постановка с координатна маса и бяха извършени измервания.

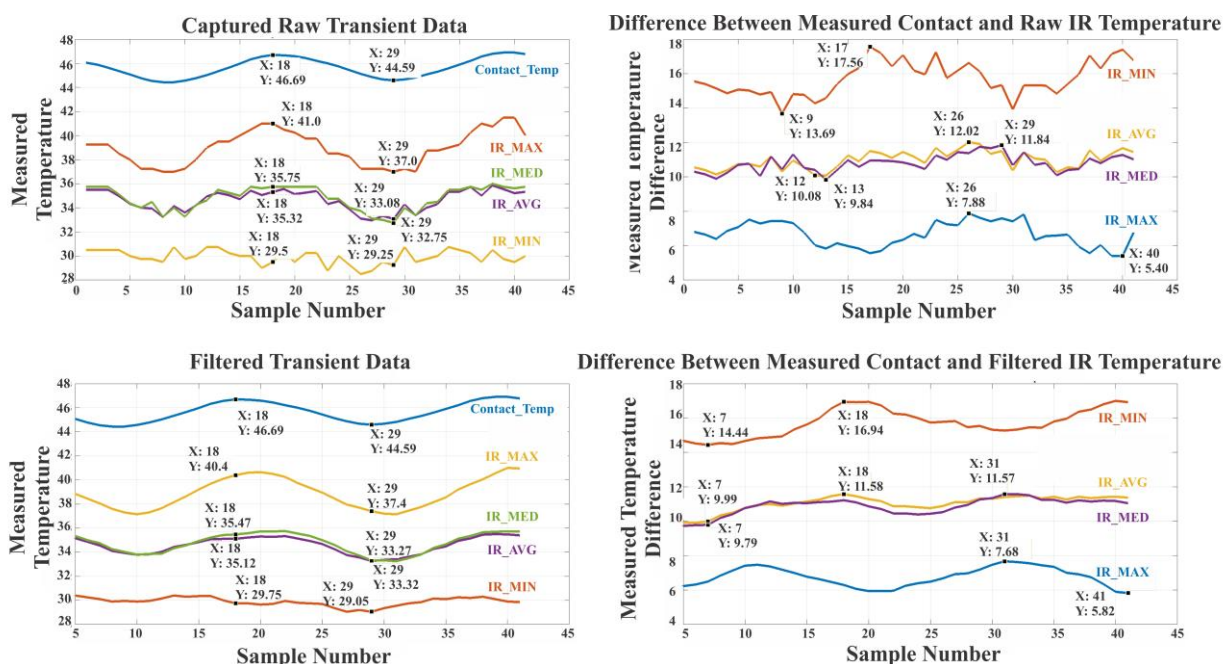
Фиг.35 показва обект А и обект В и извадка от заснетите термографски изображения на изследвания обект при различно разстояние камера-обект,

както и термографските изображения призаснемане чрез заслепеня референтен сензор.



Фиг. 35. Термографски изображения на обект А и обект В

Фиг. 36 показва времевите данни за обект В. Както може да се види, контактно измерената температура се колебае в приблизително синусоидална форма, поради вътрешния регулатор на използваната нагревателна плоча.

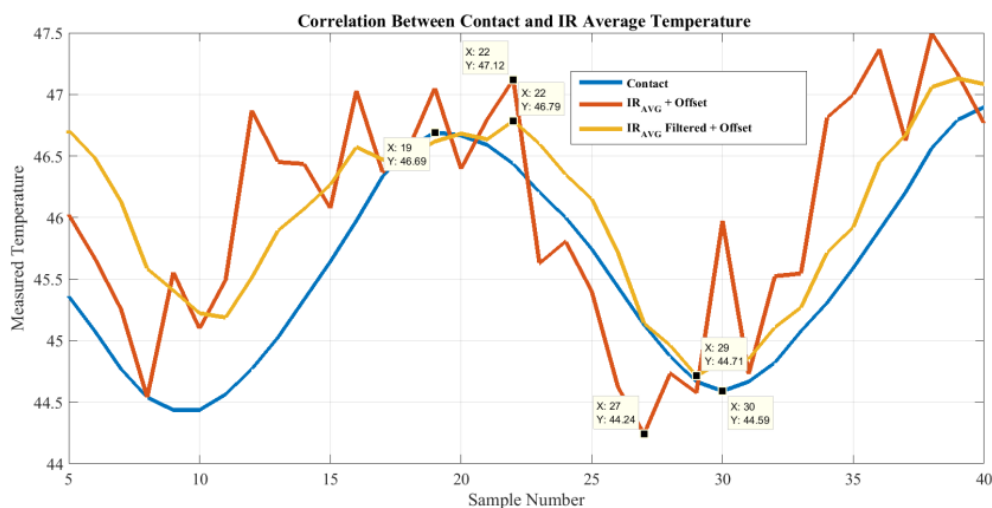


Фиг.36. Времеви данни за температурата на обект В

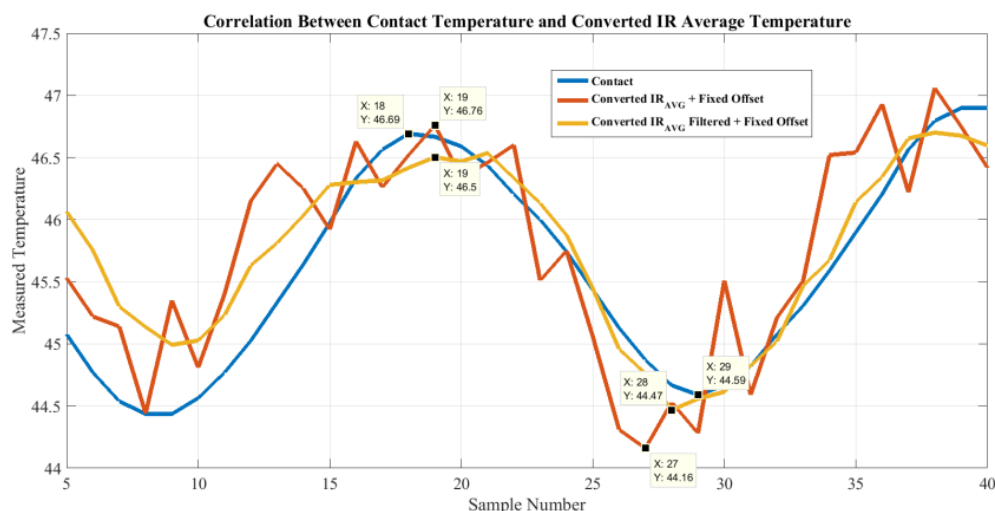
Таблица 13. Обобщение на измерените температури за обект В

	Raw Absolute Temperature		Filtered Absolute Temperature		Difference Between Contact and Raw IR Temperatures		Difference Between Contact and Filtered IR Temperatures	
	Contact Max	Contact Min	Contact Max	Contact Min	Max	Min	Max	Min
Contact	46.69	44.59	46.69	44.59	0.00	0.00	0.00	0.00
IR_MAX	41.00	37.00	40.40	37.40	7.88	5.40	7.68	5.82
IR_MIN	29.50	29.25	29.75	29.05	17.56	13.69	16.94	14.42
IR_AVG	35.32	33.08	35.12	33.32	12.02	10.08	11.58	9.99
IR_MEDIAN	35.75	32.75	35.47	33.27	11.84	9.84	11.57	9.79

Фиг. 37 показва суровите времеви данни за средната температура. Фиг.38 показва данните за коригираната средна ИЧ температура, използвайки ОЕВТ предложението метод.

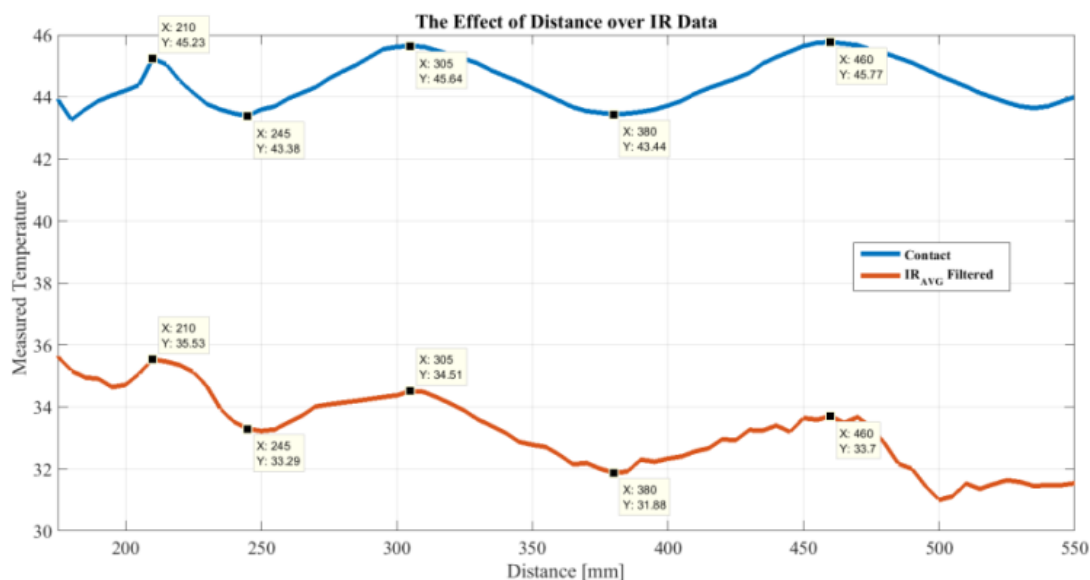


Фиг. 37. Времеви данни за средната температура на обект А



Фиг.38. Времеви данни за коригираната средна температура на обект А

За да може тази система да бъде напълно автоматизирана и способна да прилага корекции върху измерените данни (добавяне на динамичнопроменящо се отместване като функция на разстоянието камера-обект) този ефект трябва да бъде количествено оценен и моделиран. За целта инфрачервената температура на обект А бе измерена при различни разстояния камера-обект при стъпка 5mm. Фиг. 40 показва графика, която изобразява данните от проведения експеримент.

