



# **ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ**

---

**Факултет по телекомуникации  
Катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии”**

**маг. инж. Димитър Асенов Асенов**

## **ОПТИЧНИ МЕТОДИ ЗА ДИСТАНЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОБЕКТИ**

### **А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

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

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3. Комуникационна и компютърна  
техника

Научна специалност: Кабелни и оптични комуникационни системи

**Научен ръководител: доц. д-р Калин Димитров**

СОФИЯ , 2026г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии“ към Факултет Телекомуникации на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 16.02.2026 г. / протокол №1.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 11.05.2026 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.3-29/25.03.2026 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р инж. Снежана Георгиева Плешкова-Бекярска – председател

2. Доц. д-р инж. Иво Руменов Драганов

3. Проф. д-р инж. Димитър Ценов Димитров

4. Доц. д-р инж. Иван Динков Иванов

5. Проф. д-р инж. Емил Иванов Йончев

Рецензенти:

1. Проф. д-р инж. Снежана Георгиева Плешкова-Бекярска

2. Доц. д-р инж. Димитър Ценов Димитров

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на катедра „Технологии и мениджмънт на комуникационни системи“ към Факултет по Телекомуникации на ТУ-София, блок № 1, кабинет № 1306.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Радиокомуникации и видеотехнологии“ на факултет Телекомуникации. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Димитър Асенов Асенов

Заглавие: Оптични методи за дистанционно изследване на обекти

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

# I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

## **Актуалност на проблема**

В съвременната наука и техника оптичните методи за наблюдение и диагностика заемат все по-важно място, поради своята способност да осигуряват детайлна, неинвазивна и често в реално време информация за състоянието на различни обекти и системи. Сред тези методи особено внимание заслужават дистанционните безконтактни технологии, които позволяват високоточен анализ на физичните характеристики на повърхности и структури без необходимост от директен физически досег. Това ги прави изключително приложими в ситуации, при които е нежелателно или невъзможно да се наруши целостта на изследвания обект.

Един от най-ефективните и широко използвани методи в тази група е инфрачервената термография – техника, базирана на регистрирането и визуализацията на инфрачервеното (топлинно) излъчване, емитирано от всички тела с температура над абсолютната нула. Чрез анализ на това лъчение се създава термограма – изображение, което отразява температурното разпределение върху повърхността на изследвания обект и разкрива термичната хетерогенност на тъканите или материалите.

Инфрачервената термография се отличава с редица предимства: тя е напълно неинвазивна, безвредна, бърза, не изисква използване на контрастни вещества или радиационни източници и позволява многократно употреба без риск за пациента или обекта на изследване. Именно поради тези качества термографията намира широко приложение в редица области – от индустриалната диагностика и техническия контрол на съоръжения до биомедицината, екологията, ветеринарната медицина и спорта.

В биомедицински контекст инфрачервената термография се използва за детекция на възпалителни процеси, оценка на кръвообращението, диагностика на съдови и неврологични нарушения, както и за проследяване на възстановителни процеси след травми или хирургични интервенции. Кожната температура, която се отчита чрез този метод, е силно зависима от метаболитната активност и съдовото състояние на подлежащите тъкани, което прави термографията чувствителен индикатор за физиологични и патологични изменения в организма.

С оглед на нарастващия интерес към динамичните адаптационни и функционални реакции на човешкия организъм –

особено при физическо натоварване, стрес или въздействие на външни фактори – термографските методи се утвърждават като мощен инструмент за проследяване на времеви и пространствени температурни изменения, свързани с мускулна активация, умора, травми или тренировъчни адаптации.

Настоящото изследване се вписва именно в тази научна парадигма, като си поставя за цел да изследва възможностите на инфрачервената термография за количествен анализ и интерпретация на температурни промени в определени участъци на човешкото тяло, настъпващи при специфични физиологични условия. Чрез това се цели допринасяне към усъвършенстването на съвременните неинвазивни методи за функционална диагностика, мониторинг и оценка на физиологичното състояние на човека, което има важно значение както в научните изследвания, така и в клиничната практика и спортната медицина.

### **Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване**

**Целта на дисертацията** е да се разработи, изследва и анализира подход за дистанционно изследване на обекти чрез оптични методи. Фокусът на дисертацията е изследване на натовареността на спортисти при тренировъчна и спортна дейност. Използването на оптичен метод позволява бърза дистанционна оценка на състоянието на опорно двигателния апарат на спортистите.

#### **Задачи на дисертацията:**

1. Да се анализират възможностите на статистическите методи за обработка и интерпретация на данни от дистанционно наблюдение на обекти - спортисти, получени чрез оптична радиометрия .
2. Да се разработят алгоритми за събиране и обработка на информация за състоянието на обекти - спортисти, чрез оптична радиометрия.
3. Да се изследват експериментално разработените алгоритми за събиране и статистическа обработка на информация при дистанционно изследване на обекти - спортисти чрез оптична радиометрия.

Структурата и съдържанието на следващите глави последователно развиват тези задачи чрез теоретичен преглед, експериментални изследвания и практически предложения, насочени към усъвършенстване на приложението на оптичната радиометрия и в частност инфрачервената термография в изследваната област.

Особен акцент в дисертацията се поставя върху интегрирането на фундаментални физични модели (като закона на Планк) със съвременни статистически методи, което осигурява научна основа за надежден и обективен анализ на температурните изменения.

### **Научна новост**

Изборът на инфрачервената термография е продиктуван от нейните уникални предимства и възможността за неинвазивен мониторинг, бързина на измерванията и висока чувствителност при анализ на температурните профили.

### **Практическа приложимост**

Практическото приложение на разработката е насочено към спортната медицина, като обект на изследването са температурните характеристики на хвърлящата ръка при състезателки по хандбал.

### **Публикации**

*Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в общо пет научни публикации всички от които са докладвани на международни конференции.*

### **Структура и обем на дисертационния труд**

Дисертационният труд е в обем от 122 страници, като включва увод, 3 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 127 литературни източници, като всички са на латиница. Работата включва общо 8 фигури и 22 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

## **II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

---

### **ГЛАВА 1 - Преглед на оптични методи и средства за дистанционно изследване на обекти**

#### **1.1. Основни принципи на инфрачервената термография**

В съвременните научни изследвания и инженерни приложения оптичните методи за наблюдение, измерване и анализ на обекти заемат важно място. Те предоставят възможност за събиране на детайлна информация за повърхностните и вътрешни характеристики на различни материали и структури по неинвазивен начин.

#### **1.2. Статистически методи за обработка на резултати от инфрачервена термография**

Може да се опише Дескриптивната статистика (описателна статистика), е клон на статистиката, който се фокусира върху събирането, организирането, обобщаването и представянето на данни.

#### **1.3. Приложения**

Обстойният анализ на съвременната научна литература разкрива съществени концептуални и методологични празнини, които ограничават цялостното разбиране на разглежданата проблематика. Въпреки засиления интерес към темата в различни научни дисциплини, много от изследванията остават фрагментирани, като се фокусират върху отделни аспекти на анализа, без да се отчита комплексното взаимодействие между ключовите променливи.

