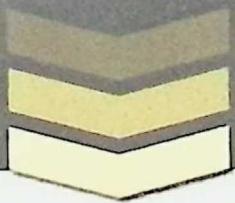


Александър Александров

БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ  
СИСТЕМИ.  
АРХИТЕКТУРА И  
КОМУНИКАЦИОННИ  
ПРОТОКОЛИ





**Александър Александров**

**БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ.  
АРХИТЕКТУРА И КОМУНИКАЦИОННИ  
ПРОТОКОЛИ**

**Alexander Alexandrov**

**WIRELESS SENSOR NETWORKS AND SYSTEMS.  
ARCHITECTURE AND COMMUNICATION PROTOCOLS**

**ЗА БУКВИТЕ  
София 2009**



**Александър Александров**

**БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ.  
АРХИТЕКТУРА И КОМУНИКАЦИОННИ  
ПРОТОКОЛИ**

**Монография**

**Академично издателство „За буквите – О писменехъ“  
София, 2023**

© Д-р инж. Александър Александров, автор, 2023  
© Проф. д-р Владимир Монов, проф. д-р Румен Трифонов,  
научни рецензенти, 2023  
© Академично издателство „За буквите – О писменехъ“, 2023  
ISBN 978-619-185-636-7  
София, 2023

# **Съдържание**

<b>ОСНОВНИ ДЕФИНИЦИИ И СЪКРАЩЕНИЯ.....</b>	<b>9</b>
<b>УВОД.....</b>	<b>13</b>
<b>ГЛАВА ПЪРВА.</b>	
<b>СЕНЗОРИ – БАЗОВИ ТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1. Архитектура на сензорите .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. Сензори за измерване на физични величини.....</b>	<b>16</b>
1.2.1. Принципи на работа .....	16
1.2.2. Класификация на сензорите .....	17
1.2.3. Приложения на сензорите за измерване на физични величини.....	21
1.2.4. Перспективи за развитие.....	24
<b>1.3. Оптични сензори .....</b>	<b>25</b>
1.3.1. Принципи на работа .....	25
1.3.2. Класификация на оптичните сензори .....	27
1.3.3. Приложения .....	28
1.3.4. Перспективи за развитие.....	29
<b>1.4. Сензори за анализ на химични процеси и съединения .....</b>	<b>30</b>
1.4.1. Принципи на работа .....	31
1.4.2. Класификация на химическите сензори .....	32
1.4.3. Приложения на химическите сензори .....	34
1.4.4. Перспективи.....	35
<b>1.5. Биоелектрични сензори .....</b>	<b>36</b>
1.5.1. Принципи на работа .....	36
1.5.2. Класификация на биоелектричните сензори.....	37
1.5.3. Приложения .....	40
1.5.4. Перспективи за развитие.....	42
<b>1.6. MEMS технология.....</b>	<b>43</b>
1.6.1. Основни принципи .....	44
1.6.2. Приложения на MEMS .....	45
1.6.3. Перспективи за развитие.....	46

<b>ГЛАВА ВТОРА.</b>	
<b>БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРИ И БЕЗЖИЧНИ</b>	
<b>СЕНЗОРНИ МРЕЖИ (WSN) .....</b>	<b>55</b>
2.1. Безжична комуникационна технология .....	56
2.2. Мрежови характеристики .....	61
2.3. Интелигентни сензорни мрежи (ISN) .....	63
2.3.1. Характеристики на ISN .....	69
2.3.2. Предизвикателства при проектирането на ISN.....	72
<b>ГЛАВА ТРЕТА.</b>	
<b>МРЕЖОВИ АРХИТЕКТУРИ И ТОПОЛОГИИ НА</b>	
<b>БЕЗЖИЧНИТЕ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ .....</b>	<b>77</b>
3.1. Мрежови архитектури.....	77
3.1.1. Архитектура клиент/сървър.....	78
3.1.2. Архитектура peer-to-peer.....	81
3.2. Мрежови топологии при безжичните сензорни мрежи.....	82
3.2.1. Топология шина (bus).....	82
3.2.2. Топология пръстен (ring) .....	83
3.2.3. Топология звезда (star) .....	84
3.2.4. Дърводидна (tree) топология .....	85
3.2.5. Топология разширена звезда (extended star) .....	86
3.2.6. Кълстерна топология.....	87
3.2.7. Mesh топология.....	88
<b>ГЛАВА ЧЕТВЪРТА.</b>	
<b>ОСНОВНИ СТАНДАРТИ ПРИ БЕЗЖИЧНИТЕ</b>	
<b>СЕНЗОРНИ МРЕЖИ.....</b>	<b>91</b>
4.1. Приложими стандарти .....	91
4.2. Стандарт IEEE 802.15.4 и протоколи за безжични	
сензорни мрежи .....	91
4.3. Стандарт 802.11ah .....	97
4.4. Стандарти ITU-T Y.4480 LoRa и LoRaWAN .....	98
4.5. Стандарти IEEE 1451.....	102
<b>ГЛАВА ПЕТА.</b>	
<b>КОМУНИКАЦИОННИ ПРОТОКОЛИ ПРИ БЕЗЖИЧНИТЕ</b>	
<b>СЕНЗОРНИ МРЕЖИ.....</b>	<b>109</b>

<b>5.1. Безжични комуникационни технологии и протоколи на физическо ниво .....</b>	<b>112</b>
<b>5.2. Протоколи за каналния (MAC) слой.....</b>	<b>127</b>
5.2.1. Основни функции .....	128
5.2.2. Базови комуникационни протоколи на каналния слой ..	128
5.2.3. Основни протоколи и стандарти на каналния слой при WSN .....	130
<b>5.3. Протоколи на мрежовия слой.....</b>	<b>131</b>
5.3.1. Основни функции .....	131
5.3.2. Изисквания към протоколите на мрежовия слой.....	132
5.3.3. Ключови протоколи на мрежовия слой при WSN .....	136
<b>5.4. Протоколи за транспортния слой (Transport Link Layer).....</b>	<b>137</b>
5.4.1. Основни функции .....	137
5.4.2. Предизвикателства за транспортния слой.....	139
5.4.3. Протоколи за контрол на трафика .....	141
5.4.4. Транспортни протоколи за контрол на надеждността ...	147
<b>5.5. Протоколи на приложния слой (Application Layer).....</b>	<b>157</b>
5.5.1. Основни функции .....	157
5.5.2. Базови комуникационни протоколи на приложния слой .....	159
<b>5.6. Методи и алгоритми за компресиране на сензорни данни .....</b>	<b>162</b>
5.6.1. Алгоритъм за компресиране LZW .....	163
5.6.2. Алгоритъм за компресиране DSC .....	165
<b>5.7. Интегриране на данни от сензорни възли .....</b>	<b>167</b>
5.7.1. Характеристика на сензорните данни в среда на WSN .....	168
5.7.2. Модел на паралелна обработка на интегрирани сензорни данни .....	177
<b>ГЛАВА ШЕСТА. УПРАВЛЕНИЕ И КОНТРОЛ НА БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ ВЪЗЛИ И МРЕЖИ .....</b>	<b>193</b>
<b>6.1. Контролни системи на безжични сензорни мрежи .....</b>	<b>193</b>
6.1.1. Мениджмънт на топологията .....	195
6.1.2. Структура на сензорен възел .....	198
6.1.3. Структура на кълстер .....	199