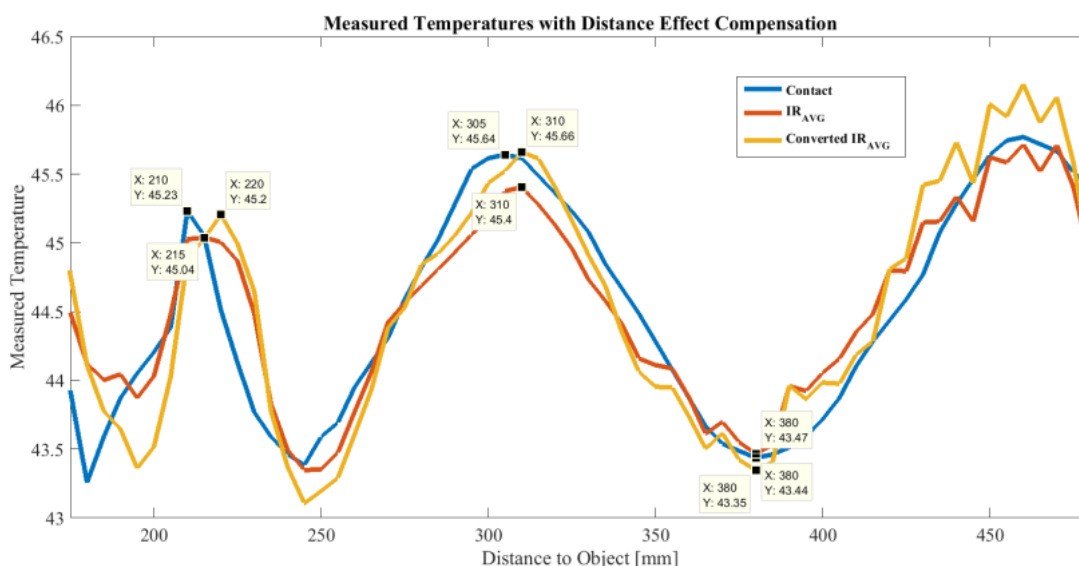


Фиг. 40. Оценка на влиянието на разстоянието камера-обект

Уравнение 2 показва формулата за корекция на ефекта от разстоянието, която бе приложена към снетите сурови инфрачервени данни:

$$\begin{aligned}
 IR_{Compensated} &= IR_{RAW} + Offset = IR_{RAW} \\
 &+ (-2.789 * 10^{-5} * ToF_{DIST}^2 + 0.02821 \\
 &* ToF_{DIST} + 4.969)
 \end{aligned} \quad (2)$$

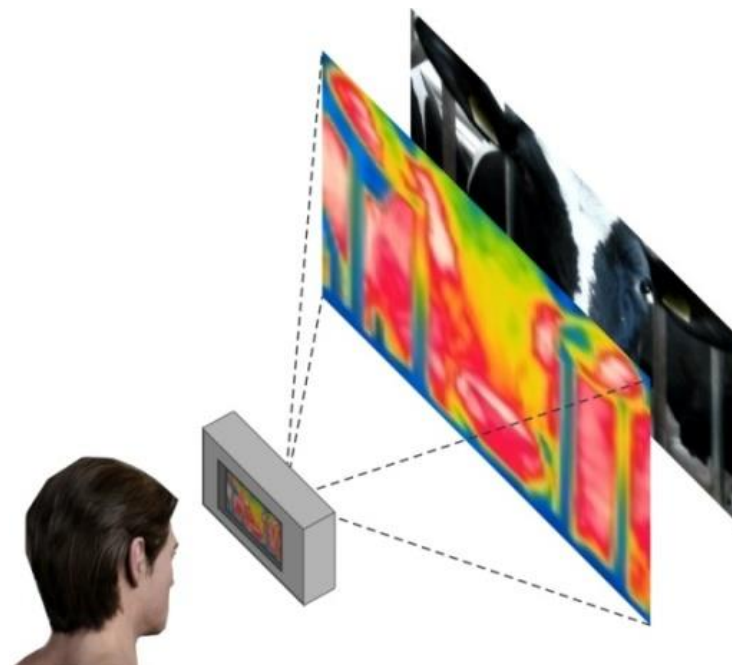
,където IR_{RAW} - суроватемпературна стойност; ToF_{DIST} - измерено разстояние камера-обект с VL53xx ToF сензор; $IR_{Compensated}$ —компенсирана температурна стойност. След прилагане на техниката ОЕБТ, филтриране на данните и регресионно-дефинираното отместване на данните като функция от разстоянието - получаваме данните, показани на Фиг. 42. Резултатните данни показват, че прилагането на предложените методи върху снети термографски изображения позволява повишаване точността на измерванията и доближаване с точност от $\pm 0.1^\circ\text{C}$ до показанията на контактно измерена температура, независимо от разстоянието камера-обект и параметрите на околната среда.



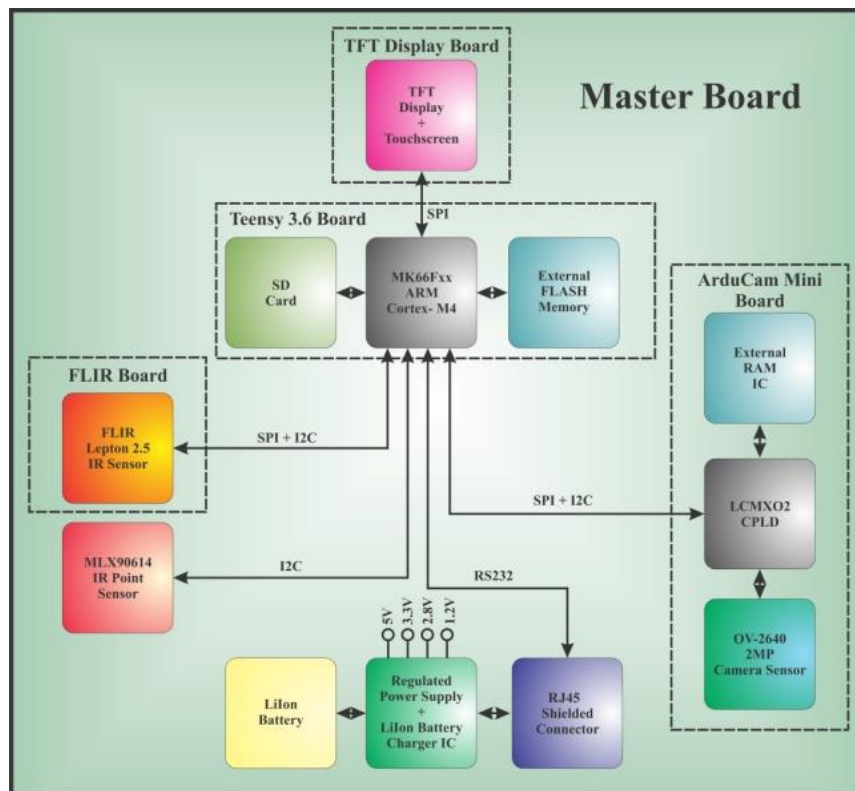
Фиг. 42. Данни за обект А при сурова средна температура и коригирана средна температура при различни разстояния камера-обект

ГЛАВА 3. ПОРТАТИВНА ИНФРАЧЕРВЕНА СИСТЕМА ЗА ДИАГНОСТИКА

Фиг. 43 показва диаграма на предложената портативна система. Фиг. 44 показва блоковата структура на предложения и прототипиран модул за биомедицинска образна диагностика. Фиг.90 показва снимки на проектираната и прототипирана измервателна система.



Фиг. 43. Концептуално приложение на предложената система за мултиспектрална диагностика



Фиг. 44. Блокова диаграма на разработената портативна система за инфрачервена диагностика



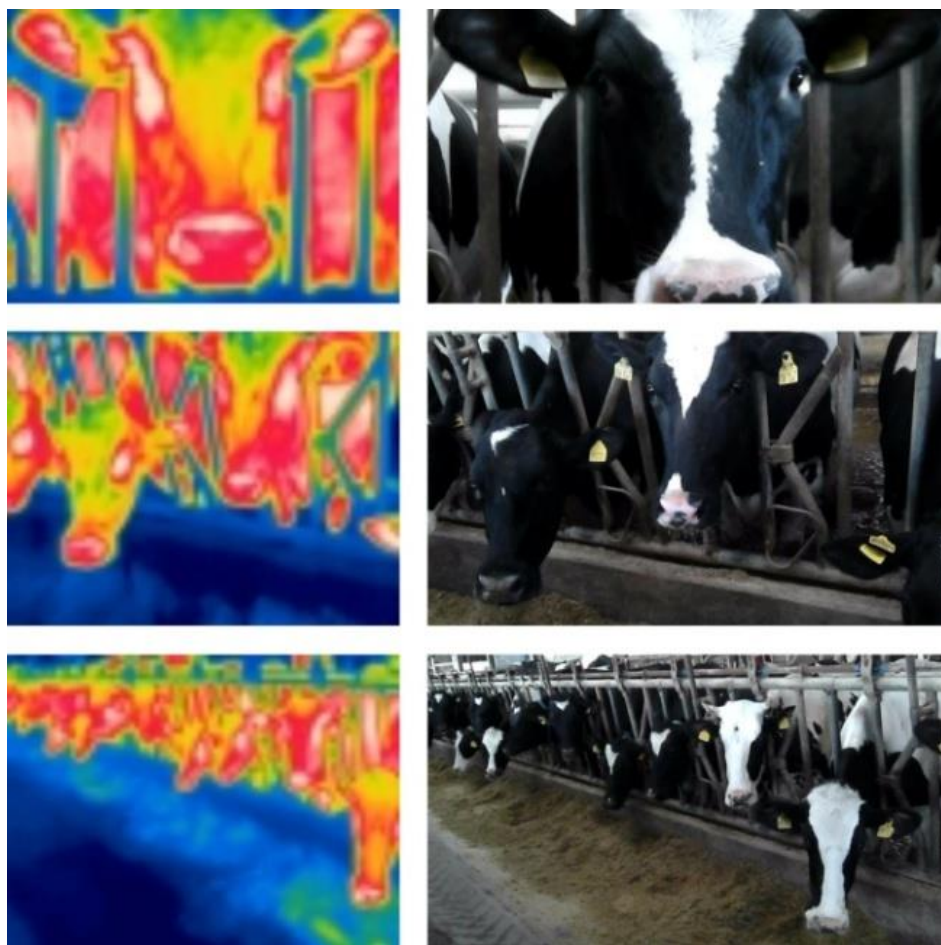
Фиг. 90. Прототип на разработената портативна система за инфрачервена диагностика