#### **1.4. Изводи, цел и задачи на дисертацията**

Въпреки значителния напредък в разработването на теоретични основи и технологични решения, в съществуващата литература се открояват редица концептуални и методологични празнини. Сред основните предизвикателства се открояват липсата на унифицирани методики за избор на ключови зони и точки за наблюдение с методите на оптичната радиометрия при изследване на специфични анатомични области.

Недостатъчно са стандартизираните подходи за обработка, количествен анализ и интерпретация на термалните данни, получени с оптични методи.

Особено слабо проучена остава областта, свързана с прилагането на инфрачервената термография за мониторинг на температурни изменения в горния крайник, което ограничава възможностите за

широкото ѝ приложение при диагностика и проследяване на физиологични процеси.

Тези наблюдения ясно показват необходимостта от задълбочен теоретичен и практически анализ на съществуващите подходи, както и от разработване на нови, научно обосновани методики за термално измерване на базата на оптична радиометрия, както и определяне на ключови точки за наблюдение.

## **ГЛАВА 2 – Анализ на възможностите на статистически методи за обработка и интерпретация на данни от дистанционно наблюдение на обекти - спортисти, получени чрез оптична радиометрия**

### **2.1. Физични принципи на оптичната радиометрия при излъчване от човешко тяло**

Настоящото изследване се фокусира върху температурните промени в избрани зони на хвърлящата ръка при състезателки по хандбал. Чрез използването на термална камера изследователите се стремят да проучат как тези температурни вариации корелират с физическите натоварвания по време на тренировка, особено при хвърляния.

### **2.2. Моделиране на грешките при оптичната радиометрия**

Комбинирана неопределеност.

Ако приемем, че всички източници на грешка са независими, общата стандартна неопределеност  $u_{\text{общ}}$  е:

$$u_{\text{общ}} = \sqrt{u_{\varepsilon}^2 + u_{\text{pix}}^2 + u_{\text{геом}}^2 + u_{\text{шум}}^2 + u_{\text{дрейф}}^2} \quad (2.9)$$

където:

$u_{\text{общ}}$  – обща комбинирана стандартна неопределеност на измерването;

$u_{\varepsilon}$  – неопределеност, свързана с грешката при задаване или определяне на емисивитета на повърхността;

$u_{\text{pix}}$  – неопределеност, свързана с нееднородността на пикселите и чувствителността на детектора;

$u_{\text{геом}}$  – геометрична неопределеност, резултат от разстоянието до обекта, ъгъла на наблюдение и позиционирането на измервателната област;

$u_{\text{шум}}$  – неопределеност, свързана с електронния шум на сензора и системните смущения;

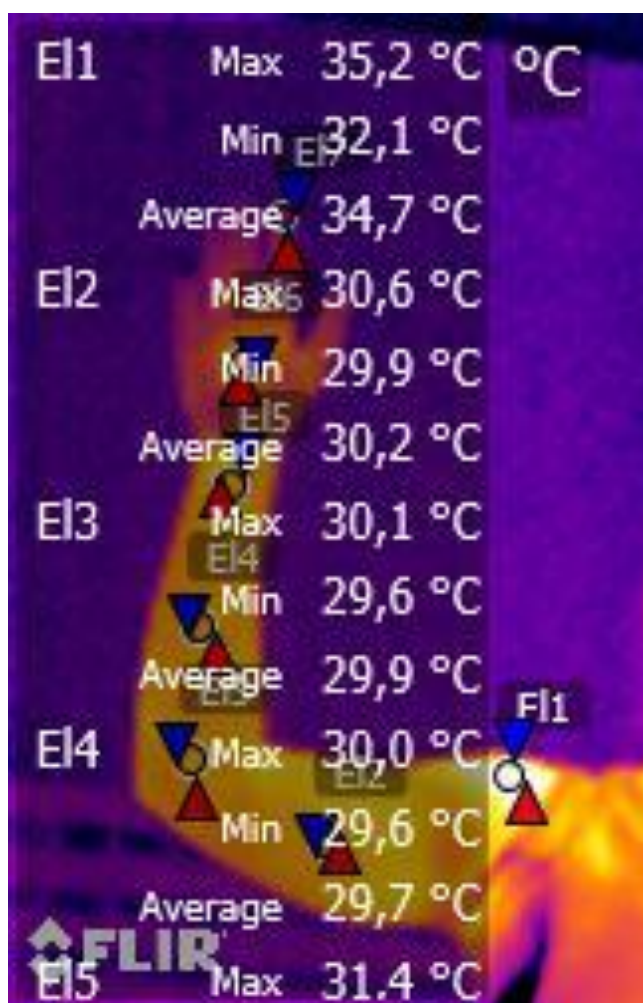
$u_{\text{дрейф}}$  – неопределеност, породена от дрейфа на системата във времето и нестабилност на калибрацията.

Получава се комбинирана неопределеност около  $0.25\text{--}0.3^\circ\text{C}$ . Това е реалната граница на точност на измерванията в разглежданите условия.

### **2.3. Избор на обекти за дистанционно измерване с оптична радиометрия**

Изследване на температурните промени в ръката на хандболистки по време на тренировка, проведено с помощта на термографска камера FLIR, показва значителни колебания в температурата в различните фази на тренировъчния процес [101]. На фигура 2.1. е представено термографско изображение на хвърлящата ръка с обозначение на региони на интерес (ROI): рамо, мишница, лакът, предмишница, китка, длан и показалец.

В началото на тренировката кожната температура на предмишницата и китката леко намалява, което се свързва с периферна вазоконстрикция (свиване на кръвоносните съдове) [102]. В хода на тренировката, вследствие на интензивни хвърляния, температурата на тези зони се повишава с  $2\text{--}3^\circ\text{C}$  [103]. Възстановителният период след тренировката показва нормализиране на температурите в рамките на 15-20 минути [104]. Тези резултати потвърждават, че инфрачервената термография може да се използва за проследяване на мускулната активност, умората и възстановителния процес при спортистите [105]. Критичен анализ на предимства и ограничения.



Фиг.2.1 Екранна снимка на програма за термично изображение на Flir tools, показваща как са разпределени интересните региони

Хандболистките представляват подходящ експериментален модел поради специфичното, едностранно и високоинтензивно натоварване на горния крайник, което създава предпоставки за ясно изразени температурни изменения, измерими чрез оптична радиометрия. Изборът на хомогенна женска група намалява влиянието на физиологични вариации, свързани с пола, и повишава статистическата надеждност на резултатите.

#### **2.4. Анализ на възможностите на статистически методи за обработка на данни, получени чрез дистанционно изследване на обекти с оптична радиометрия**

В този параграф се представя последователност от етапи (алгоритъм), чрез които се прилагат статистически методи при разработването на метод за дистанционно изследване на обекти с

термо визуална информация. Тук ще се разгледа всеки етап и математическия израз и каква е ролята му в анализа на термално измерване при избора на ключови точки за наблюдение на температурните изменения по повърхността на крайниците.