<b>6.2. Протоколи и алгоритми за кълстеризация на сензорни мрежи .....</b>	<b>201</b>
6.2.1. Протокол за адаптивна йерархия на кълстерите LEACH .....	202
6.2.2. Тегловен алгоритъм за кълстеризация WCA .....	203
6.2.3. Адаптивен алгоритъм за кълстеризация при ad-hock сензорни мрежи .....	205
<b>6.3. Протоколи за синхронизация при безжичните сензорни мрежи .....</b>	<b>206</b>
6.3.1. Стохастични протоколи за синхронизация .....	207
6.3.2. Адаптивни протоколи за синхронизация .....	210
<b>6.4. Локализация при безжичните сензорни мрежи.....</b>	<b>220</b>
6.4.1. Локализация и позициониране на сензорни възли .....	220
6.4.2. Основни подходи при локализация .....	224
6.4.3. Нови методи за локализация на сензорни възли на закрито.....	228
<b>6.5. Оперативна съвместимост при WSN.....</b>	<b>246</b>
6.5.1. Оперативна съвместимост при безжичните сензорни мрежи .....	247
6.5.2. Нива на оперативна съвместимост при WSN .....	247
6.5.3. Оперативна съвместимост между WSN базирани протоколи .....	251
<b>БЕЛЕЖКИ НА РЕЦЕНЗЕНТИТЕ.....</b>	<b>259</b>

## **ОСНОВНИ ДЕФИНИЦИИ И СЪКРАЩЕНИЯ**

<b>Трансдюсер (transducer)</b>	Устройство, което преобразува една форма на енергия в друга.
<b>Сензор</b>	Трансдюсер (transducer), преобразуващ физични величини в електрически сигнал.
<b>Сензорен модул</b>	Комбинация от няколко сензора, интегрирани в общ корпус и с общо електронно управление.
<b>Умен сензорен модул (smart sensor)</b>	Комбинация от сензорен елемент (transducer), микропроцесор с набор аналого-цифрови преобразуватели, позволяващ цифрова обработка на измерения сигнали, автоматично калибриране и блок за предаване на данни.
<b>Интелигентен сензорен модул (intelligent sensor)</b>	Включва в себе си дефиницията на умен (smart) сензорен модул и я допълва с блокове за анализ и адаптивни алгоритми за управление. Интелигентният сензорен модул е в състояние да взема самостоятелни решения в съответствие с измененията на околната среда.
<b>Сензорен възел (sensor node)</b>	Под сензорен възел се разбира сензорен модул, работещ като част от сензорна мрежа с вградени функции за маршрутизация на данните. Използва се в терминологията на сензорните мрежи.
<b>Сензорна мрежа (Sensor Network)</b>	Група от сензорни модули, свързани помежду си по определена топология и комуникиращи на базата на един или няколко комуникационни протокола.
<b>Безжична сензорна мрежа (WSN Wireless Sensor Network)</b>	Група от сензорни модули, свързани помежду си по определена топология и комуникиращи помежду си по радиоканал или друга безжична технология.
<b>Сензорна система (sensor system)</b>	Група от жични и безжични сензорни мрежи, измерващи различни параметри на околната среда, обединени на базата на обща платформа за интегриране на данни.

<b>IEEE 802.15.4</b>	Основен стандарт, който дефинира механизъм за реализация на безжичната комуникация, характеризираща се с относително ниска скорост на данните и ниска консумация на енергия.
<b>Received Signal Strength Indicator (RSSI)</b>	Измерва мощността на приетия сигнал в радиоканала, излъчен от IEEE 802.15.4, FSK или други трансмитери.
<b>Link Quality Indication (LQI)</b>	Показател, чрез който се измерва качеството на комуникационната среда на даден канал.
<b>Интегриране на сензорни данни (Sensor Data Fusion)</b>	Процес на интегриране на данни от различни сензори и обработката на тези данни със специално разработени алгоритми с цел повишаване на тяхната достоверност.
<b>QoS (Quality of Service)</b>	Набор от методологии, правила и технологии в комуникационната мрежа, гарантиращи качеството на дадена телекомуникационна услуга. За да се гарантира това качество, основната стратегия е имплементиране на QoS във всички мрежови компоненти и връзки.
<b>OSI (Open System Interconnection)</b>	Теоретичен модел, описващ принципния начин на комуникация и строежа на телекомуникационните и компютърните мрежи.
<b>CDMA (Code Division Multiple Access)</b>	Комуникационна технология за множествен достъп с кодово разделение на каналите, използвана в мобилните мрежи от 2-ро поколение.
<b>CSMA – CA (Carrier-sense multiple access with collision avoidance)</b>	Комуникационна технология за множествен достъп, при която се проверява комуникационният канал за вече започнато предаване на данни с цел избягване на колизии, преди да започне предаване. Комуникационният блок предава данните си само ако тази проверка е показвала, че каналът не е зает.
<b>MAC (Medium Access Control)</b>	Осигурява адресиране и достъп до контролни механизми за работа на устройства в среди на мрежи с множествен достъп.

## **Структура на монографията**

Тази монография е организирана в увод, шест глави и приложени към тях библиографии. Уводът служи за въведение в темата на монографията.

Глава първа прави обзор на базовите технологии, свързани с основни принципи на работа на сензорите и сензорните модули, както и на методи (жични и безжични) за обмен на сензорни данни.

Глава втора представя основните характеристики на безжичните сензори и свързаните с тях безжични сензорни мрежи WSN (Wireless Sensor Network) и интелигентни сензорни мрежи ISN (Intelligent Sensor Network), тяхното приложение, както и специфичните особености в процеса на проектиране.

Глава трета разглежда и анализира използваните при безжичните сензорни мрежи мрежови архитектури и топологии. В тази част са описани и основните цели на мрежовия дизайн и предизвикателствата при реализацията на WSN.

Глава четвърта представя информация относно използваните комуникационни стандарти и свързаните с тях основни комуникационни протоколи за безжичните сензорни мрежи. Направен е сравнителен анализ относно тяхната имплементация, предимства и недостатъци.

Глава пета разглежда основните комуникационни протоколи в безжичните сензорни мрежи, групирани на база OSI (Open Systems Interconnection) модификацията за WSN. Направен е анализ на специфичните особености на комуникационните протоколи обслужващи, OSI за WSN.

Глава шеста разглежда методи, протоколи и алгоритми за управление и контрол на безжични сензорни модули. Особено внимание в тази глава е обърнато на нови протоколи и методи за кълстериране и локализация на мрежови възли, разработе-

ни от автора в контекста на нарастващото разпространение на ad-hoc конфигурируемите сензорни мрежи. Включено е описание на нови, по-ефективни протоколи и алгоритми за интегриране на сензорни данни, времева синхронизация при WSN и локализация в затворени пространства.