Клиничните изпитвания в реална среда бяха извършени на 18 март 2023 г. в кравеферма в област Нова Загора. Тестовите бяха извършени рано сутринта между 8:00 ч. и 11:00 ч., като по време на изпитанията и през предходния ден не бе валило, следователно влажността на околната среда не е била повишена. Измерената температура на околната среда бе 18°C, близка до термично неутралната зона (TNZ) от 20°C за крави, което минимизира

терморегулаторните усилия на животното и което намаля грешката при измерване. Снимка на избраната кравеферма е показана на фиг. 47. Във фермата се отглеждат 538 телета на възраст между 1-3 години. Всички животни се преглеждат периодично от ветеринарен лекар на място. Животните се хранят с комбинация от силаж и допълнителни диетични и витаминни добавки. Всички животни в обекта се ваксинират периодично за инфекциозни заболявания. При извършена дискусия относно какви клинични състояния най-често се наблюдават при животните на място основна част са клинични заболявания, породени от дефицит на хранителни вещества, примери за които е кетозата. Фиг. 48 показва някои примерни термограми, заснети във фермата с разработената система.

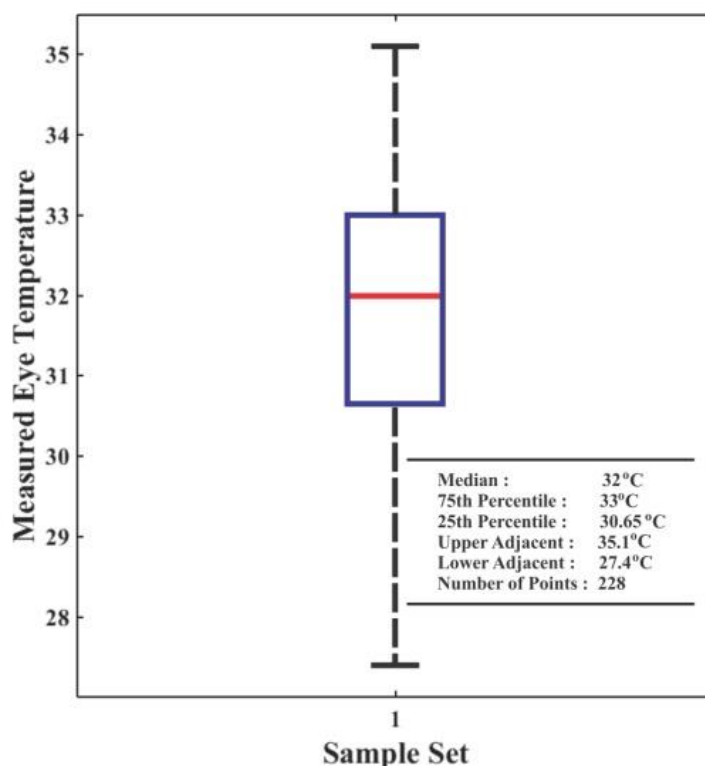


Фиг. 47. Избраната ферма за клинични изпитания



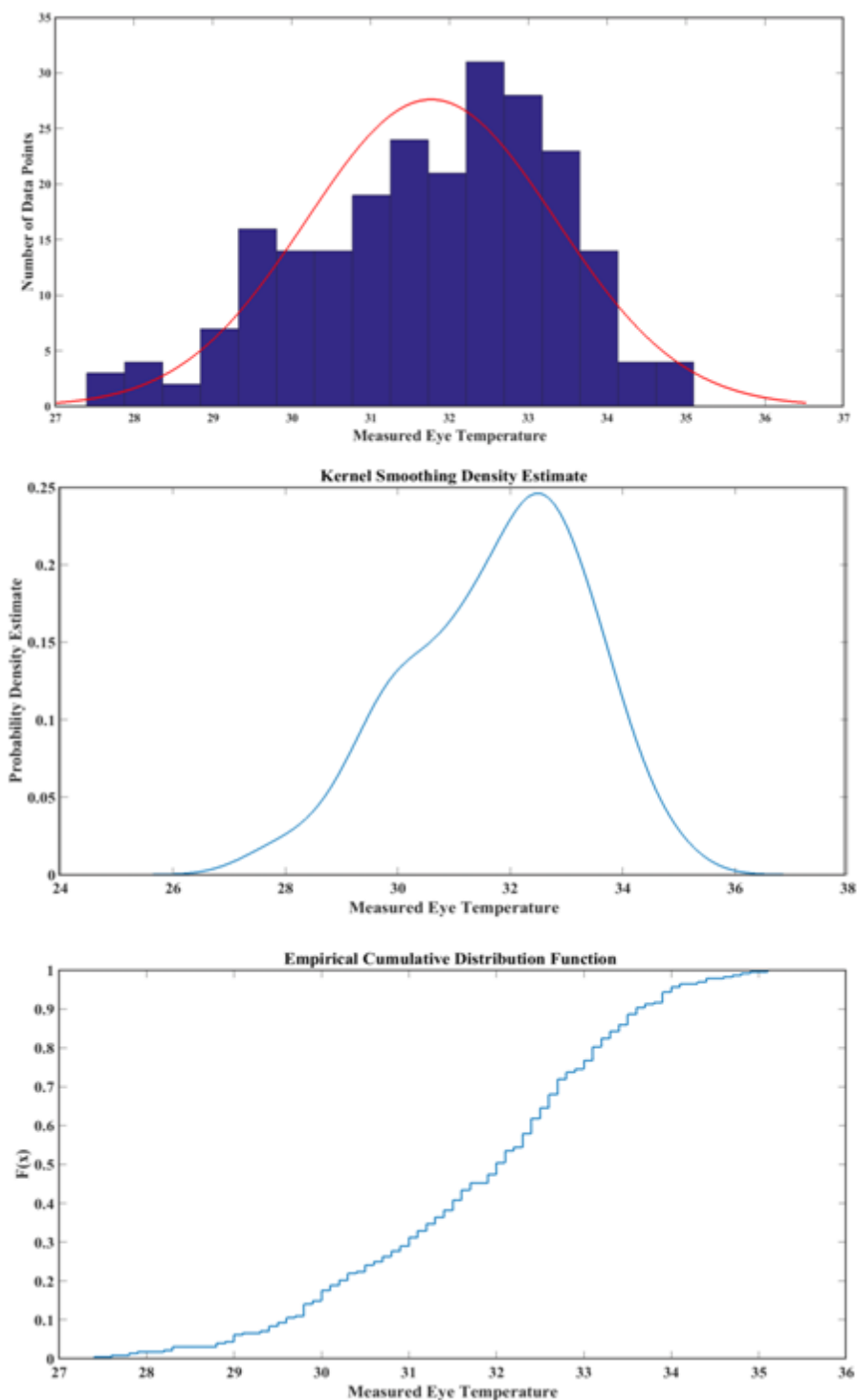
Фиг. 48. Заснети тестови термографски изображения

Бяха извършени 228 измервания на очни температури на крави на място и бе снета тяхната максимална орбитална температура. След това бяха оценени статистическите свойства на събраните данни. Фиг.49 показва графика на заснетите максимални температури на очите.