Нормализация и стандартизация - тук за всеки пиксел от термо изображението с температура  $x$  се извършва скалиране към общ диапазон. Например, при  $\min - \max$  нормализация стойността се преобразува:

$$x' = \frac{(x-x_{\min})}{(x_{\max}-x_{\min})} \quad (2.10)$$

Редукция на размерността (PCA) - особеност, след обработката на данните се прилага PCA за намаляване на размерността на характеристиките.

Ко-вариационната матрица на термо визуалните данни се изчислява като:

$$\Sigma = \left(\frac{1}{N}\right) \sum (x_i - \mu)(x_i - \mu)^T \quad (2.12)$$

след което се решава собствената задача:

$$\sum w_k = \lambda_k w_k \quad (2.13)$$

за намиране на главните компоненти  $w_k$  и съответните собствени стойности  $\lambda_k$  [107].

Надеждност на измерванията (ICC) - оценка на надеждността и повтораемостта на температурните измервания между различни условия или наблюдатели се изчислява ICC:

$$ICC = \frac{(MSB-MSW)}{(MSB+(k-1)MSW)} \quad (2.14)$$

Оценка на неопределеността - ако  $Q = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$  е изчислявана величина (например коригирана температура), а  $X_i$  са независими променливи с неопределености  $u(X_i)$ , то комбинираната неопределеност:

$$u^2(Q) \approx \sum \left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 u^2(x_i) \quad (2.15)$$

Корекция при множество сравнения (FDR) - при множество от статистически тестове вероятността за грешни открития нараства. Методът FDR (False Discovery Rate) ограничава дела на фалшивите положителни резултати.

Процедурата на Бенджамини–Хохберг за подредени р-стойности

$$p_{(1)} \leq p_{(2)} \leq \dots \leq p_{(m)} \quad (2.16)$$

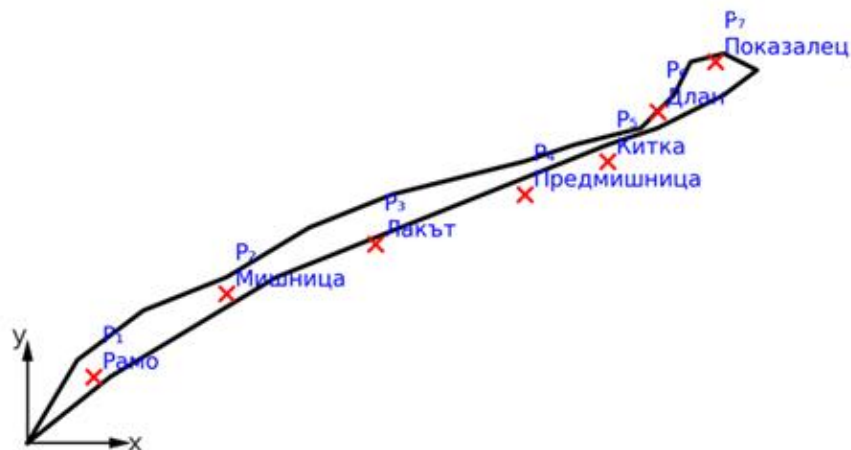
$$p_{(i)} \leq \frac{i}{m} \alpha \quad (2.17)$$

Текстурен анализ чрез GLCM - GLCM (Gray-Level Co-occurrence Matrix) описва честотата на взаимна поява на двойки пиксели с определени стойности на температура:

$$C_{\Delta x \Delta y}(i, j) \quad (2.18)$$

## 2.5. Геометричен модел на конкретен обект (хвърляща ръка) за дистанционно изследване чрез оптична радиометрия

На фиг. 2.2 е показан предложеният геометричен модел на конкретен обект (хвърляща ръка) за дистанционно изследване чрез термо визуална информация.



Фиг. 2.2. Геометричен модел на конкретен обект (хвърляща ръка) за дистанционно изследване чрез термо визуална информация

Всяка точка от геометричния модел е разгледана по долу, като се обяснява спецификата на определената точка и как тя влияе на

изменението на информацията снета от термо визуалните данни в различни времеви зони на натоварване. Този модел позволява визуализиране на пространственото разпределение на регистрираните стойности и осигурява връзка между геометрията на крайника и статистическите анализи на термо визуалните данни.

## **2.6. Планиране на експеримента**

Експериментът с термография на кожата преминава през няколко ключови етапа, за да се осигурят точни данни и значим анализ. Основният фокус е изследване на температурните промени по време на различните фази на тренировката и статистически анализ на температурните стойности по време на интензивни хвърляния. Целевата група включва студенти по хандбал от Националната спортна академия, които представляват хомогенна извадка по възраст, опит и здравословно състояние. Всички експерименти са проведени в съответствие с етичните насоки за изследвания върху хора.



Фиг.2.3. Хандбално хвърляне по време на тренировъчния процес

## **2.7. Характеристика на камерата при снемане на термална информация чрез оптична радиометрия**

Позицията на камерата (разстояние и ъгъл по отношение на ROI) може да повлияе на измерванията и трябва да се контролира. Обективът на камерата трябва да бъде поставен перпендикулярно на ROI. Въпреки че разстоянието е важен параметър за контрол, то зависи и от инфрачервената разделителна способност на камерата и ROI. Повечето от изследванията с хора регистрират измерванията на разстояния между 1 и 3 m. (фиг. 2.5). По същия начин, когато правите

термографски изображения, фокусът на камерата трябва да се регулира. Грешките в настройката на фокуса постоянно водят до грешки в изчисляването на температурата на ROI.



Фиг.2.5. Снимка от заснемането на горният крайник

## 2.8. Физиологични аспекти на терморегулацията

Промените в повърхностната температура предоставят информация за ефективността на системите, които регулират ендогенната топлина, генерирана по време на физическа активност, както и за метаболитните процеси, свързани с възстановяването на хомеостазата след упражнения. Следователно, термалното изобразяване е полезен метод за мониторинг на тези промени. Ефективността на термо регулаторната система е от съществено значение за адаптацията към натоварване, толерантността към упражненията и физическата работоспособност. Тестове с термография показват, че след началото на физическото натоварване се наблюдава спад в температурата на анализирани повърхности. По-големи спадове са отчетени в периферните части на тялото, като предмишницата, отколкото в централната област. След тренировка се наблюдава повишаване на температурата в тези зони, което вероятно се дължи на увеличен кръвен поток и метаболитна активност. За постигане на по-добри спортни резултати, скоростта на топката и точността на подаванията са от съществено значение. Те зависят от техническото ниво, скоростно-силовите качества и функционалната готовност на състезателите. Тези фактори мотивират изследването на индивидуални и групови упражнения при различни интензивности на натоварване с цел оценка на температурните промени и изграждане

на модели за повишаване ефективността на тренировъчния процес в хандбала.