## УВОД

Безжичните сензорни мрежи WSN (Wireless Sensor Networks) представляват множество от пространствено разпределени и взаимно свързани в мрежа безжични автономни сензори. Тези сензори съвместно предават своите данни през мрежата до основно място за анализ, интерпретация и действие.

През последните няколко десетилетия WSN претърпяха значителен технологичен напредък, което ги прави инструментални в широк спектър от приложения – от мониторинг на околната среда, здравеопазване, индустриска автоматизация до отбрана и градско планиране.

Децентрализираната природа на WSN предлага предимства в гъвкавостта, устойчивостта и скалируемостта. Въпреки това продължават да съществуват предизвикателства, особено по отношение на потреблението на енергия, сигурността на данните и ефективната обработка на данни. Безжичните сензорни мрежи са широко използвани в търговски и промишлени приложения, поради бързото технологично развитие на микропроцесорните технологии и разработката на специализирани чипове тип SoC (System on Chip) с ниска и ултраниска консумация на енергия.

В общият случай WSN е изградена предимно от безжични сензорни модули, които се използват за наблюдение на параметрите на околната среда (температура, влажност, атмосферно налягане, химически и физически състав на въздуха и водата, слънчева радиация и др.), специфични параметри, характерни за индустриски процеси (налягане, позиция, вибрации, звук, радиоактивност, осветеност, лъчения в инфра-

червения или ултравиолетовия спектър и др.) и комуникационни модули тип gateway за обмен на данни с външни системи.

Освен базовата си функционалност за измерване на физични и химични и биологични параметри, съвременните сензорни модули разполагат и с интелигентни (smart) функции благодарение на вградени микропроцесорни контролери и софтуерни алгоритми.

# ГЛАВА ПЪРВА.

## СЕНЗОРИ – БАЗОВИ ТЕХНОЛОГИИ

### 1.1. Архитектура на сензорите

Сензорите могат да бъдат разделени на няколко основни компонента:

- чувствителен елемент (сензорен елемент) – това е сърцето на сензора, което реагира на физичната величина, която трябва да бъде измерена. Например за измерване на температурата чувствителният елемент може да бъде термистор, позистор, термодвойка или инфрачервен сензор;
- преобразуваща част (трансдюсер) – тази част преобразува реакцията на чувствителния елемент в електрически или друг сигнал. Например термисторът променя съпротивлението си в зависимост от температурата, а преобразуващата част измерва този съпротивителен сигнал и го конвертира в напрежение или ток;
- измервателна част (сигнална обработка) – този компонент обработва сигнала от преобразуващата част и го предоставя на потребителя в подходящ вид. Обработката може да включва филтриране, усилване и компенсация на външни влияния;
- интерфейс (изход) – този елемент осигурява връзката между сензора и външни устройства, като микроконтролери, компютри или дисплеи. Обикновено този интерфейс е стандартизиран и предлага различни опции за връзка.

## **1.2. Сензори за измерване на физични величини**

Сензорите за измерване на физични величини са устройства, които преобразуват физични величини като температура, налягане, светлина, звук, влажност и други в електрически сигнали. Сензорите функционират въз основа на различни принципи, като съпротивление, капацитет, пиеzoелектричество и оптични ефекти. Принципът на работа зависи от конкретното физическо свойство, което се измерва.

Например термодвойките работят на база на ефекта на Seebeck [1], докато сензорите за налягане разчитат на пиеゾорезистивни материали или капацитивни промени. Разбирането на тези принципи е от съществено значение за избора и калибрирането на сензора.

### **1.2.1. Принципи на работа**

#### **Спад на съпротивление**

Този принцип се използва основно за измерване на температура. Спадът на съпротивление на материала с увеличаване на температурата може да се измерва чрез сензори като термистори и терморезистори.

#### **Пиеzoелектричен ефект**

Този принцип се използва за измерване на механични величини като налягане и сила. Материали с пиеzoелектрични свойства [2] генерират електрически сигнали, когато са подложени на механично напрежение.

#### **Капацитивен ефект**

Тези сензори измерват промените в капацитета, дължащи се на вариации във физическите свойства. Капацитивните сензорни екрани са пример за тази технология.

### **Оптични методи**

Оптичните сензори използват принципи свързани с разпространението на светлината, за да измерват различни величини, като например интензитет на светлината, цвят или дължина на вълната. Те се използват в приложения като фотодетектори [3] и сензори чувствителни към цветове (вълни с различна дължина във видимия за човека диапазон).

### **Акустични методи**

Сензорите, базирани на акустичен принцип, могат да измерват звукови вълни и ултразвукови вълни. Този тип сензори се използва в медицината за ултразвукови изображения и в промишлеността за измерване на разстояние или преместване на обекти.

### **Електромагнитни методи**

Електромагнитните сензори използват магнитни полета и индукция, за да измерват различни величини, като например магнитно поле, скорост на движение и индуктивност.

#### **1.2.2. Класификация на сензорите**

Сензорите могат да бъдат класифицирани въз основа на физическата величина, която са предназначени да измерват. Често срещаните категории включват:

##### **Температурни сензори**

Тези сензори измерват температурните вариации и се използват широко в системи за контрол на климата, промишлени процеси и научни изследвания. Температурните сензори са един от най-разпространените видове сензори за физическо измерване. Те измерват температурата, като използват топлинните свойства на материалите. Някои широко използвани видове температурни сензори включват:

– **термодвойки** – тези сензори разчитат на ефекта на Seebeck, при който напрежението в два различни проводими материала е пропорционално на температурната разлика. Термодвойките издържат на претоварване и могат да работят в широк температурен диапазон;

– **RTD (резистивни температурни детектори)** – RTD се основават на принципа, че електрическото съпротивление на материала се променя с температурата [4]. Те осигуряват висока точност и стабилност, което ги прави подходящи за прецизни приложения;

– **термистори и позистори** – термисторите и позисторите са полупроводникови устройства със съпротивление, което варира значително в зависимост от температурата. Те се използват в чувствителни към температура приложения като термостати и управление на автомобилни двигатели [5];

– **инфрачервени (IR) сензори** – безконтактен тип температурни сензори, измерващи температура чрез детекция на инфрачервено лъчение, излъчвано от обекта на измерване [6]. Обикновено се използват в приложения, при които директният контакт не е възможен.

### **Сензори за налягане**

Сензорите за налягане откриват промени в нивата на налягане и се използват в приложения като автомобилни системи, медицински устройства и индустриална автоматизация. Видовете сензори за налягане включват пиеzoелектрични сензори, ка-пацитивни сензори и сензори за измерване на напрежението.