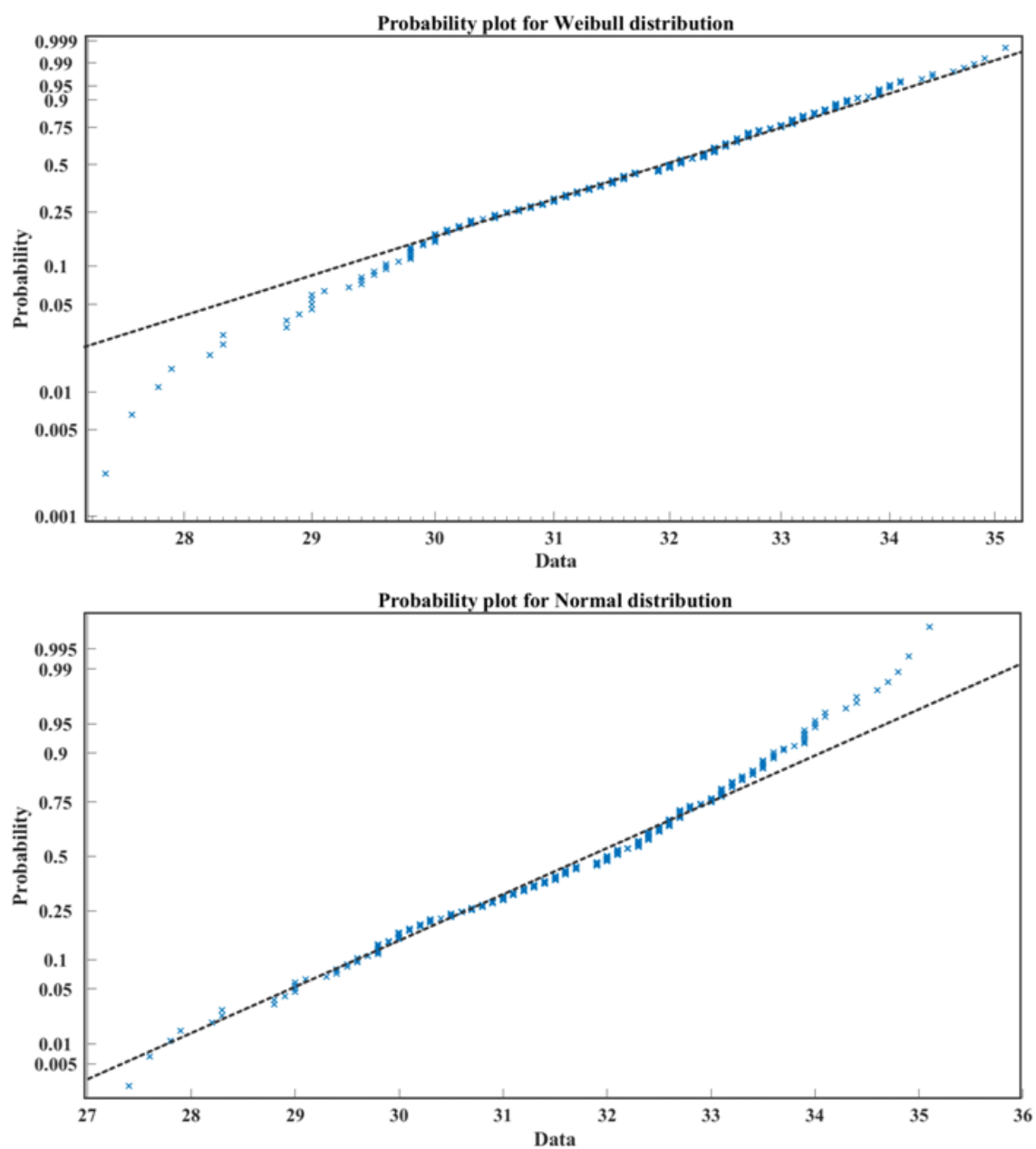
Фиг. 49. Статистическо разпределение на орбиталните температури

След това бе приложена изглаждаща функция върху вероятностната плътност с цел интерполиране на общото статистическо разпределение на данните. Като последна стъпка бе създадена емпиричната кумулативна функция на разпределението. Тези резултати и диаграми са показани на Фиг. 50.



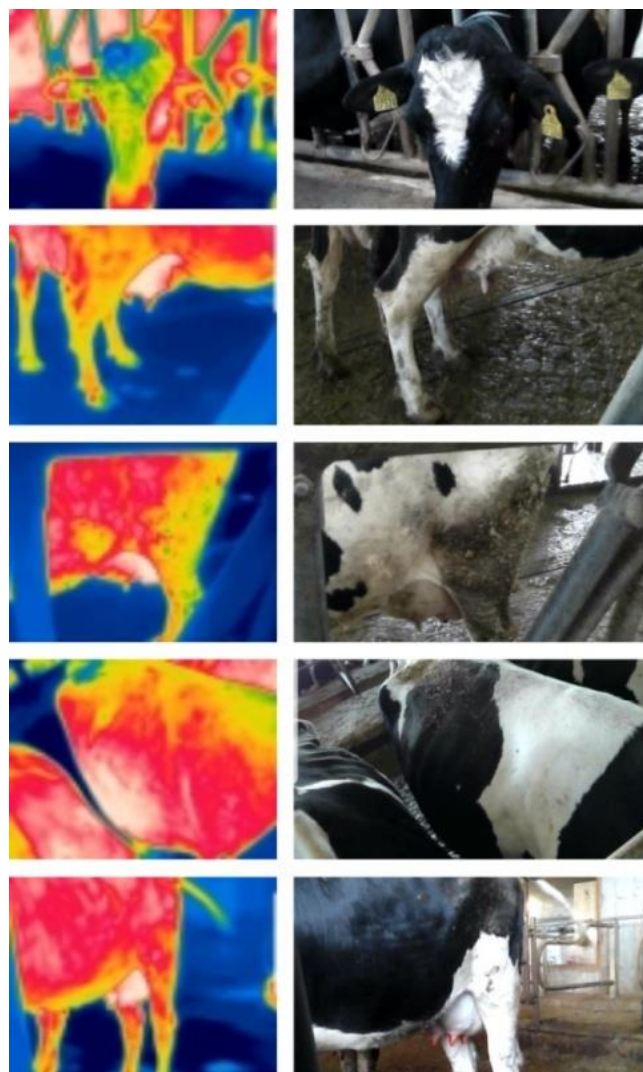
Фиг. 50. Хистограма на снетите данни, филтрирана функция на плътност на вероятностите, емпирична кумулативна плътностна функция

За да може да бъде оценено до каква степен записаните данни за температурата на очите следват известно разпределение бяха оценени две вероятностни разпределения – за нормално разпределение и за разпределение на Вейбул. Получените диаграми са показани на Фиг. 51.



Фиг. 51. Сравнение с нормално и Вейбулово разпределение

По време на извършените изследвания бяха наблюдавани няколко животни с непренебрежими термични аномалии. Тези пет аномалии са представени на Фиг. 52.



Фиг. 52. Заснети термографски изображения на животни с термични аномалии и вероятни клинични патологии

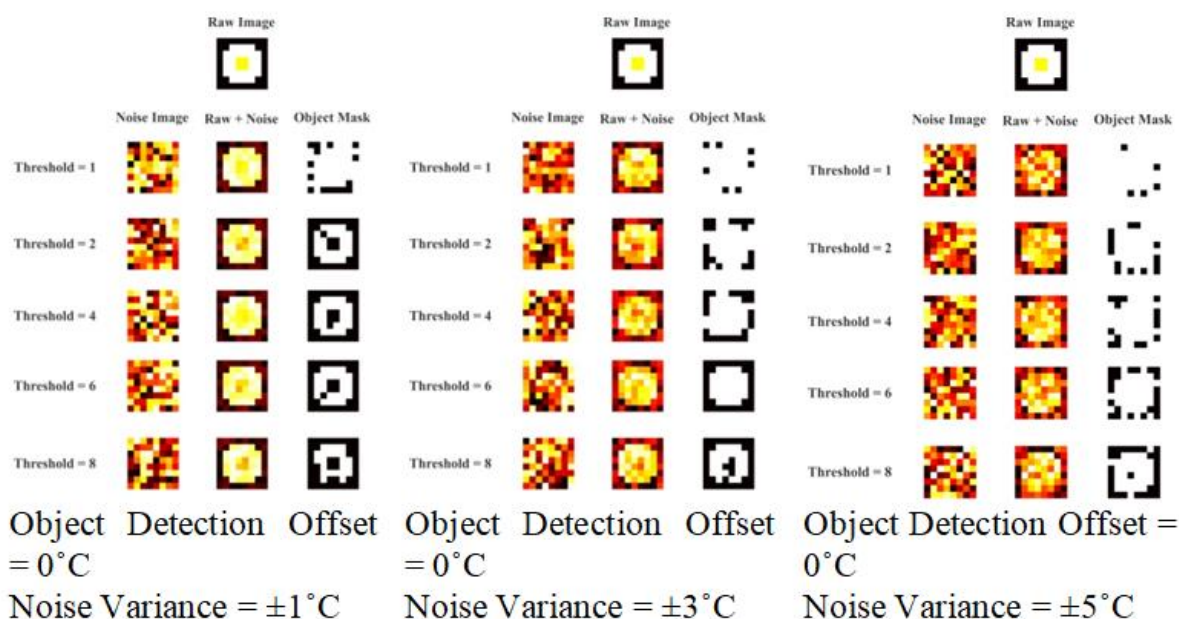
ГЛАВА 4. ДЕТЕКТИРАНЕ НА ИНФРАЧЕРВЕНИ ОБЕКТИ

Модулт за разпознаване на инфрачервени обект изчислява обектна маска за всяка заснета термограма и определя кои пиксели са част от обекта. Две функции на Python изпълняват това: `Image_OBJ_Mask (...)` и `Quick_OBJ_Mask (...)`. Функцията `Extract_OBJ_Parameters (...)` изчислява параметрите на обекта. Псевдокодovo представяне на тези 3 функции е показано на Фиг.53.