## **2.9. Изводи към втора глава**

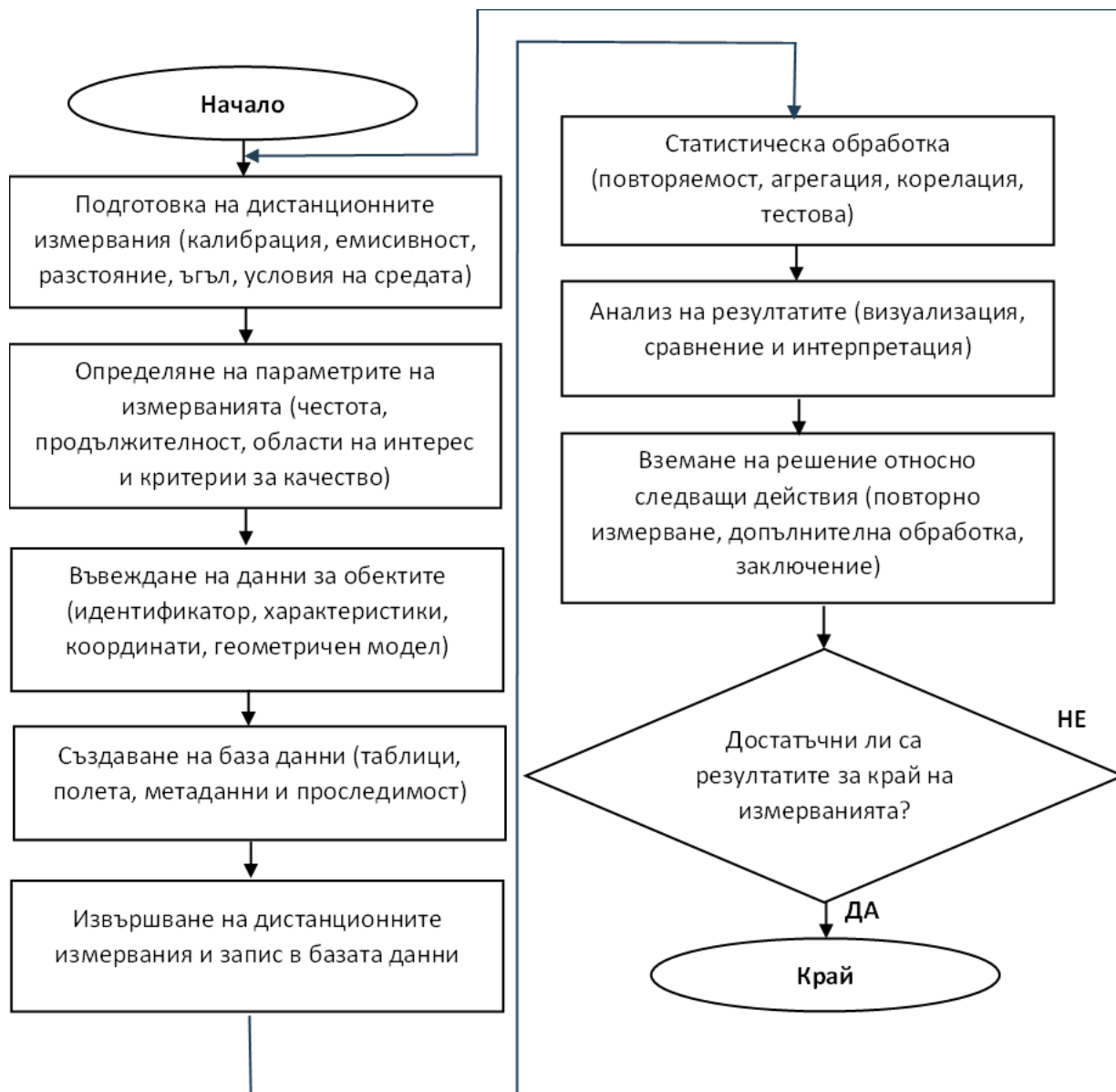
Въведен е корелационен модел за анализ на температурните зависимости между избраните зони, като се изчисляват всички възможни двойки комбинации ( $C(7,2) = 21$ ) преди, по време и след тренировъчното натоварване (формули (2.32-2.35); резултати – фиг. 2.4.

Установени са зони с най-значими температурни изменения в отговор на физическо натоварване, като предмишницата, китката и лакътната става показват отчетливо повишение на температурата по време и след тренировката. Това предполага засилена локална метаболитна активност и кръвоснабдяване, корелиращи с функционалната ангажираност по време на хвърляне.

## **ГЛАВА 3 - Алгоритми за събиране и обработка на информация за състоянието на обекти - спортисти, чрез оптична радиометрия**

### **3.1. Разработване на блокова схема на алгоритъм за събиране и статистическа обработка на термовизуална информация на базата на предложението геометричен модел за дистанционно изследване на обекти**

В настоящия параграф се представя разработването на блокова схема на алгоритъм, който описва последователността от действия при събиране, структуриране и статистическа обработка на термовизуална информация, получена чрез дистанционно изследване на обекти. Схемата има за цел да визуализира логическата структура на процеса и да осигури яснота относно взаимовръзките между отделните етапи — от подготовката на измерванията до анализа и интерпретацията на резултатите. Алгоритъмът е изграден върху предложението геометричен модел, който определя пространствените зависимости между термовизионната камера и изследвания обект. Той отчита параметри като разстояние, ъгъл на наблюдение и поле на зрение, като гарантира съпоставимост на резултатите при различни условия. Геометричният модел е основата, върху която се дефинират точките на измерване, границите на наблюдение и пространствените корекции при обработка на данните. Блоквата схема е структурирана в логическа последователност, която включва всички ключови етапи на процеса: инициализация и подготовка на дистанционните измервания.



Фиг. 3.1 Блокова схема на алгоритъм за събиране и статистическа обработка на термовизуална информация при дистанционно изследване на обекти

### 3.2. Разработване на подходяща структура на базата данни за събиране на термо визуалната информация с цел статистическа обработка при дистанционно изследване на обекти

В Таблица 3.1 е представен примерен елемент от предложената структура на базата данни, подходяща за събиране на термо визуалната информация с цел статистическа обработка при дистанционно изследване на обекти (хвърляща ръка).

Таблица 3.1 примерен елемент от предложената структура на базата данни

|   |                |                |                |                |                |                |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Номер на спортиста  |                |                |                |                |                |                |
| Пореден номер на измерванията на термовизуалната информация     |                |                |                |                |                |                |
| Измервания на термовизуалната информация преди състезание       |                |                |                |                |                |                |
| p <sup>1</sup>  | p <sup>2</sup> | p <sup>3</sup> | p <sup>4</sup> | p <sup>5</sup> | p <sup>6</sup> | p <sup>7</sup> |
| Рамо  | Мишница        | Лакът          | Предкитка      | Китка          | Палец          | Показалец      |
|   |                |                |                |                |                |                |
| Измервания на термовизуалната информация по време на състезание |                |                |                |                |                |                |
| p <sup>1</sup>  | p <sup>2</sup> | p <sup>3</sup> | p <sup>4</sup> | p <sup>5</sup> | p <sup>6</sup> | p <sup>7</sup> |
| Рамо  | Мишница        | Лакът          | Предкитка      | Китка          | Палец          | Показалец      |
|   |                |                |                |                |                |                |
| Измервания на термовизуалната информация след състезание        |                |                |                |                |                |                |
| p <sup>1</sup>  | p <sup>2</sup> | p <sup>3</sup> | p <sup>4</sup> | p <sup>5</sup> | p <sup>6</sup> | p <sup>7</sup> |
| Рамо  | Мишница        | Лакът          | Предкитка      | Китка          | Палец          | Показалец      |
|   |                |                |                |                |                |                |