Сензорите за налягане са жизненоважни при измерване на налягането на флуид или газ в различни приложения, включително:

– **пиезоелектрични сензори за налягане** – тези сензори генерират електрически заряд, когато са подложени на меха-

нично напрежение [7]. Разделени са на две групи – пиеорезистивни сензори и пиеоелектрични сензори. Те се използват широко в промишлени и автомобилни приложения поради тяхната чувствителност и бърза реакция;

- **капацитивни сензори за налягане** – измерват налягането чрез откриване на промени в капацитета, дължащи се на деформация [8]. Те обикновено се срещат в медицински устройства, като апарати за кръвно налягане;
- **тензометрични сензори за налягане** – измерват налягането чрез промяна на съпротивлението си при деформация (натиск или разтягане) [9]. Те са подходящи за високопрецизни измервания на налягане в промишлени и космически приложения.

### **Сензори за сила и натоварване**

Тези сензори се използват за измерване на сили и натоварвания, които са от съществено значение в инженерството, гражданските конструкции и медицинските устройства. Примери:

- тензодатчици;
- датчици за измерване на теглото;
- чувствителни към сила резистори FSR (Force Sensitive Resistor);
- пиеоелектрични сензори за натоварване.

### **Сензори за движение**

Тези сензори откриват физическо движение и обикновено се използват в системи за сигурност, игри и навигация. Някои клечови типове сензори за движение включват:

- **акселерометри** – измерват промените в скоростта или ускорението [10]. Те са широко разпространени в смартфоните и носимите устройства, за да активират функции като ориентация на экрана и броене на стъпки;

– **жироскопи** – откриват ъглова скорост и се използват за ориентация и навигация в устройства като дронове и смартфони [11];

– **инфрачервени сензори за движение** – тези сензори използват инфрачервено лъчение за откриване на движение [12], което често се среща в системи за сигурност и автоматични врати.

### **Сензори с ефект на Хол**

Сензорите с ефект на Хол са преобразуватели, които генерират промяна в напрежението (напрежение на Хол) в отговор на наличие на магнитно поле [13]. Тези сензори са широко разпространени поради способността безконтактно да измерват величината и посоката на магнитно поле.

Сензорите с ефект на Хол се създават с помощта на полупроводникови материали, където връзката между напрежението на Хол и силата на магнитното поле става по-изразена поради високата подвижност на носителите на заряд. Сензорите с ефект на Хол се използват широко в автомобилната индустрия, подпомагайки синхронизирането на запалването и впръскването на гориво, в антиблокиращи спирачни системи (ABS) и др. В промишлеността сензорите с ефект на Хол наблюдават скоростта, позицията и посоката на двигателя. Те са особено полезни в условия, при които контактните сензори биха се износили бързо поради механични натоварвания.

**Енкодери и резолвери** – това са сензори за детекция на ъглово отклонение, които се различават по принципа си на работа. Енкодерът определя ъгъла на въртене на собствената си ос. Съществуват оптични, магнитни, индуктивни, капацитетни, резистивни и дори механични видове. Резолверът е въртящ се трансформатор, който определя ъгъла и скоростта на преместване на своят ротор. Дизайнът му е подобен на ма-

лък синхронен двигател, в който броят на полюсите е пропорционален на стъпката на измерване на ъгъла.

**Оптични сензори** – оптичните сензори измерват светлина или електромагнитно излъчване и се използват в множество приложения, включително:

- **фотодиоди и фототранзистори** – тези сензори преобразуват светлината в електрически ток, което ги прави основни компоненти в чувствителни към светлина сензори [14], скенери за баркод и оптични комуникационни системи;
- **светлозависими резистори LDR (Light Drop Resistor)** – LDR са пасивни резистивни устройства, които променят съпротивлението си в зависимост от интензитета на светлината [15]. Те се използват в приложения като контрол на уличното осветление, контрол на експозицията на фотокамери и др.

### **Методи за калибиране**

Точното калибиране на сензора е от решаващо значение за получаване на надеждни измервания. Калибирането включва регулиране на изходите на сензора, за да съответстват на известни референтни стойности. Този процес гарантира точността на сензора и намалява грешките.

Методите за калибиране включват използването на референтни стандарти, математическо моделиране и техники за компенсация.

### **1.2.3. Приложения на сензорите за измерване на физични величини**

Сензорите за измерване на физични величини имат множество приложения в различни области на живота и индустрията.

## **Медицина**

Сензорите се използват за измерване на температура, кръвно налягане, пулс и други физиологични параметри. Те са от съществено значение за мониторирането на здравето на пациентите и за диагностицирането на различни заболявания. Също така могат да се използват за наблюдение на жизнените показатели, диагностично оборудване и разработване на носими здравни устройства. Примери:

- термометри за измерване на телесната температура;
- апарати за кръвно налягане;
- пулсови оксиметри за измерване на кислородната сатурация [16], [17].

## **Автомобилостроене**

Сензорите играят ключова роля в автомобилната индустрия, като измерват параметри като скорост, налягане на гумите, разстояние до обекти и други. Те подобряват безопасността и удобството на шофирането. Сензорите играят решаваща роля за безопасността на превозното средство, работата на двигателя и усъвършенстваните системи за подпомагане на водача ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) [18]. Примери:

- акселерометри за отваряне на въздушни възглавници;
- системи за следене на налягането в гумите;
- оптични сензори за откриване на близост.

## **Енергиен сектор**

В съвременните енергийни системи сензорите измерват температурата и налягането в реакторите, скоростта на вятъра във ветроелектроцентралите и консумацията на енергия в домовете и офисите.

## **Мониторинг на околната среда**

Сензорите се използват за измерване на качеството на

въздуха, качеството на водата и за мониторинг на промените в околната среда.

Примери:

- светлинни сензори за измерване на слънчевата радиация;
- сензори за времето за следене на температура и влажност;
- сензори за качество на въздуха за измерване на замърсяването.

### **Аерокосмически сектор**

Сензорите са от съществено значение за навигация, надморска височина и наблюдение на състоянието в самолети и космически кораби.

### **Индустриални процеси**

Сензорите се използват в промишлеността за контрол на производствени процеси, мониторинг на оборудване и детекция на неизправности. Те подобряват ефективността и надеждността на производството.

Примери:

- сензори за температура и налягане за управление на процесите;
- датчици за измерване на тегло;
- сензори за движение за роботика и машини.

### **Битова електроника**

В smart устройства и умните домове сензорите играят важна роля, като измерват температурата, осветеността, влажността и други параметри, за да предоставят по-добра комфортност и ефективност. Сензорите позволяват функции като сензорни екрани, отчитане на движение в игрови конзоли и биометрично разпознаване в смартфони.