Image_OBJ_Mask (<i>IR_Image</i> , <i>Threshold</i> , <i>Offset</i>): Create empty 2D array of size (<i>IR_Image</i>) Extract corner (<i>x,y</i>) gradients Extract edge (<i>x,y</i>) gradients Extract internal (<i>x,y</i>) gradients IF (<i>Extracted_Gradients</i> > <i>Threshold</i>): Mark <i>IR_Image</i> Pixels as <i>OBJ_Contour_Pixels</i> Add <i>OBJ_Contour_Pixels</i> to <i>OBJ_Mask</i> min_val = min(<i>OBJ_Contour_Pixels</i>) Scan <i>IR_Image</i> Pixels IF (<i>Image_Pixel</i> > (min_val - <i>Offset</i>)): Add <i>IR_Image_Pixel</i> to <i>OBJ_Mask</i> return <i>OBJ_Mask</i>	Quick_OBJ_Mask (<i>IR_Image</i>): Calculate: min(<i>IR_Image</i>) max(<i>IR_Image</i>) avg(<i>IR_Image</i>) <i>Dynamic_Threshold</i> = min(<i>IR_Image</i>)+ (max(<i>IR_Image</i>)- min(<i>IR_Image</i>))/ 2 <i>Dynamic_Offset</i> = avg(<i>IR_Image</i>) * 0.02 Image_OBJ_Mask (<i>IR_Image</i> , <i>Dynamic_Threshold</i> , <i>Dynamic_Offset</i>) return <i>OBJ_Mask</i>	Extract_OBJ_Parameters (<i>IR_Image</i> , <i>OBJ_Mask</i>): Scan <i>OBJ_Mask</i> elements IF <i>OBJ_Mask</i> element marks <i>OBJ_Pixel</i> : Add corresponding <i>IR_Image</i> Pixel to 1D List Calculate: min(<i>OBJ_Pixels</i>) max(<i>OBJ_Pixels</i>) avg(<i>OBJ_Pixels</i>) median(<i>OBJ_Pixels</i>) return min, max, avg, median
---	---	---

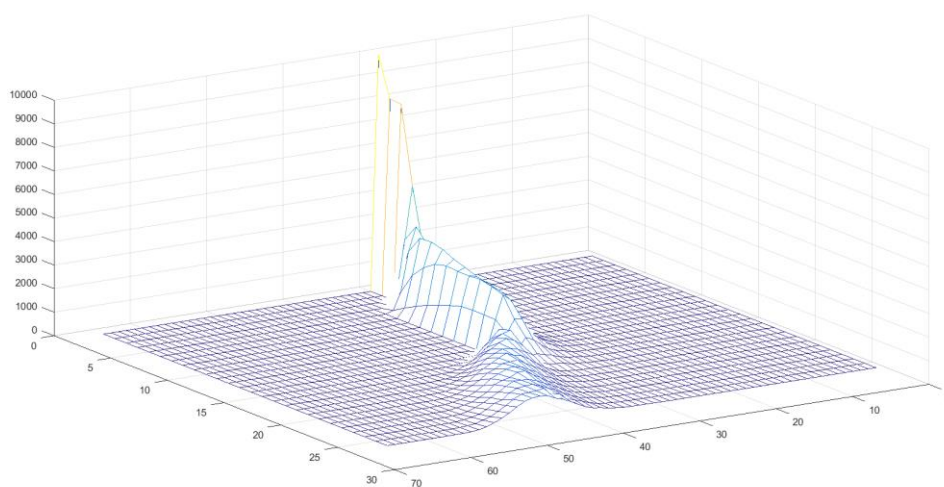
Фиг. 53. Псевдокод на създадените методи за обектно разпознаване

Първият тест беше извършен, за да се оцени как стойността на градиентния праг (топлинна разлика) влияе върху възможностите на разработения модул за откриване на обекти. Фиг. 54 показва резултатите от проведеното изследване.



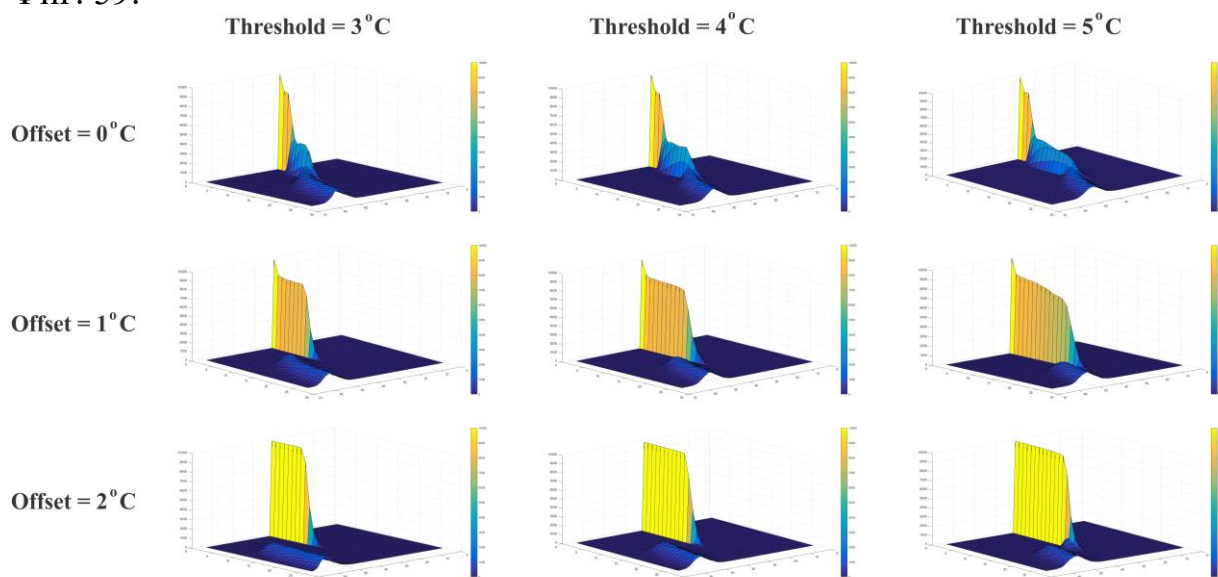
Фиг. 54. Детектиране на обект при различни топлинни шумове

Приложен бе бял топлинен шум върху тестовото изображение, чиято топлинна вариация е в диапазона $[\pm 0,0^\circ\text{C} \dots \pm 5,0^\circ\text{C}]$ със стъпка 200mK . След всяка инкрементално повишаване на шума са генерирани 10 000 топлинни изображения и е приложен разработения алгоритъм за откриване на обекти. Полученият изчислен размер на обекта бе поставен в хистограма. Резултатите са набор от 3D хистограми, които показват как алгоритъмът работи при различни нива на топлинен шум. Фиг. 58 показва примерна 3D генерирана хистограма от проведените тестове.

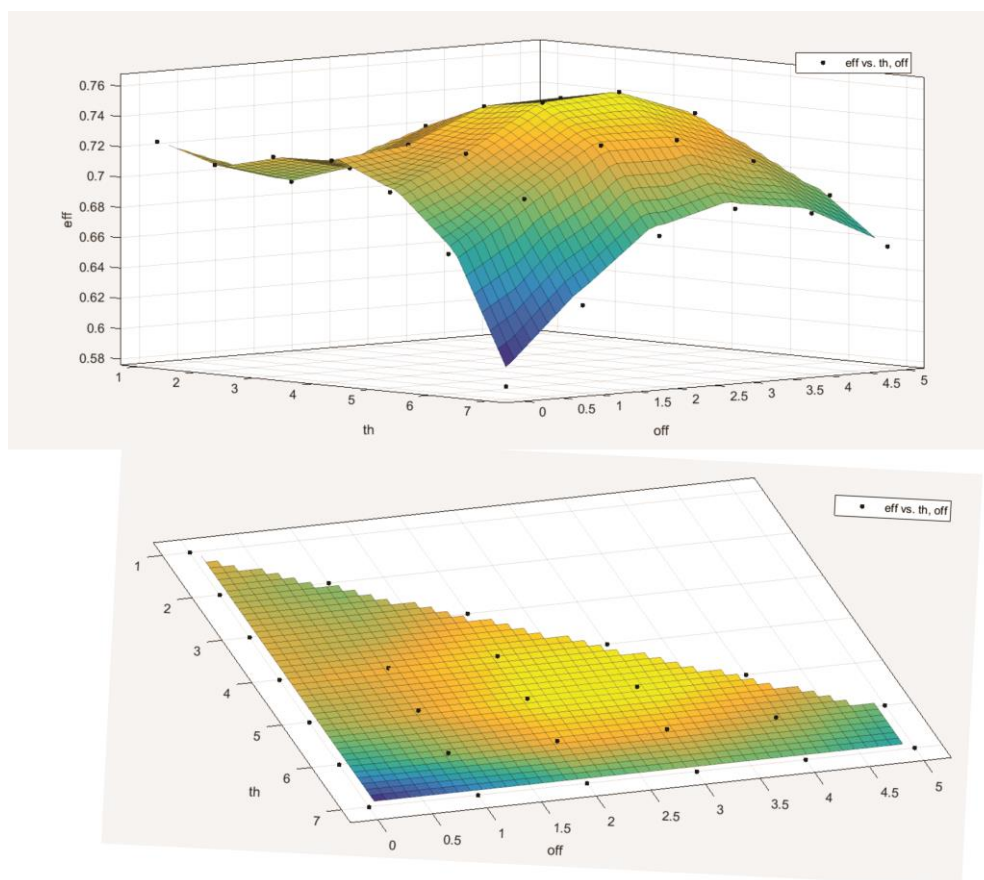


Фиг. 58. Примерна 3D хистограма за оценка шумоустойчивостта на настроения алгоритъм

Тъй като разработеният алгоритъм има два параметъра за настройка, бе оценено как стойностите на тези параметри влияят върху точността на алгоритъма. Визуално представяне на това как тези стойности на параметрите за настройка влияят върху откриването на обект е показано на Фиг. 59.