### 3.3. Статистически подход за анализ на резултатите от термографски измервания в тренировъчния процес на спортисти

Това изследване разглежда температурните изменения в хвърлящата ръка на състезателки по хандбал по време на тренировъчни сесии чрез използване на термална образна диагностика. Чрез прилагане на дисперсионен анализ (ANOVA) се оценява значимостта на кожните температурни вариации в различни области на ръката във времето. Целта е да се установят статистически значими разлики в температурните промени, предизвикани от физическите натоварвания при хандбални тренировки. Резултатите предоставят ценна информация за термичното натоварване в специфични зони на хвърлящата ръка, което може да допринесе за по-добри тренировъчни практики и стратегии за превенция на травми. Изследванията в областта на спортната наука и физиологията показват, че температурните изменения в различни области на тялото могат да предоставят ценна информация за мускулната активност, кръвообращението и общото състояние на спортистите по време на тренировки. В този контекст, инфрачервената термография (IRT) се утвърждава като ефективен метод за мониторинг на тези процеси, тъй като позволява неинвазивно измерване на температурните промени в реално време. В спортове като хандбала, хвърлящата ръка е една от най-натоварените части на тялото, подложена на многократни механични натоварвания и висок риск от претоварване и травми. В резултат на

интензивните движения, кожната температура в различните области на ръката може да се променя значително, което от своя страна може да служи като индикатор за физиологичното състояние на състезателите. Предишни изследвания в областта на термалната образна диагностика са се фокусирали върху измерването на температурните вариации в различни части на тялото на спортистите по време на и след физическо натоварване. Някои от тях анализират влиянието на загряването върху кожната температура, докато други се фокусират върху идентифицирането на потенциални зони с повишен риск от травми. Въпреки това, малко проучвания са насочени конкретно към термалните промени в хвърлящата ръка на хандболистките по време на тренировки[118-122].

Целта на настоящото изследване е да се разработи методика за термално измерване и анализ на ключови точки за наблюдение на температурните изменения в горния крайник на състезателките по хандбал. Чрез използването на инфрачервена термография се изследват температурните изменения в рамото, подмишницата, лакътя, предмишницата, китката, дланта и показалеца по време на тренировъчен процес. Чрез прилагане на статистически методи, включително дисперсионен анализ (ANOVA), ще се анализира значимостта на температурните вариации и ще се направят изводи за потенциалните връзки между тренировъчното натоварване и термичния стрес в различните зони на хвърлящата ръка.

### **3.4. Статистически анализ на термалните данни, получени чрез оптична радиометрия**

След заснемането на термалните изображения, получените температурни стойности се подлагат на статистическа обработка чрез дисперсионен анализ (ANOVA). Този метод се използва за сравнение на средните стойности между различни групи, за да се установи дали разликите в температурните промени между различните зони на ръката са статистически значими или се дължат на случайни вариации.

Формулата за ANOVA е:

$$F = \frac{\text{Mean square between (MSB)}}{\text{Mean square within (MSW)}} \quad (3.1)$$

Където:

- F е F-статистиката, използвана за оценка на значимостта на разликите между групите,

- MSB (Mean Square Between) е дисперсията между групите (в този случай различните зони на ръката),
- MSW (Mean Square Within) е дисперсията в рамките на всяка група .

Ако получената F-стойност е достатъчно висока, това означава, че температурните разлики между зоните на ръката са статистически значими, а не резултат от случайни фактори.

Средните квадратни отклонения (MSB и MSW) се изчисляват по следните формули:

$$MSB = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2}{k-1}, \quad (3.2)$$

$$MSW = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}{N-k}. \quad (3.3)$$

Където:

- N е броят на наблюденията във всяка група;
- $\bar{X}_i$  средната стойност на група i;
- $\bar{X}$  е общата средна стойност;
- $X_{ij}$  е индивидуално наблюдение в група i;
- N е общият брой наблюдения;
- k е броят на групите .

Тези инструменти допринасят за: Оптимизация на тренировъчните програми, ранно откриване на мускулна умора.

Това изследване разширява приложението на инфрачервената термография в спортната наука и предлага нови подходи за анализ и интерпретация на физиологичните реакции на спортистите[125-126].

## Глава 4 - Експериментални изследвания

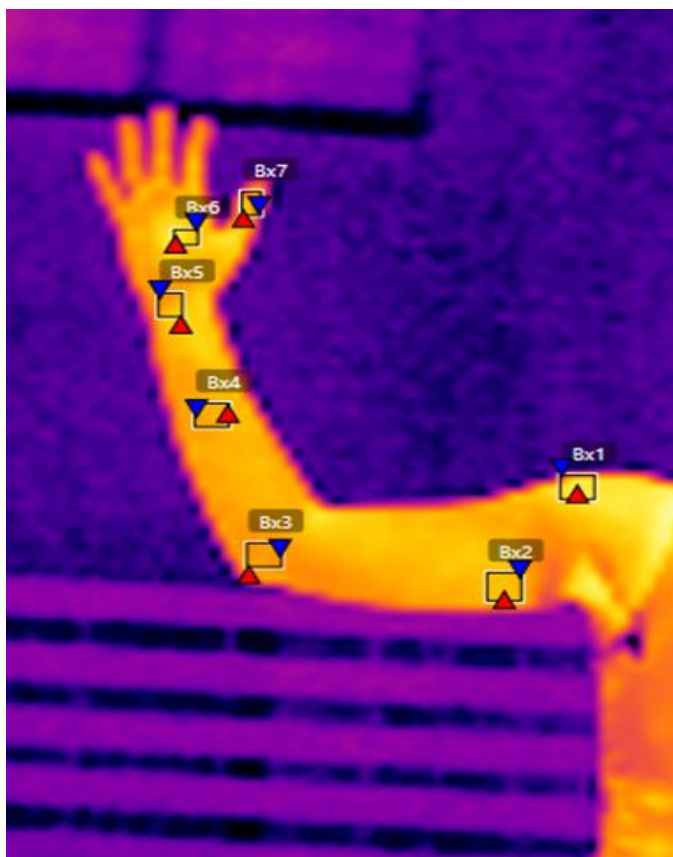
### 4.1. Анализ на експерименталните данни и статистическа обработка

В този параграф се представят експерименталните данни, събрани чрез инфрачервена термография по време на тренировъчна сесия, както и прилагането на статистически методи за тяхната

обработка и интерпретация. Основната цел е да се установи дали съществуват статистически значими разлики в температурата на различни зони от хвърлящата ръка на състезателки по хандбал, което може да бъде индикатор за мускулна активност или умора, предизвикана от тренировъчното натоварване.

Пет двойки състезателки, които извършваха по 20 хвърляния на топка помежду си по време на тренировка. По време на упражненията термокамерата заснемаше температурните изменения на хвърлящата ръка.

Регистрираните температурни стойности се анализираха, за да се установи дали настъпват значими температурни изменения, които могат да бъдат индикатор за мускулна активация или умора.