#### 1.2.4. Перспективи за развитие

Основните перспективи за развитие при този вид сензори са:

- **миниатюризация** – води до създаването на по-малки, по-компактни устройства, подходящи за носими технологии, медицински импланти и IoT (Internet of Things) приложения;
- **технология MEMS** – микро-електро-механичните системи (MEMS) [19] позволяват интегрирането на сензори с микроелектроника и механика в един чип, което води до високочувствителни и прецизни сензори с намалена консумация на енергия;
- **интегриране на множество сензори** – комбинирането на множество сензори в едно устройство разширява функционалността му. Например смартфоните вече разполагат с набор от сензори, включително акселерометри, жirosкопи и сензори за околната светлина;
- **интегриране на IoT** – сензорите за физическо измерване са в основата на революцията в Интернет на нещата (IoT) [20], позволявайки събиране и анализ на данни в реално време в различни сектори, от интелигентни домове до индустриална автоматизация;
- **подобрена свързаност** – сензорите вече разполагат с опции за безжично свързване като Bluetooth [21], Wi-Fi [22] и LoRa [23], което позволява без проблемно предаване на данни и дистанционно наблюдение;
- **интегриране на изкуствен интелект** – сензорите могат да бъдат интегрирани с AI алгоритми за анализ на данни в реално време, предсказуема поддръжка и вземане на решения;
- **енергийна ефективност** – енергийноефективните сензори ще бъдат от съществено значение за устойчивото внедряване на IoT технологията;

- **квантови сензори** – квантовата технология има потенциал за още по-прецизни измервания в различни научни и индустриални приложения;
- **сигурност и доверителност** – с нарастващото повсеместно разпространение на сензорите, осигуряването на сигурност и доверителност на данните ще бъде от първостепенно значение;
- **стандартизация** – процесите за стандартизиране на сензорните технологии и комуникационните протоколи ще улеснят безпроблемната интеграция в различни системи.

### **1.3. Оптични сензори**

В настоящата монография оптичните сензори са обособени в самостоятелна група, въпреки че формално попадат в групата на сензорите, измерващи физични величини. Това се налага поради огромното разнообразие на сензорите в тази група и фундаменталния характер на светлината като медия и среда за разпространение на цифрови данни.

#### **Източници на светлина**

Различни източници на светлина, включително светодиоди и лазери, играят решаваща роля в оптичните сензори. Изборът на източник на светлина влияе върху чувствителността на сензора, спектралния обхват и границите на откриване.

#### **1.3.1. Принципи на работа**

Оптичните сензори работят на фундаменталните принципи на взаимодействието светлина–материя. Светлината, обикновено под формата на видимо, ултравиолетово или инфрачервено лъчение, взаимодейства с изследвания материал. Взаимодействието може да включва отражение, пречупване,

абсорбция, предаване или излъчване на светлина. Чрез анализиране на тези взаимодействия оптичните сензори могат да измерват различни физически свойства на материалите, които са обект на измерване.

### **Абсорбция**

Оптичните сензори, базирани на абсорбция, използват затихването на светлината, докато тя преминава през материал, за да определят концентрацията на конкретен аналит. В този контекст често се използват техники като UV-Vis (Ultraviolet-Visible) спектрофотометрия [24] и абсорбционна спектроскопия [25].

### **Флуоресценция**

Флуоресцентните сензори използват излъчването на светлина от определени материали, когато те абсорбират фотони [26]. Тази емисия може да се използва за откриване на специфични молекули в биологични, екологични и индустриални условия.

### **Пречупване и дисперсия**

Рефракционните сензори определят концентрацията на аналита чрез измерване на промените в индекса на пречупване. Те обикновено се използват при химичен анализ и анализ на биологични материали. Базираните на дисперсия сензори използват промяната в скоростта на светлината в среда, за да измерват свойства като температура и концентрация.

### **Интерферометрия**

Интерферометричните сензори [27] създават интерферентни модели, когато две или повече светлинни вълни се припокриват. Чрез измерване на промените при тези взаимодействия интерферометричните сензори могат да открият малки промени във физически параметри като разстояние или дебелина.

## Разсейване

Сензорите за разсейване на светлина измерват разсейването на светлината в течна или газова среда. Това е полезно за приложения като анализ на размера на частиците и мониторинг на околната среда.

### 1.3.2. Класификация на оптичните сензори

Оптичните сензори обхващат широк спектър от технологии, всяка от които е пригодена за конкретни приложения. Някои често срещани типове включват:

- **сензори с оптични влакна** – сензорите с оптични влакна използват оптични влакна като чувствителен елемент, което позволява дистанционни измервания с висока точност в тежки среди. Те се използват при измерване на температурата, измерване на деформация и мониторинг на околната среда;
- **фотодетектори** – фотодетекторите се използват за откриване и количествено определяне на нивата на светлина, преобразувайки оптичните сигнали в електрически сигнали. Примерите включват фотодиоди, фототранзистори и photoумножителни тръби [28];
- **спектрометри** – спектрометрите [29] разлагат светлината в нейните съставни дължини на вълните, което позволява анализа, идентифицирането и количественото определяне на различни съединения. Приложенията варират от анализ на околната среда до фармацевтичен контрол на качеството;
- **сензори за изображение** – сензорите за изображения, като CCD и CMOS сензорите [30], улавят оптична информация и я преобразуват в цифрови изображения. Те се използват широко в цифрови камери, медицински изображения и системи за наблюдение;

- **фотонни сензори** – фотонните сензори използват фотонни структури като фотонни кристали и микрорезонатори, за да манипулират светлината за сензорни цели [31]. Те се използват широко в мониторинга на околната среда и химичния анализ;
- **биофотонни сензори** – биофотонните сензори са пригодени за приложения в науките за живота, включително откриване на биомолекули, секвениране на ДНК и клетъчни изображения [32].

### 1.3.3. Приложения

Оптичните сензори имат широк спектър от приложения в различни области.

#### Мониторинг на околната среда

Оптичните сензори се използват за наблюдение на качеството на въздуха и водата, откриване на замърсители и оценка на климатичните променливи. Те играят решаваща роля в оценката на здравето на околната среда и в подкрепа на съответствието с нормативните изисквания.

#### Биомедицина и здравеопазване

В здравеопазването оптичните сензори се използват за неинвазивен мониторинг на жизнените показатели, нивата на кръвната захар и диагностика. Техники за изобразяване като оптична кохерентна томография OCT (Optical Coherence Tomography) са жизненоважни в офталмологията и кардиологията. Пулсовите оксиметри измерват насищането с кислород в кръвта, докато базираните на флуоресценция сензори могат да проследяват нивата на глюкозата, което ги прави ценни инструменти за управление на заболявания.

### **Индустриални процеси**

Индустриалните приложения включват измерване на параметри като температура, налягане и влажност. Оптичните сензори намират приложения в индустриалната автоматизация, вариращи от откриване на обекти и определяне на позиция до контрол на качеството в производството. Тези сензори повишават ефективността и безопасността в промишлените процеси.

### **Телекомуникации**

Оптичните сензори се използват широко в телекомуникациите за предаване на данни и наблюдение на мрежата. Те предлагат широка честотна лента и възможности за пренос на данни на дълги разстояния.

#### **1.3.4. Перспективи за развитие**

### **Плазмонична сетивност**

Плазмоничните сензори [33] използват повърхностен плазмонен резонанс за откриване на молекулярни взаимодействия с висока чувствителност. Тези сензори имат обещаващи резултати в откриването на лекарства и биомолекулярния анализ.