Фиг. 59. Влиянието на стойността на параметрите на алгоритъма върху неговата шумоустойчивост



Фиг. 60. Повърхностна крива за оптималното избиране на тунинг параметри

Тъй като прилагането на този алгоритъм изисква правилен избор на стойностите на тези параметри за настройка е дефиниран критерий за оптимизиране на производителността, чиято числена стойност показва кои стойности на параметрите водят до оптимално откриване на обекти. Критерия за оптимизация C имат следната дефиниция:

$$C = \frac{HYST_{EmptyPots}}{HYST_{AllPots} - N_{NoiseSteps}} \quad (3)$$

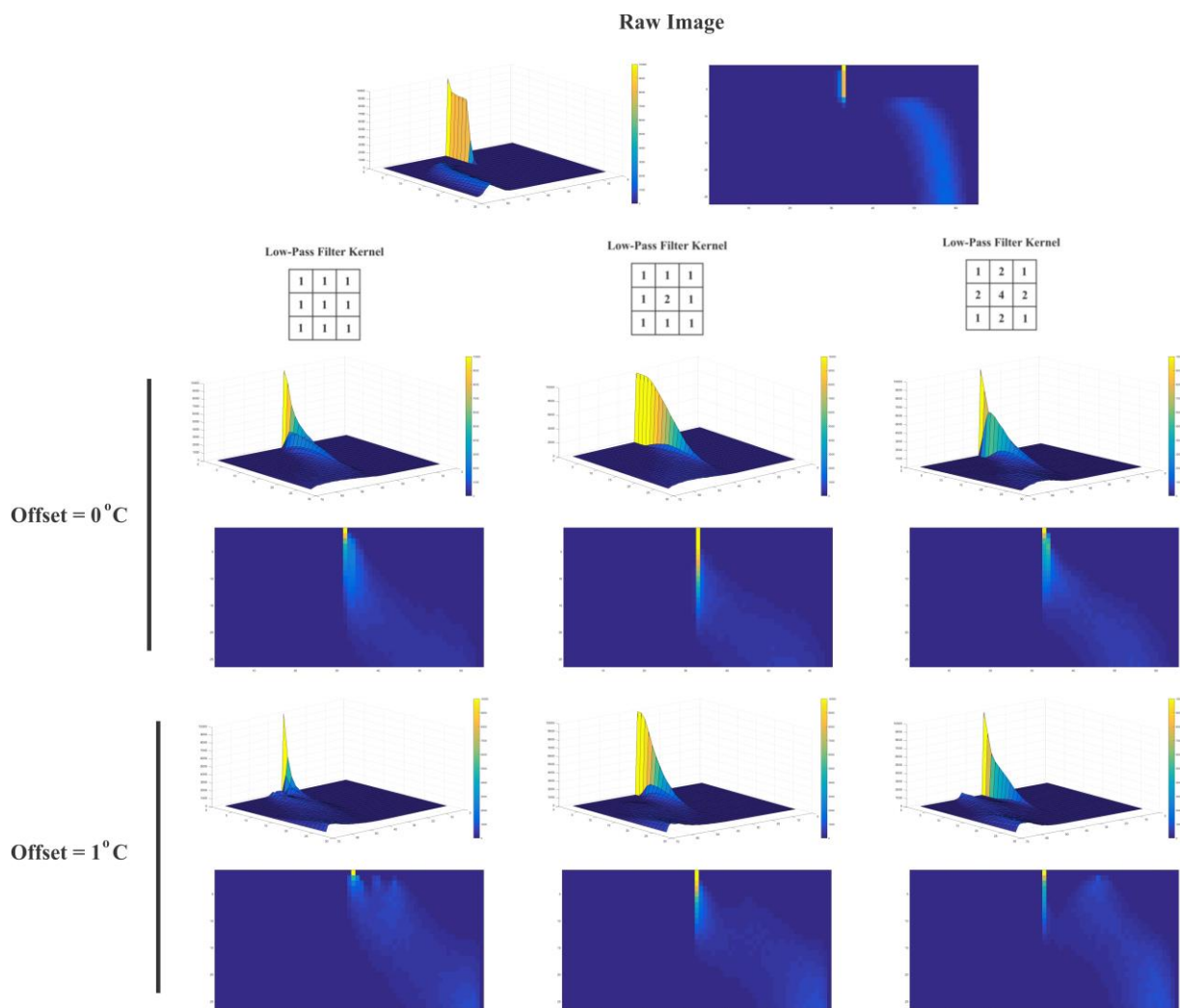
$HYST_{EmptyPots}$ дефинира броя на празните хистограмни секции в 3D хистограмата, за които по време на теста са открити обекти без такъв размер. $HYST_{AllPots}$ дефинира общия брой секции с възможен размер на обекта в 3D хистограмата. $N_{NoiseSteps}$ дефинира броя на нивата на приложения топлинен шум. Получената 3D диаграма на повърхността за този критерий за оптимизация е показана на Фиг. 60. Както може да се види, тя има сложна триизмерна форма, но се наблюдава, че оптималната производителност за откриване на обект се постига при градиентен праг в диапазона $[4.0^{\circ}\text{C} \dots 6.0^{\circ}\text{C}]$ и стойност на отместването в диапазона $[1.5^{\circ}\text{C} \dots 3.5^{\circ}\text{C}]$. От тези проведени тестове бе заключено, че оптималната стойност на градиентния праг трябва да бъде в рамките на диапазона:

$$TH_{opt} = (0.6 \div 0.8) * (Temp_{ObjectContour} - Temp_{Background}) \quad (23)$$

Оптималната стойност на отместването трябва да бъде в диапазона:

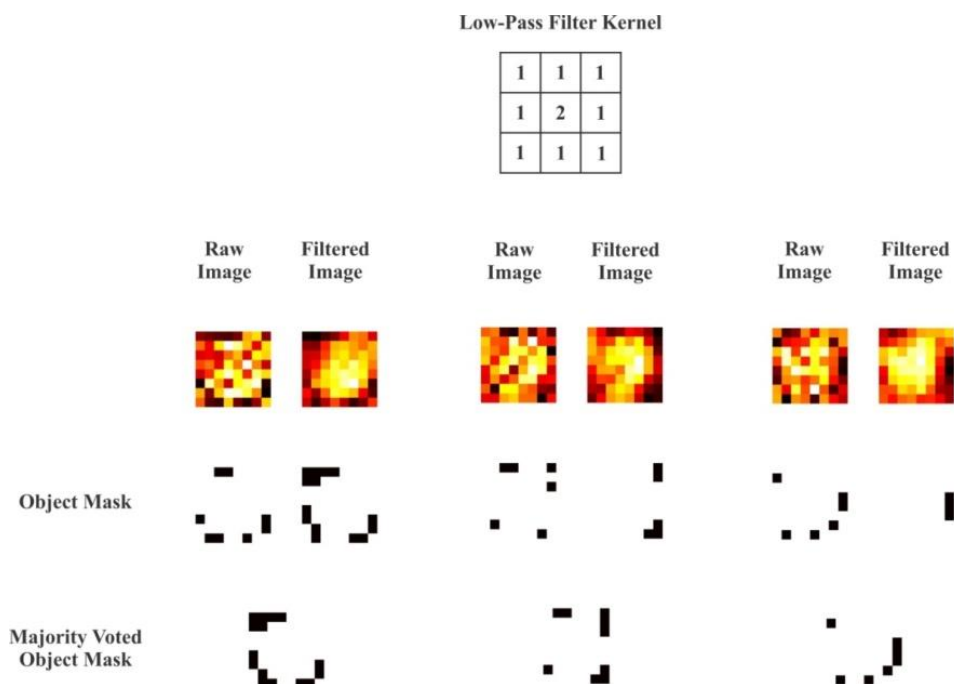
$$OFFSET_{opt} = (1.1 \div 2.7) * (Temp_{ObjectAverage} - Temp_{ColdSpot}) \quad (24)$$

Освен това бе извършена статистическа оценка при прилагане на три нискочестотни филтъра при прагова стойност, фиксирана на 5.0°C и за две различни стойности на отместването. Резултатите от този тест са показани на Фиг. 64.



Фиг. 64. Статистическа оценка на влиянието на три различни нискочестотни филтрации върху точността на обектно детектиране

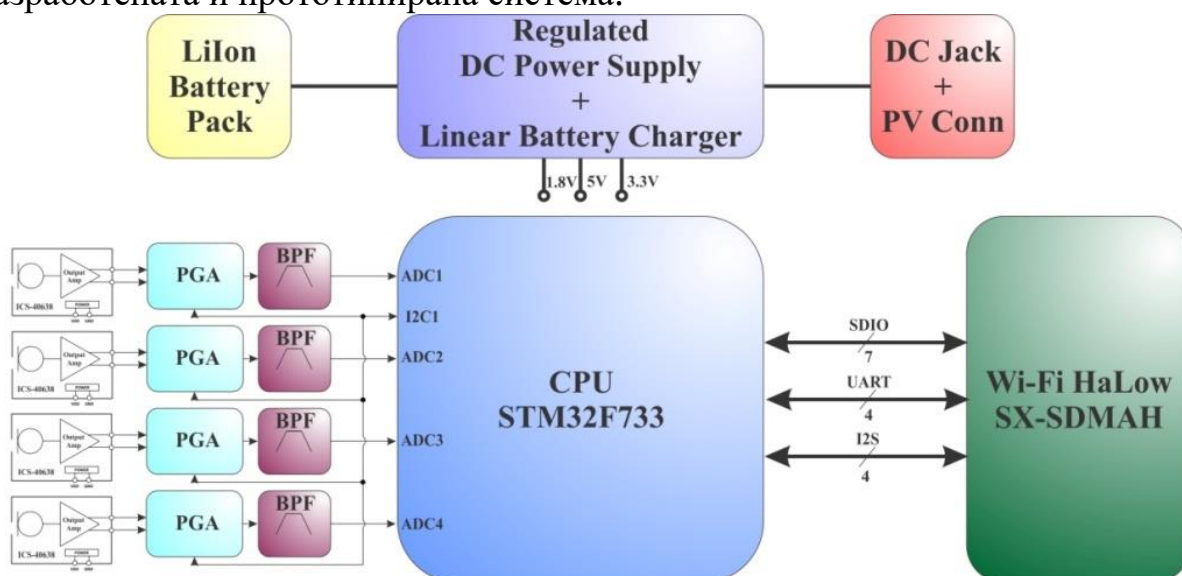
Нов метод, предложен в тази изследователска работа, е откриване на обект въз основа на мажоритарно гласуване. Тази методология се вдъхновява от методите на ансамбъла в машинното обучение, където множество класифициращи или регресионни модули гласуват за стойността на предиктора и се прилага политика за гласуване с мнозинство. Предложеният тук метод е означен като мажоритарно-гласувана обектна маска и се изчислява въз основа на маските, генерирани за необработеното топлинно изображение и една или повече филтрирани версии на изображението. Фиг. 65 показва графично резултатите от теста.