Фиг.4.1 Зони на интерес

Измерванията бяха извършени на три основни зони на хвърлящата ръка:

1. Рамо (Shoulder)
2. Лакът (Elbow)
3. Китка (Wrist)

## 4.2. Обработка на данните, снети с помощта на оптична радиометрия

Събраните данни показани в таблица 4.1 от петте двойки съзтезателки по време на тренировка бяха подложени на статистическа обработка, като първоначално бе проверено дали отговарят на изискванията за еднопосочен дисперсионен анализ (ANOVA).

| Група           | Статистика (Shapiro-Wilk) | р-стойност | Хипотеза за нормалност |
|-----------------|---------------------------|------------|------------------------|
| Група 1 (Рамо)  | 0.9839                    | 0.9826     | Приемаме нормалност    |
| Група 2 (Лакът) | 0.9503                    | 0.6726     | Приемаме нормалност    |
| Група 3 (Китка) | 0.9283                    | 0.4321     | Приемаме нормалност    |

Таблица 4.1. Shapiro-Wilk тест за нормалност на разпределението.

Независимост на наблюденията – Температурните стойности бяха събрани отделно за всяка зона на ръката, без влияние между тях.

Нормалност на разпределението – Оценена чрез Shapiro-Wilk теста.  
Хомогенност на дисперсиите – Проверена чрез Levene's теста.

Резултатите показват, че данните следват нормално разпределение, което е предпоставка за коректното прилагане на дисперсионния анализ (ANOVA). В контекста на еднопосочния дисперсионен анализ (ANOVA) се формулираха следните статистически хипотези: - Нулева хипотеза ( $H_0$ ): Средните температури на рамото, лакътя и китката са равни, което означава, че няма статистически значими разлики между термалните стойности в изследваните зони след приключване на физическото натоварване. Алтернативна хипотеза ( $H_1$ ): - Поне една от изследваните зони има средна температура, която се различава значимо от останалите, което предполага, че упражнението е оказало различна степен на влияние върху тези области и е довело до вариации в кожната температура. Получената F-стойност от анализа е 9.6133, а съответната р-стойност

е 0.0007. Тези резултати недвусмислено показват, че съществува статистически значима разлика в средните температури между трите анатомични области – рамо, лакът и китка.

Високата F-стойност (9.6133) демонстрира, че дисперсията между групите (т.е. между различните зони на ръката) е значително по-голяма от вътрешногруповата дисперсия, което свидетелства за ясно изразени температурни различия, които не могат да бъдат обяснени със случайни фактори.

Ниската p-стойност (0.0007) е под общоприетите нива на значимост – 0.05 и дори 0.01, което позволява с високо ниво на сигурност да се отхвърли нулевата хипотеза. Това означава, че поне една от зоните (рамо, лакът или китка) показва статистически значимо отклонение в температурата в сравнение с останалите, в резултат на извършената физическа активност.

#### **4.3. Експериментални измервания на група от спортисти за създаване на база данни от термо визуални измервания**

Базата данни включва 10 състезателки по хандбал показани в таблици от 4.2 до 4.11, при които са регистрирани средните температури в седем анатомични зони на хвърлящата ръка – рамо, мишница, лакът, предмишница, китка, длан и показалец – в три етапа от тренировъчния процес: преди натоварване ( $t_0$ ), по време на натоварване ( $t_1$ ) и след натоварване ( $t_2$ ). Измерванията са извършени с инфрачервена камера FLIR E40 при контролирани условия в спортна зала с постоянна температура и без външни атмосферни влияния. За всяка зона е използвана само средната температурна стойност, което елиминира ефекта на случайни локални пикове ( $T_{max}$  и  $T_{min}$ ) и осигурява по-висока надеждност и повторяемост на данните. Прилагането на инфрачервената термография в изследването на хвърлящата ръка при хандбалистки има съществена научна и практическа значимост. Хандбалът е високоинтензивен и силно динамичен спорт, изискващ повтарящи се експлозивни движения на горния крайник, свързани с високи механични натоварвания върху мускулно-скелетните структури на раменния пояс и ръката. В резултат на това настъпват изменения в периферната терморегулация, отразяващи физиологични процеси като увеличена мускулна активност, промени в локалното кръвообращение, натрупване на умора и потенциален риск от пренатоварване.

Таблица 4.2

|   |                           |                         |                              |                         |                         |                             |
|---|---------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Номер на спортиста- 1   |                           |                         |                              |                         |                         |                             |
| Пореден номер на измерванията на термовизуалната информация     |                           |                         |                              |                         |                         |                             |
| Измервания на термовизуалната информация преди състезание       |                           |                         |                              |                         |                         |                             |
| р <sup>1</sup><br>Рамо  | р <sup>2</sup><br>Мишница | р <sup>3</sup><br>Лакът | р <sup>4</sup><br>Пред китка | р <sup>5</sup><br>Китка | р <sup>6</sup><br>Палец | р <sup>7</sup><br>Показалец |
| 33,5  | 30                        | 29,6                    | 29,9                         | 30,5                    | 30,6                    | 27,3                        |
| Измервания на термовизуалната информация по време на състезание |                           |                         |                              |                         |                         |                             |
| р <sup>1</sup><br>Рамо  | р <sup>2</sup><br>Мишница | р <sup>3</sup><br>Лакът | р <sup>4</sup><br>Пред китка | р <sup>5</sup><br>Китка | р <sup>6</sup><br>Палец | р <sup>7</sup><br>Показалец |
| 33,2  | 29,6                      | 30,1                    | 30                           | 30,6                    | 30,5                    | 30,3                        |
| Измервания на термовизуалната информация след състезание        |                           |                         |                              |                         |                         |                             |
| р <sup>1</sup><br>Рамо  | р <sup>2</sup><br>Мишница | р <sup>3</sup><br>Лакът | р <sup>4</sup><br>Пред китка | р <sup>5</sup><br>Китка | р <sup>6</sup><br>Палец | р <sup>7</sup><br>Показалец |
| 33,5  | 30,6                      | 30,9                    | 30                           | 31                      | 31,1                    | 27,9                        |

Таблица 4.3

|   |                           |                         |                              |                         |                         |                             |
|---|---------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Номер на спортиста - 2                                      |                           |                         |                              |                         |                         |                             |
| Пореден номер на измерванията на термовизуалната информация |                           |                         |                              |                         |                         |                             |
| Измервания на термовизуалната информация преди състезание   |                           |                         |                              |                         |                         |                             |
| р <sup>1</sup><br>Рамо                                      | р <sup>2</sup><br>Мишница | р <sup>3</sup><br>Лакът | р <sup>4</sup><br>Пред китка | р <sup>5</sup><br>Китка | р <sup>6</sup><br>Палец | р <sup>7</sup><br>Показалец |
| 31,1  | 30,2                      | 29,1                    | 29,8                         | 30,9                    | 31,4                    | 24,2                        |

| Измервания на термовизуалната информация по време на състезание |                           |                         |                                 |                         |                         |                             |
|---|---------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Р <sup>1</sup><br>Рамо  | Р <sup>2</sup><br>Мишница | Р <sup>3</sup><br>Лакът | Р <sup>4</sup><br>Пред<br>китка | Р <sup>5</sup><br>Китка | Р <sup>6</sup><br>Палец | Р <sup>7</sup><br>Показалец |
| 30,8  | 30,3                      | 28,7                    | 29,7                            | 30,5                    | 31,1                    | 34,4                        |
| Измервания на термовизуалната информация след състезание        |                           |                         |                                 |                         |                         |                             |
| Р <sup>1</sup><br>Рамо  | Р <sup>2</sup><br>Мишница | Р <sup>3</sup><br>Лакът | Р <sup>4</sup><br>Пред<br>китка | Р <sup>5</sup><br>Китка | Р <sup>6</sup><br>Палец | Р <sup>7</sup><br>Показалец |
| 31,4  | 29,5                      | 27,4                    | 29,1                            | 30,2                    | 30,6                    | 25,6                        |