### **Квантова сензорност**

Квантовите оптични сензори [34] използват принципите на квантовата механика, за да постигнат безprecedентни нива на прецизност. Квантовите сензори, като например квантово подобрено изображение и квантова гравиметрия, революционизират области като геофизика, навигация и откриване на магнитни полета.

### **Нанофотоника и плазмоника**

Нанофотониката и плазмониката са нововъзникващи области, които предлагат потенциал за миниатюризиране на оп-

тичните сензори и подобряване на тяхната чувствителност. Наноструктурите и плазмоничните материали могат да концентрират и манипулират светлината в наномащаб, позволявайки разработването на сензори с безprecedентна резолюция и граници на откриване.

Напредъкът в нанотехнологиите доведе до разработването на миниатюрни оптични сензори, способни да откриват единични молекули. Тези сензори имат потенциала да революционизират области като диагностика и разработване на лекарства.

### **Интегрирана фотоника**

Интегрираната фотоника комбинира различни оптични компоненти в един чип, което води до компактни и рентабилни сензорни устройства. Очаква се тази технология да стимулира развитието на силно интегрирани и преносими оптични сензори за приложения при диагностика на място и мониторинг на околната среда на място.

### **1.4. Сензори за анализ на химични процеси и съединения**

Химическите сензори играят основна роля в широк спектър от приложения – от мониторинг на околната среда до контрол на промишлени процеси. Химическите сензори са аналитични устройства, които могат да откриват и определят количествено специфични химични съединения или промени в химичните свойства. Тези сензори се използват в широк спектър от приложения, включително мониторинг на околната среда, промишлени процеси, здравеопазване и отбрана.

### **1.4.1. Принципи на работа**

Химическите сензори работят въз основа на няколко фундаментални принципа, като хемосорбция, хемиредистентност, хемокапацитет и методи на оптична трансдукция. Тези принципи са в основата на способността на сензора да открива целевите анализи, като реагира на промените в околната среда.

#### **Сензори, базирани на хемосорбция**

Сензорите, базирани на хемосорбция [35], разчитат на взаимодействието между целевия анализ и повърхностния рецептор. Свързването на анализа с рецептора причинява промяна в електрическите или оптичните свойства, които могат да бъдат измерени и количествено определени.

#### **Сензори за химична устойчивост**

Сензорите за химична устойчивост наблюдават промените в електрическото съпротивление, дължащи се на химически взаимодействия [36]. Тези сензори обикновено използват чувствителен материал или покритие, което реагира на експозицията на анализа чрез промяна на неговата електрическа проводимост.

#### **Хемокапацитивни сензори**

Хемокапацитивните сензори измерват промените в капацитета на диелектричен материал в резултат на адсорбция на анализа [37]. Тези сензори се използват широко в биосензорни приложения.

#### **Методи за оптична трансдукция**

Оптичните химически сензори използват промяната в оптичните свойства, като абсорбция, флуоресценция или индекс на пречупване, когато анализа се свързва с повърхността на сензора [38]. Тези сензори предлагат висока чувствителност и надеждност.

### 1.4.2. Класификация на химическите сензори

Химическите сензори се разделят на групи, всяка от които е пригодена за конкретни приложения, като:

- **газови сензори** – газовите сензори са от решаващо значение за мониторинг на околната среда, промишлена безопасност и откриване на изтичане на газ. Те могат да откриват различни газове, включително токсични, запалими и парникови;
- **биосензори** – биосензорите се използват в здравеопазването и науките за живота за откриване на биологични молекули като протеини, ДНК и глюкоза [39]. Те са необходими за целите на диагностиката, медицинските изследвания и биотехнологиите;
- **сензори за pH** – сензорите за pH измерват киселинността или алкалността на даден разтвор и са важни за химически, фармацевтични и екологични приложения;
- **електрохимични сензори** – електрохимичните сензори измерват химичните свойства чрез електрохимични реакции. Те обикновено се използват за наблюдение на pH, концентрация на йони и редокс реакции [40];
- **наносензори** – наносензорите, изградени в наномащаб, предлагат подобрена чувствителност и селективност. Те се използват в различни приложения, включително доставка на лекарства и мониторинг на околната среда;
- **кондуктометрични сензори** – тези сензори измерват промените в електрическата проводимост, дължащи се на химични реакции [41], [42], което ги прави подходящи за откриване на газове и йони;
- **гравиметрични сензори** – гравиметричните сензори измерват промените в масата, дължащи се на химични взаимодействия [43]. Те често се използват при откриването на летливи органични съединения VOCs (Volatile Organic Compounds).

## **Селективност и чувствителност**

Селективността и чувствителността са критични фактори в работата на химическите сензори. Последните постижения в науката за материалите и нанотехнологиите доведоха до разработването на сензори с повишена селективност и чувствителност. Взаимодействието на сензорните повърхности със специфични лиганди, като антитела или молекуларно отпечатани полимери, позволява високо селективно разпознаване на целевата молекула.

## **Трансдукция**

Трансдукцията е процесът, чрез който химичен сигнал се преобразува в електрически или оптичен сигнал, който може да бъде измерен и количествено определен [44]. Тази стъпка е от съществено значение за събирането и анализа на данни. Различни методи на трансдукция, като потенциометрия, амперометрия и импедансна спектроскопия, се използват в конструкциите на химически сензори.

## **Наноматериали**

Наноматериалите, като наночастици, нанопроводници и нанотръби, направиха революция в дизайна на сензорите. Тяхното високо съотношение повърхност/обем, регулируеми свойства и тези уникални електрически и оптични характеристики позволиха разработването на ултрачувствителни и селективни сензори. Въглеродните нанотръби, графенът и металните наночастици са широко използвани наноматериали за химически сензорни приложения.

## **Интеграция на IoT и изкуствен интелект**

Интегрирането на химически сензори с Интернет на нещата (IoT) и изкуствения интелект AI (Artificial Intelligence) позволи наблюдение и анализ на данни в реално време. Тази

комбинация позволява проактивно вземане на решения, предсказуема поддръжка и оптимизиране на индустриалните процеси и мониторинг на околната среда. Свързаните с IoT сензори могат да предават данни в реално време към централните сървъри, което позволява бърза реакция на промените в околната среда, ранно откриване на опасни вещества и оптимизиране на индустриалните процеси.

#### **1.4.3. Приложения на химическите сензори**

##### **Мониторинг на околната среда**

Химическите сензори са безценни инструменти за мониторинг на околната среда. Те се използват за откриване и количествено определяне на замърсители във въздуха, водата и почвата. Последните разработки включват внедряването на едни сензорни мрежи за наблюдение в реално време в градските райони, подобряване на качеството на въздуха и общественото здраве.

##### **Индустриални процеси**

В промишлени условия химическите сензори са от решаващо значение за контрола на качеството, безопасността и оптимизацията на процесите. Те се използват за наблюдение на параметри като температура, налягане, влажност и концентрация на газ. Нововъзникващите приложения включват използването на химически сензори за прогнозна поддръжка и автоматизация на процеси.