Фиг. 65. Мажоритарно-гласувана обектна маска и нейното приложение

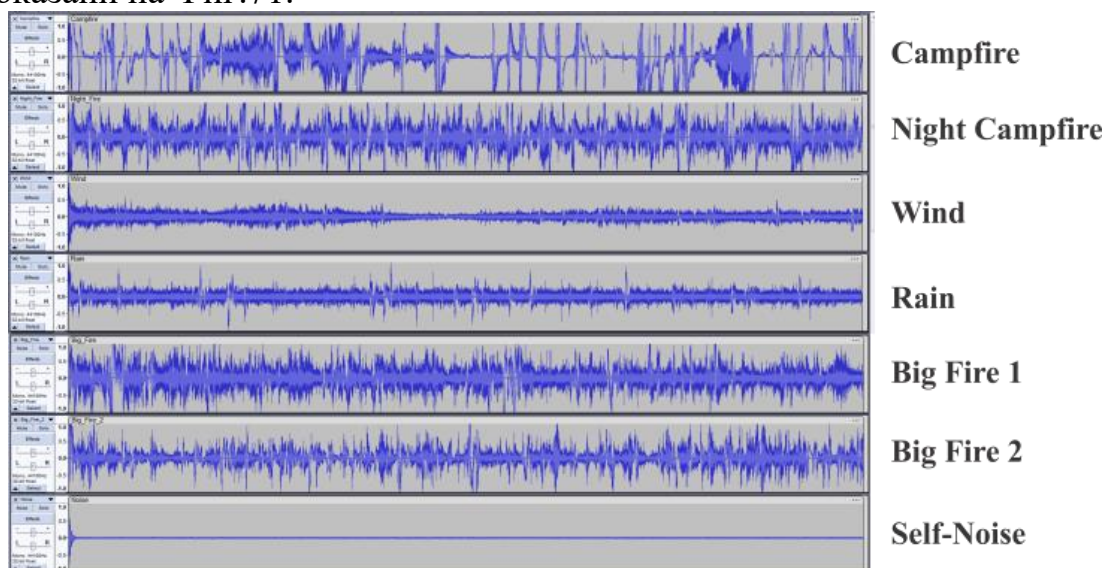
ГЛАВА 5. СИСТЕМА ЗА ДЕТЕКТИРАНЕ НА ГОРСКИ ПОЖАРИ

Разработената система е насочена към създаване на IoT сензорно устройство, което да улавя в реално време акустичните вълни от заобикалящата го среда с няколко микрофона и да прехвърля данните през установен Wi-FiHaLow безжичен комуникационен канал. Аудио данните могат да бъдат допълнително съхранени и анализирани в реално време от страна на сървър - чрез прилагане на методи за спектрална идентификация, насочени към разграничаване на пожарни от непожарни събития, въз основа на техния аудио профил (сигнатура). Фиг.67 показва блокова диаграма на разработената и прототипирана система.



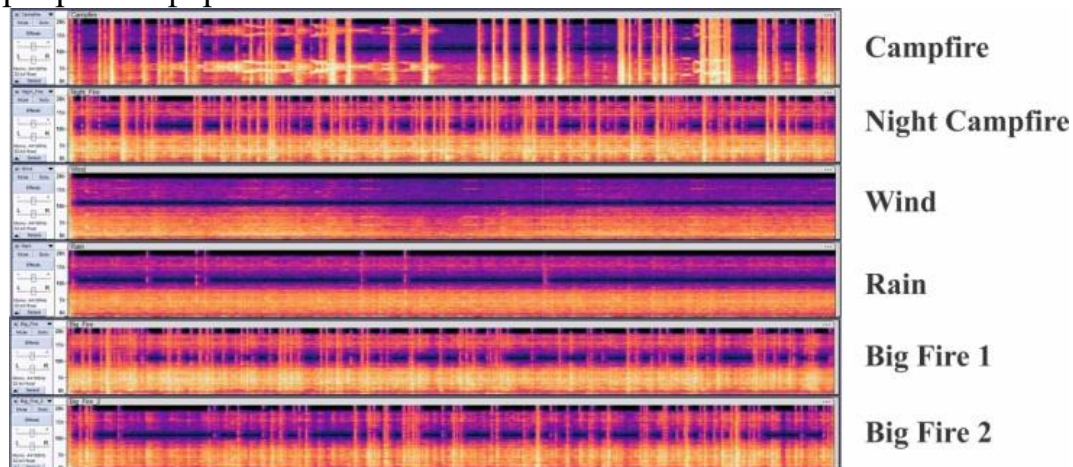
Фиг. 67. Блокова диаграма на разработената система за акустично детектиране на горски пожари

За да бъде тествана, оценена и валидирана функционалността на разработената система, са извършени няколко предварителни теста на място. Измерванията бяха насочени към улавяне на аудио звуци от различна околна среда. Бяха снети звуците от лагерен огън, нощен лагерен огън, горска среда с присъствие на вятър, дъжд и два по-големи контролирани пожари. Разработената система е поставена в относително непосредствена близост от 5m до изградените лагерни огньове и на разстояние 10m до по-големите контролирани огньове. Получените сурови аудио данни са филтрирани и бе приложена корекция на нелинейността на микрофоните. Резултатните записи са показани на Фиг.71.

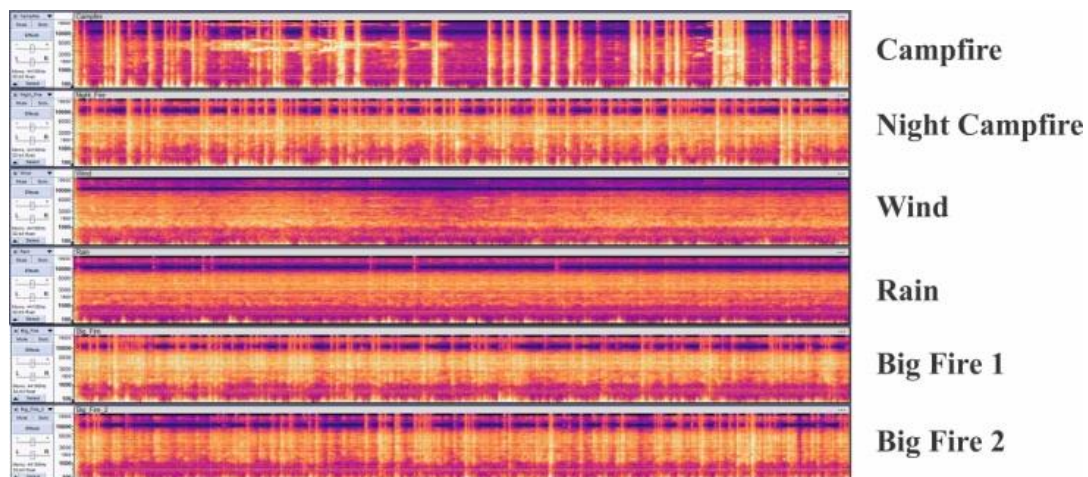


Фиг. 71. Филтрирани и коригирани аудиозаписи

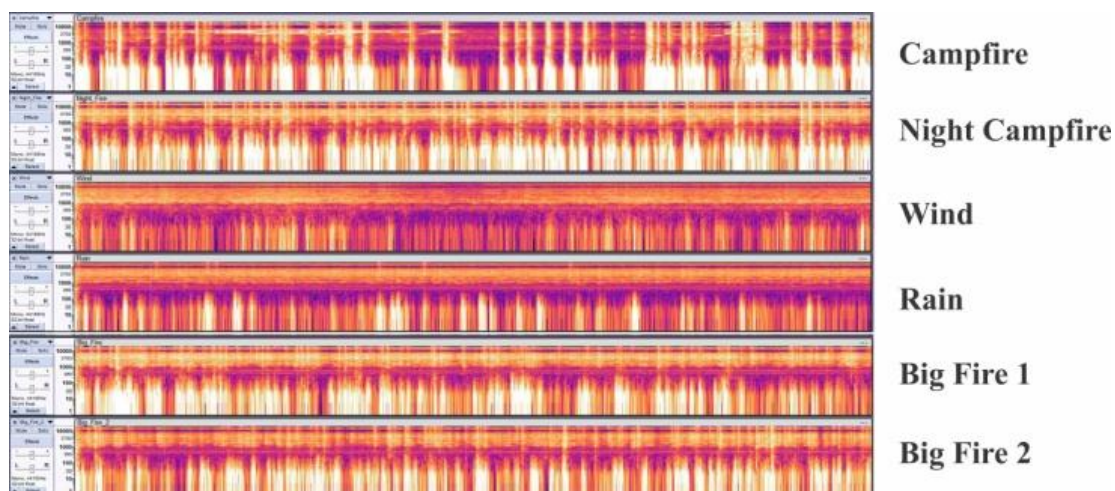
За да се оценят спектралните характеристики на заснетите аудиозаписи за различните събития, данните са визуализирани в линеен, логаритмичен и Mel спектрограмен формат.