#### 4.4. Определяне на надеждността на проведените експериментални измервания на група от спортисти при създаване на база данни от термовизуални измервания, чрез комбинирана стандартна неопределеност

В целия набор от измервания за десетте изследвани спортисти беше извършено сравнение на термовизуалните стойности в трите времеви момента на регистрацията – преди, по време и след тренировъчното натоварване. За да се оцени надеждността и значимостта на наблюдаваните температурни изменения, към измерените температури във всяка от зоните на интерес е приложен моделът за комбинирана стандартна неопределеност на измерването, дефиниран в Глава 2 и описан чрез формула (2.9).

Комбинираната неопределеност обединява основните източници на грешка при термографското измерване и позволява да се определи дали регистрираните температурни промени надвишават границите на метода. За всяка зона на интерес ( $P^1-P^7$ ) и за всеки спортист е изчислена комбинираната неопределеност  $u_{\text{общ}}$ , която в условията на настоящото изследване е приблизително постоянна и има стойност:

$$u_{\text{общ}} \approx 0.25^\circ\text{C}.$$

#### 4.5. Сравнителна оценка на резултатите от проведените експериментални измервания на група от спортисти при

## създаване на база данни от термовизуални измервания, чрез определената стойност на надеждност с помощта комбинирана стандартна неопределеност

За целите на настоящото изследване беше извършена предварителна обработка и анализ на събраните термовизуални данни, като основен акцент беше поставен върху осигуряването на висока повтаряемост и надеждност на измерванията. Чрез комбинираната стандартна неопределеност бяха оценени влиянията на ключови фактори като условия на околната среда, позициониране на спортистите и техническите характеристики на използваната инфрачервена камера. Получената база данни позволява сравнение между различни индивиди, както и проследяване на температурните изменения в динамични натоварвания, характерни за спортната практика. Проведеният анализ създава предпоставки за обективна оценка на термографските параметри и тяхното приложение при мониторинг на тренировъчния процес и ранно откриване на физиологични изменения. В този смисъл резултатите се съгласуват с изследванията върху атакуващата игра при състезателки по хандбал в зала, където чрез обективни показатели се анализира ефективността на техниката и тактиката и се набляга на значението на систематичния мониторинг за повишаване на спортните постижения [127].

В следващите редове и таблици от 4.12 до 4.21 се предоставя анализ и заключение на база извършения анализ на термографските данни и параметри снети от тях за един обективен мониторинг и ранно откриване на физиологични изменения наблюдавано при спортистки по хандбал при натоварване .

Таблица 4.12

| Номер на спортиста- 1                                       |                |                |                |                |                |                |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Пореден номер на измерванията на термовизуалната информация |                |                |                |                |                |                |
| Измервания на термовизуалната информация преди състезание   |                |                |                |                |                |                |
| P <sup>1</sup>  | P <sup>2</sup> | P <sup>3</sup> | P <sup>4</sup> | P <sup>5</sup> | P <sup>6</sup> | P <sup>7</sup> |
| Рамо  | Мишница        | Лакът          | Пред китка     | Китка          | Палец          | Показалец      |
| 33,5  | 30             | 29,6           | 29,9           | 30,5           | 30,6           | 27,3           |

| Измервания на термовизуалната информация по време на състезание |                           |                         |                                 |                         |                         |                             |
|---|---------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| р <sup>1</sup><br>Рамо  | р <sup>2</sup><br>Мишница | р <sup>3</sup><br>Лакът | р <sup>4</sup><br>Пред<br>китка | р <sup>5</sup><br>Китка | р <sup>6</sup><br>Палец | р <sup>7</sup><br>Показалец |
| 33,2  | 29,6                      | 30,1                    | 30                              | 30,6                    | 30,5                    | 30,3                        |
| Измервания на термовизуалната информация след състезание        |                           |                         |                                 |                         |                         |                             |
| р <sup>1</sup><br>Рамо  | р <sup>2</sup><br>Мишница | р <sup>3</sup><br>Лакът | р <sup>4</sup><br>Пред<br>китка | р <sup>5</sup><br>Китка | р <sup>6</sup><br>Палец | р <sup>7</sup><br>Показалец |
| 33,5  | 30,6                      | 30,9                    | 30                              | 31                      | 31,1                    | 27,9                        |
| комбинирана неопределеност иобщ (°C)                            |                           |                         |                                 |                         |                         |                             |
| 0,25  | 0,25                      | 0,25                    | 0,25                            | 0,25                    | 0,25                    | 0,25                        |

Таблица 4.13

| Номер на спортиста - 2  |                           |                         |                                 |                         |                         |                             |
|---|---------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Пореден номер на измерванията на термовизуалната информация     |                           |                         |                                 |                         |                         |                             |
| Измервания на термовизуалната информация преди състезание       |                           |                         |                                 |                         |                         |                             |
| р <sup>1</sup><br>Рамо  | р <sup>2</sup><br>Мишница | р <sup>3</sup><br>Лакът | р <sup>4</sup><br>Пред<br>китка | р <sup>5</sup><br>Китка | р <sup>6</sup><br>Палец | р <sup>7</sup><br>Показалец |
| 31,1  | 30,2                      | 29,1                    | 29,8                            | 30,9                    | 31,4                    | 24,2                        |
| Измервания на термовизуалната информация по време на състезание |                           |                         |                                 |                         |                         |                             |
| р <sup>1</sup><br>Рамо  | р <sup>2</sup><br>Мишница | р <sup>3</sup><br>Лакът | р <sup>4</sup><br>Пред<br>китка | р <sup>5</sup><br>Китка | р <sup>6</sup><br>Палец | р <sup>7</sup><br>Показалец |
| 30,8  | 30,3                      | 28,7                    | 29,7                            | 30,5                    | 31,1                    | 34,4                        |
| Измервания на термовизуалната информация след състезание        |                           |                         |                                 |                         |                         |                             |

| р <sup>1</sup><br>Рамо               | р <sup>2</sup><br>Мишница | р <sup>3</sup><br>Лакът | р <sup>4</sup><br>Пред<br>китка | р <sup>5</sup><br>Китка | р <sup>6</sup><br>Палец | р <sup>7</sup><br>Показалец |
|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 31,4                                 | 29,5                      | 27,4                    | 29,1                            | 30,2                    | 30,6                    | 25,6                        |
| комбинирана неопределеност иобщ (°C) |                           |                         |                                 |                         |                         |                             |
| 0,25                                 | 0,25                      | 0,25                    | 0,25                            | 0,25                    | 0,25                    | 0,25                        |