##### **Здравеопазване**

Химическите сензори се използват в здравеопазването за приложения като непрекъснат мониторинг на глюкозата, тестване на място и анализ на издишания въздух за диагностика на заболяване. Напредъкът в носимите сензори предлага нови

възможности за дистанционно наблюдение на пациенти и персонализирана медицина.

#### 1.4.4. Перспективи

Разработката на нови видове химически сензори е изпра- вена пред няколко предизвикателства, включително необходи- мостта от подобрена селективност, дългосрочна стабил- ност и рентабилно производство.

Основните перспективи са следните:

- **мултимодални сензори** – разработване на сензори, способни да откриват множество аналити едновременно за подобрена селективност;
- **зелени сензорни технологии** – проучване на еколо- гични материали и производствени процеси за по-устойчиво производство на сензори;
- **миниатюризация и интеграция** – намаляване на раз- мера на сензора и интегрирането му в компактни, преносими устройства за по-широка достъпност;
- **бdioхимични сензори** – напредък в областта на биохи- мичните сензори за откриване на биомаркери на заболявания и ранна диагностика.

Химическите сензори играят основна роля в различни приложения, като предлагат точни измервания на химични параметри в реално време.

Последните постижения в сензорните механизми, мате- риали и дизайн на сензори разшириха техните възможности, правейки ги незаменими в области като мониторинг на околната среда, индустриални процеси и здравеопазване.

Докато продължаваме да се справяме с предизвикателства- та и да възприемаме нововъзникващите технологии, бъдещето на химическите сензори обещава още по-голям напредък в се-

лективността, чувствителността и устойчивостта, което позволява използването им в по-широк диапазон от приложения.

## 1.5. Биоелектрични сензори

Биоелектричните сензори се очертават като критични инструменти в различни области, включително здравеопазване, биотехнологии и мониторинг на околната среда. Тези сензори позволяват откриването и измерването на електрически сигнали, генериирани от биологични процеси, предоставяйки ценна информация за изследвания, диагностика и терапевтични интервенции.

Биоелектричните сензори са клас устройства, предназначени да улавят, измерват и анализират електрически сигнали, генериирани от биологични системи. Тези сензори имат широк спектър от приложения – от наблюдение на физиологични параметри до изследване на молекулярните механизми, които са в основата на клетъчните процеси.

### 1.5.1. Принципи на работа

Биоелектричните сензори работят на основния принцип за преобразуване на биологично събитие или свойство в електрически сигнал. Тази трансформация се основава на различни механизми, включително:

#### Йон-селективни електроди

Йон-селективните електроди ISE (Ion-Selective Electrodes) са едни от най-старите и най-широко използвани видове биоелектрични сензори [45]. Те са предназначени да измерват концентрацията на специфични йони в разтвор. ISE работят чрез използване на йон-специфични мембрани, като стъклени или полимерни материали, които генерират елект-

рически потенциали в отговор на промените в концентрацията на йони. Тези сензори имат приложения в клиничната химия и мониторинга на околната среда.

### **Транзистори с полеви ефекти**

Транзисторите с полеви ефекти FET (Field Effect Transistors) придобиха известност през последните години като биоелектрични сензори. Функционализирани с биомолекули като ДНК или ензими, FET могат да откриват специфични биомолекулни взаимодействия чрез промени в проводимостта [46]. Високата чувствителност на сензорите, базирани на FET, ги прави ценни инструменти в геномиката и протеомиката.

### **Електрохимична импедансна спектроскопия**

Електрохимичната импедансна спектроскопия EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) измерва промените в импеданса в отговор на биохимични взаимодействия, възникващи на повърхността на електрод [47]. Тази техника е много гъвкава, способна да открива широка гама от биомолекули и патогени. Има приложения в диагностиката на заболявания, безопасността на храните и мониторинга на околната среда.

#### **1.5.2. Класификация на биоелектричните сензори**

Биоелектричните сензори могат да бъдат категоризирани и въз основа на тяхното приложение. Някои често срещани типове включват:

– **сензори за глюкоза** – сензорите за глюкоза се използват широко за контрол на пациенти с диабет, като позволяват непрекъснат мониторинг на нивата на кръвната захар [48]. Тези сензори често използват базирани на ензими електрохимични техники, като глюкозооксидаза, за преобразуване на концентрациите на глюкоза в електрически сигнали.

– **ДНК сензори** – ДНК сензорите играят решаваща роля в геномиката и молекулярната диагностика. Те могат да откриват събития или мутации на ДНК хибридизация с помощта на FETs или ISEs, което ги прави безценни за генетични тестове и диагностика на заболявания [49].

– **имуносензори** – имуносензорите са предназначени да откриват специфични антитела или антигени. Те намират приложения в медицинската диагностика, мониторинга на околната среда и биотехнологиите, като позволяват откриването на патогени, токсини и биомаркери [50]. В зависимост от технологията съществуват три основни принципа на работа на биосензорите: електрохимичен, биопотенциален и биоимпеданс.

– **електрохимични биосензори** – електрохимичните сензори откриват биологични сигнали чрез измерване на промените в електрическите свойства на разтвор в контакт с биологична проба. Това обикновено се постига чрез имобилизиране на ензими или други биомолекули върху повърхностите на електродите, което води до усилване и специфичност на сигнала. Например глюкозните биосензори разчитат на ензимното преобразуване на глюкозата в електрически сигнал, който е право пропорционален на концентрацията на глюкоза.

– **сензори за биопотенциал** – сензорите за биопотенциал улавят електрически сигнали, генериирани от възбудими клетки, като неврони и мускулни клетки. Те обикновено използват електроди за измерване на разлики в напрежението или потенциал на действие. Електрокардиографията (ЕКГ) и електроенцефалографията (ЕЕГ) са примери за биопотенциални сензори, използвани съответно за наблюдение на сърдечната и мозъчната дейност.

Тези сензори могат да измерват различни видове биоелектрични сигнали, включително:

– **ЕКГ електрокардиография** – базираните на ECG (ElectroCardioGraphy) сензори записват електрическата активност на сърцето. Те използват електроди, поставени върху кожата, за да открият промените в напрежението, свързани със сърдечните контракции [51]. ЕКГ сигналите помагат за диагностициране на сърдечни заболявания и оценка на цялостното сърдечно здраве.

– **ЕМГ електромиография** – електромиографските EMG (ElectroMyoGraphy) сензори измерват електрическата активност на мускулите. Те се използват за оценка на мускулната функция, диагностициране на невромускулни разстройства и подпомагане на рехабилитацията [52].

– **ЕЕГ електроенцефалография** – електроенцефалографските EEG (ElectroEncephaloGraphy) сензори регистрират електрическата активност в мозъка. Те са ценни за диагностициране на неврологични заболявания, изследване на мозъчната функция и наблюдение на пациенти под анестезия [53].

– **EDA електродермална активност** – EDA (ElectroDermal Activity) сензорите измерват електрическата проводимост на кожата [54] и се използват за оценка на емоционалните реакции, стреса и активността на човешката нервна система.