Фиг. 72. Линеини спектрограми на заснетите аудиозаписи

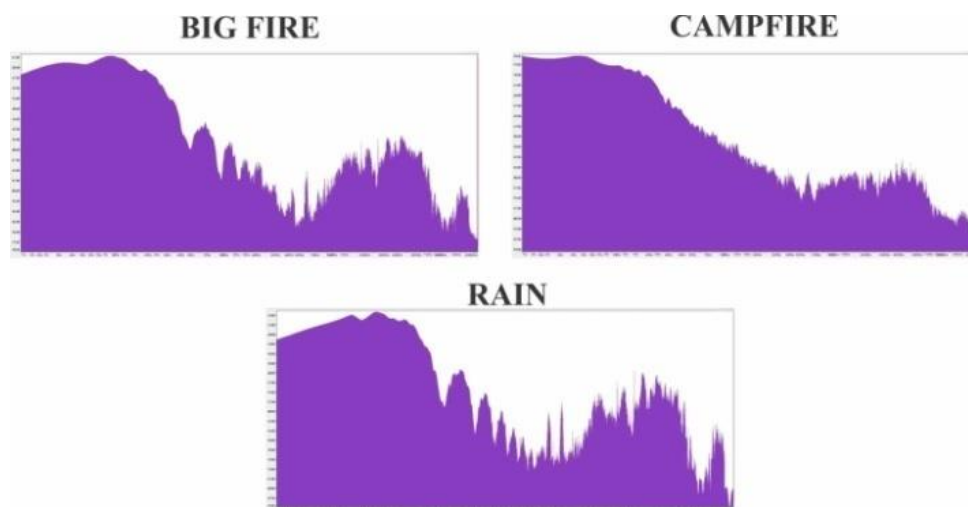


Фиг. 73. Mel спектрограми на заснетите аудиозаписи



Фиг. 74. Логаритмични спектрограми на заснетите аудиозаписи

За да се оцени дали резултатният спектър на уловените пожарни и непожарни събития е близък до този на данните, докладвани в предишни научни публикации, бе извършен FFT анализ върху уловените акустични звуци. Резултатите за логаритмичния FFT спектър са показани съответно на Фиг.75.



Фиг. 75. Логаритмичен спектър на уловените акустични вълни

Извършеният анализ показва, че данните от спектъра, получени чрез FFT, са в съответствие с резултатите от предходни научни трудове. В спектъра има видима форма на двойна камбановидна крива, като разликата в пиковите на камбаната е по-различима при по-големи пожари в сравнение с тази при по-малки пожари. Освен това бе потвърдено, че събитие, което не е пожар като звуци от дъжд, има сходен спектър с този на големи пожари, което ги прави по-трудни за разграничаване. Таблица 15 и Таблица 16 представят получените измервания за нивата на уловения акустичен звук в три различни спектрални ленти при пожарни и непожарни събития.

Таблица 15. Снети средни нива на звука в три различни спектрални ленти

	BAND 1 1Hz - 1kHz	BAND 2 1kHz - 1.5kHz	BAND 3 1.5kHz - 20kHz
Big Fire	-50dB	-70dB	-63dB
Campfire	-50dB	-62dB	-60dB
Rain	-60dB	-84dB	-72dB

Таблица 16. Разлики между нивата в трите спектрални ленти

	 BAND 1 - BAND 2 	 BAND 1 - BAND 3 	 BAND 2 - BAND 3
Big Fire	20dB	13dB	7dB
Campfire	12dB	10dB	2dB
Rain	24dB	12dB	12dB

Наблюдава се, че големите пожари имат сравнително по-голяма |BAND1 - BAND2| разлика от лагерните огньове. Освен това лагерните огньове имат малка разлика |BAND2-BAND3|. За разграничаване между лагерен огън и дъжд - |BAND1 - BAND2| разликата е най-подходяща. Резултатите показват, че големите пожари имат плавно намаляване на стойностите на |BAND1-BAND2|, |BAND1-BAND3| и |BAND2 - BAND3| с разлика от приблизително 6dB. Такова постепенно намаляване на разликите в акустичните нива за 3-те оценени параметъра не се наблюдава при дъждовни събития. При дъжд може да се наблюдава, че има близка до нула разлика между |BAND1 - BAND3| и |BAND2 - BAND3|. Ето защо е предложено, че тази тенденция на затихване в стойностите на трите параметъра е показателна за наличието на голям пожар. Същевременно при много малка разлика между |BAND1 - BAND3| и |BAND2 - BAND3|, както и при липсата на постепенно намаляване в стойностите на параметрите, може да се разграничи дъждовно събитие. Изследванията

показаха, че оценяването на разликата между уловените звукови нива при пиковите на нискочестотните и високочестотните камбановидни тренд линии не е достатъчно прецизна метрика за разграничаване между пожарни и непожарни събития.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси

1. Разработена и изследвана подобрена система за инфрачервено измерване на температурата, интегрираща технологии за компенсиране на паразитни ефекти.
2. Разработен и изследван алгоритъм за автоматично откриване на обекти в инфрачервени топлинни изображения, подходящ за вградени системи с малък изчислителен ресурс.

Приложни приноси

1. Разработена и изследвана Power-over-Ethernet термографска IoT система за неинвазивна диагностика на селскостопански животни.
2. Предложена концепция за автоматизиран мониториращ стенд за термична диагностика на животни.
3. Предложено устройство за портативно инфрачервено измерване на повърхностна температура и детектиране на несиметрични топлинни аномалии.
4. Разработена и проучена преносима IoT система за топлинен мониторинг, позволяваща заснемане на изображения както във видимата, така и в инфрачервения светлинен спектър.
5. Предложена и проучена методология, базирана на статистическа оценка за оптимална фина настройка на параметрите на алгоритъма за детектиране на обекти.
6. Проектирано и проучено влиянието на нискочестотно филтриране върху точността при обектно детектиране от страна на алгоритъма.
7. Проектирана и проучена нова методология, вдъхновена от AI техники за мажоритарно дефинирана обектна маска.
8. Предложена и проучена Wi-FiHaLow система за детектиране на излъчени от горски пожар акустични вълни.
9. Изследвана методология за конвертиране на заснетите аудио данни в сонограмни изображения за разграничаване между пожарни и непожарни събития.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [1] S. Rizanov, P. Yakimov, A. Stoyanova and B. Bonev, "The Role of Thermography in Cattle Smart Farming: A Review," 2022 XXXI International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET55967.2022.9920269.
- [2] S. Rizanov and P. Yakimov, "The Technological Ecosystem of Modern Wildfire Detection: A Review," 2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET59121.2023.10278698.
- [3] S. Rizanov and P. Yakimov, "WiFi HaLow Wildfire Sound Detector", 2024 XXXIII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET63133.2024.10721479
- [4] Rizanov, S., Yakimov, P., & Stoyanova, A. (2022, April). Evaluation of IR micro-grid livestock wellbeing monitoring stand. In "Journal of Physics: Conference Series" (Vol. 2256, No. 1, p. 012045). IOP Publishing.
- [5] Rizanov, S., Yakimov, P., & Todorov, D. (2023, July). IoT Infrared Imaging of Livestock Tissues Using a One-Eyed Bandit Technique. In "Lecture Notes in Networks and Systems", Vol. 694, p. 279, Springer Nature.
- [6] Rizanov, S. M., & Yakimov, P. I. (2021, September). Cattle disease detecting iot thermographic system. In 2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET) (pp. 1-6). IEEE, doi: 10.1109/ET52713.2021.9579577
- [7] Stefan Rizanov, Peter Yakimov, "Internet of Things Infrared Imaging Device for Assessing Lameness in Racehorses", In Journal "АКТА ИМЕКО" Vol. 13, No. 3, 2024 doi: 10.21014/actaimeko.v13i3.1635
- [8] Rizanov, S., Yakimov, D. Nikolov, J. Boydens, "An Embedded Cellular Automata Algorithm for Infrared Object Detection", Sozopol, 2024, ET, pp 1-6. doi:10.1109/ET63133.2024.10721561

SUMMARY

Research and advancement of electronic instruments for the development of smart agriculture and environmental protection

MSc. Stefan Milkov Rizanov

The subject of the present PhD thesis is the development of IoT systems for: 1) non-invasive infrared diagnostics of farm animals and 2) automated detection of wildfires, based on capturing fire-emitted acoustic waves and analyzing them through spectrogram analysis. The developed systems were tested in both a controlled laboratory environment and additionally on-site real testing environment. Proposed have been algorithmic and data analytical methods for the automated detection of objects in a thermal image and the distinguishing between fire and non-fire events.

Two types of thermographic diagnostic imaging systems were developed and investigated – 1) a stationary Power-over-Ethernet (PoE) micro-grid imaging device, whose targeted application is to be integrated into a farm-level sensory network with each end-node capturing in real time the surface temperature differences of a specific animal; 2) a portable thermographic imaging system, capturing both infrared and visible spectrum images and storing them locally, with the system being provided to a on-site veterinarian, with the goal of expanding his diagnostic capabilities. Investigated was the underlying mechanisms, which drive surface thermal anomalies in cows, horses and pigs. Researched was which clinical conditions are detectable by purely thermographic means and in which thermal windows do they cause temperature anomalies. Investigated was the effect of tissue thickness, genetic selection and hair covering over tissue thermal patterns. Proposed and developed was a differential One-Eyed Bandit Technique which can reduce the induced measurement errors due to tissue thermo-physical properties, changes in ambient conditions and camera-to-object distance variances. The dual band imaging device was deployed in a real farm where 228 cattle orbital temperatures were captured and statistically evaluated. Detected were animals which showed thermal anomalies and discussed was their probable cause.

Developed was a cellular automata based algorithm for detecting objects in thermal images with this algorithm being specifically designed for computationally-limited sensory end-nodes. The algorithm's resilience to thermal noise was statistically evaluated. Investigated was the influence of low-pass kernel filtering over the detection capabilities of the algorithm. Proposed was a method for voting-based object outlining based on a majority-vote from differently tuned object tracking algorithms.

The wildfire detection system captures environmental sound data and sends it upstream via a WiFi HaLow wireless link. The system was subjected to fire and non-fire events. Proposed were data analytical methods for distinguishing between events based on their unique acoustic signature both in the frequency and time domains.