На базата на термовизуалните измервания и приета комбинирана неопределеност на метода  $u_{\text{общ}} \approx 0,25^{\circ}\text{C}$  за всички зони и всички спортисти беше извършено сравнение на температурните промени в трите експериментални момента – преди, по време и след състезанието. Като критерий за значимост на измененията беше използван прагът  $|\Delta T| > u_{\text{общ}}$ . Анализът показва, че при Спортист №1 се регистрира най-голям брой зони с значимо повишаване на температурата след състезанието спрямо началното състояние, както и най-голяма сума от положителните температурни промени в зоните  $P^2-P^7$ . Освен това при този спортист не се наблюдава доминиращ модел на трайно охлаждане в основните зони на интерес, за разлика от част от останалите състезатели.

В този смисъл, приетият критерий – брой и величина на значимите температурни увеличения над грешката на метода – позволява да се определи, че **Спортист №1** демонстрира най-благоприятен термичен профил на хвърлящата ръка и може да бъде разглеждан като „най-резултатен“ от гледна точка на разработената в настоящата дисертация методика за оценка на функционалната активация чрез инфрачервена термография.

## НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Предложен е подход за дистанционно изследване с оптична радиометрия и корелационен анализ на данни от обект (хвърлящата ръка на спортист).

Разработен е геометричен модел на конкретен обект (хвърляща ръка) за дистанционно изследване чрез термо визуална информация (Глава 2, параграф 2.5, фиг. 2.2, израз 2.24).

Предложена е оценка с комбинирана стандартна неопределеност (Глава 4, параграф 4.4 Таблицы 4.12 до 4.21), на резултатите, получени и събрани в синтезирана база от термо визуални данни, при провеждане на експериментални изследвания на група спортисти

#### **Приложни приноси:**

- разработен е алгоритъм за събиране на информация чрез оптична радиометрия на обекти - спортисти (Глава 3, параграф 3.1, фиг. 3.1);

- разработен е алгоритъм за обработка на термо визуална информация, базиран на статистически методи, от дистанционно изследване на обекти с методите на оптичната радиометрия

- разработване на подходяща структура на база данни за събиране на термо визуална информация с цел статистическа обработка при дистанционни изследване на обекти (Глава 3, параграф 3.2, Таблица. 3.1).

- извършено е експериментално изследване на разработения подход за дистанционно изследване на обекти с оптични методи, чрез събиране и обработка на информация от оптична радиометрия, приложен за група спортисти (Глава 4, параграф 4.3, Таблицы 4.2 до 4.11);

#### **СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

Към дисертационният труд има публикувани 5 публикации в международни конференции. Към тези публикации има 1 цитиране. Списък на публикациите:

1. Kalin Dimitrov, Emil Avramov, Milena Avramova, Dimitar Asenov "Temperature changes of selected surfaces of the throwing hand of female handball players during training, assessed by thermal imaging of skin temperature", 59th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2024), Sozopol, Bulgaria, June 28-30, 2024, Issue 1, pp. 167-170, ISSN online: 2603-3267.
2. Kalin Dimitrov, Emil Avramov, Milena Avramova, Dimitar Asenov „Application of Analysis of Variance in Evaluating Skin Temperature Changes in the Throwing Hand of Female Handball Players During

Training Using Thermal Imaging 32nd national conference with international participation TELECOM 2024 21-22 November “THE WAYS TO CONNECT THE FUTURE”

3. Kalin Dimitrov, Emil Avramov, Milena Avramova, Dimitar Asenov  
“Statistical processing of data obtained from a thermal image of the skin temperature of female handball players' throwing hand during training” 14th national conference with international participation ELECTRONICA 2024 30 May – 1 June
4. Kalin Dimitrov, Emil Avramov, Milena Avramova, Dimitar Asenov”  
Quantitative Assessment of Throwing Hand Skin Temperature in Female Handball Players Using Infrared Thermography During Training” 60th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, Ohrid, North Macedonia, June 26–28, 2025
5. Kalin Dimitrov, Dimitar Asenov, Design and Error Modeling of an Infrared Thermographic Experiment for Monitoring the Throwing Arm in Female Handball Players, 33rd National Conference with International Participation "Telecom 2025", November 20 - 21, 2025, Sofia, Bulgaria



# TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

---

## FACULTY OF TELECOMMUNICATIONS

Department of Radio communications and Video technologies

Dimitar Asenov Asenov, M.Sc.

Optical Methods for Remote Sensing of Objects

ОПТИЧНИ МЕТОДИ ЗА ДИСТАНЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОБЕКТИ

Abstract of Ph.D. Thesis

This thesis reviews In contemporary science and technology, optical methods for observation and diagnostics are playing an increasingly important role due to their ability to provide detailed, non-invasive, and often real-time information about the condition of various objects and systems. Among these methods, particular attention is given to remote non-contact technologies that allow highly accurate analysis of the physical characteristics of surfaces and structures without the need for direct physical contact. This makes them especially applicable in situations where it is undesirable or impossible to compromise the integrity of the object under investigation.

One of the most effective and widely used methods within this group is infrared thermography—a technique based on the detection and visualization of infrared (thermal) radiation emitted by all bodies with a temperature above absolute zero. Through the analysis of this radiation, a thermogram is produced—an image that reflects the temperature distribution on the surface of the examined object and reveals the thermal heterogeneity of tissues or materials.

Infrared thermography offers several advantages: it is completely non-invasive, harmless, rapid, does not require the use of contrast agents or radiation sources, and allows repeated use without risk to the patient or the object of investigation. Owing to these qualities, thermography has found wide application in numerous fields—from industrial diagnostics and technical inspection of equipment to biomedicine, ecology, veterinary medicine, and sports science.

In a biomedical context, infrared thermography is used for the detection of inflammatory processes, assessment of blood circulation, diagnosis of vascular and neurological disorders, and monitoring of recovery processes following injuries or surgical interventions. The skin temperature measured by this method is strongly dependent on the metabolic activity and vascular condition of the underlying tissues, which makes thermography a sensitive indicator of physiological and pathophysiological changes in the organism.

In view of the growing interest in the dynamic adaptive and functional responses of the human organism—particularly during physical exertion, stress, or exposure to external factors—thermographic methods are becoming established as a powerful tool for tracking temporal and spatial temperature changes associated with muscle activation, fatigue, injuries, or training adaptations.

The present study fits within this scientific paradigm and aims to investigate the potential of infrared thermography for the quantitative analysis and interpretation of

temperature changes in specific regions of the human body occurring under particular physiological conditions. In doing so, it seeks to contribute to the advancement of modern non-invasive methods for functional diagnostics, monitoring, and evaluation of human physiological status, which is of significant importance both in scientific research and in clinical practice and sports medicine.