– **сензори за биоимпеданс** – сензорите за биоимпеданс анализират свойствата на електрическия импеданс на биологичните тъкани и течности [55]. Тези сензори използват електрически токове за измерване на промените в импеданса, които могат да бъдат свързани с различни биологични параметри.

– **импедансна пletизмография** – сензорните системи, базирани на принципа на импедансната пletизмография (Impedance plethysmography), се използват за наблюдение на промените в обема на кръвта в тъканта [56].

– **импедансна томография** – сензорните системи за импедансна томография (Impedance tomography) измерват обема на белодробната вентилация и кръвния поток [57].

– **BIS биоимпедансна спектроскопия** – BIS (Bioimpedance spectroscopy) сензорите измерват импеданса на биологичните тъкани спрямо електрически ток [58]. Те се използват за анализ на състава на тялото, оценка на хидратацията и ранно откриване на определени медицински състояния.

### 1.5.3. Приложения

Биоелектричните сензори имат широк спектър от приложения в различни области.

#### Здравеопазване

- ЕКГ и ЕЕГ за проследяване на сърдечната и мозъчната дейност;
- монитори на кръвна захар за лечение на диабет;
- анализ на тъкани на тялото, базиран на импеданс;
- електромиография (ЕМГ) за оценка на мускулната активност;
- биосензори за откриване на патогени, токсини и биомаркери в клиничната диагностика.

#### Фитнес и спорт

Носимите биоелектрически сензори, като монитори за сърдечен ритъм и устройства за проследяване на мускулната активност, помагат на спортистите и фитнес ентузиастите да оптимизират тренировъчните си процедури и да проследяват напредъка си.

#### Нервно-мускулна рехабилитация

ЕМГ сензорите подпомагат нервно-мускулната рехабилитация чрез предоставяне на обратна връзка за моделите на

мускулна активация. Това е от решаващо значение за пациентите, които се възстановяват от наранявания или операции.

### **Интерфейси мозък-компютър BCI (Brain-Computer Interface)**

BCI, базирани на EEG, позволяват на хората да контролират компютри и устройства, използвайки мозъчните си сигнали. Тези интерфейси имат обещаващи приложения в помощните технологии и комуникацията за хора с тежки двигателни увреждания.

### **Клинична диагностика**

Биоелектричните сензори са основни при диагностичното и наблюдението на сърдечно-съдови заболявания, неврологични разстройства, мускулна дисфункция и нарушения на съня.

Спортни и фитнес носими биоелектрични сензори се използват за наблюдение на представянето на спортстите, проследяване на физиологичните параметри по време на тренировка и предотвратяване на наранявания.

### **Научни изследвания**

Биоелектричните сензори са незаменими инструменти в научните изследвания, помагайки на изследователите да изследват различни биологични явления и да разработят нови терапии.

### **Биотехнология**

- микробни горивни клетки за устойчиво производство на енергия;
- клетъчни биосензори за скрининг на лекарства и токсикологични изследвания;
- невронно и сърдечнотъканно инженерство;
- мониторинг на клетъчните реакции към различни стимули за изследователски цели.

### **Мониторинг на околната среда**

- оценка на качеството на водата чрез биоелектрохимични сензори;
- мониторинг на почвената микробна активност и съдържание на хранителни вещества;
- откриване на замърсители и замърсители във въздуха и водата;
- анализ на биологични показатели в екологичните изследвания.

#### **1.5.4. Перспективи за развитие**

Включването на усъвършенствани алгоритми за обработка на сигнали и изкуствен интелект подобри точността и интерпретируемостта на данните от биоелектрични сензори. Алгоритмите за машинно обучение могат да откриват модели, аномалии и ранни признания на заболяване от биоелектрични сигнали.

#### **Биометрично удостоверяване**

Електродермалните сензори за активност са използвани за биометрично удостоверяване, предлагайки уникален и сигурен метод за идентифициране на потребителя.

#### **Биосъвместимост**

За да се разширят приложенията в имплантируеми сензори и *in vivo* мониторинг, биосъвместимостта на сензорните материали и покрития трябва да се подобри.

#### **Анализ на данни**

Големият обем данни, генериирани от биоелектрични сензори, изисква усъвършенствани техники за анализ на данни, включително машинно обучение и изкуствен интелект, за точен анализ.

## 1.6. MEMS технология

MEMS е ключова технология за производство на миниатюрни сензорни модули с малка консумация на енергия и ниски нива на радиоизлъчване. Тя се основава на техники за микрообработка, които са разработени за производство на миниатюрни механични компоненти, които се управляват с електрически сигнали [59].

Терминът „MEMS“ е въведен през 1986 г. S.C. Jacobsen (PI) и J.E. Wood (Co-PI). Те въвеждат термина „MEMS“ в предложение до DARPA, озаглавено „Микроелектромеханични системи (MEMS)“.

Микроелектромеханичните системи (MEMS) са клас миниатуризиращи устройства, които комбинират електрически, механични и понякога оптични компоненти върху един субстрат.

Чрез използване на технологии с високо ниво на интеграция, тези електромеханични компоненти могат да бъдат комбинирани с микроелектронни модули, за получаване на системи със сложна функционалност.

Производствените технологии на MEMS са решаващ аспект от тяхното развитие.

**Масова микрообработка** – този метод включва езване на материал от массивна силициева подложка за създаване на MEMS структури.

**Повърхностна микрообработка** – тук MEMS структурите се изграждат слой по слой върху силиконова пластина.

**LIGA (Lithography, Galvanoforming, and Molding)** – техника за производство с висока разделителна способност [60], която използва рентгенова литография и галванопластика за създаване на сложни 3D микроструктури.

**MUMPs (Multi-User MEMS Processes)** – стандартизиран процес на производство на MEMS [61], който позволява бързо

създаване на прототипи.

**SOI (Silicon On Insulator) технология** – SOI субстратите предлагат по-добра електрическа изолация и намален паразитен капацитет, подобрявайки производителността на MEMS устройствата [62].

Чрез интегриране на различни по вид компоненти в единна система размерът на сензорния модул може значително да се намали. От особен интерес са процесите, които комбинират CMOS транзистори с микроелектромеханични системи.

Съществуват редица техники за комбиниране на електромеханични и електронни модули на микрониво след обработка, базирана на CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) [63].

Използвайки MEMS технологията, много компоненти на сензорни възли могат да бъдат миниатюризириани, например сензори, комуникационни блокове и захранващи блокове, което може да доведе до значително намаляване на разходите при серийно производство, както и в консумацията на енергия.

### **1.6.1. Основни принципи**

Основните принципи, залегнали в MEMS сензорите, са базирани на фундаментални принципи на измерване на физични, химични, оптични и др. величини, усъвършенствани в посока миниатюризация и бързодействие.

#### **Капацитивни сензори.**

Капацитивните MEMS сензори разчитат на промени в капацитета между микроструктурите, когато са подложени на физически стимули. Промените в капацитета са пропорционални на приложената сила, налягане или изместване.

### **Пиезоелектрични сензори.**

Пиезоелектричните MEMS сензори използват пиезоелектрични материали, които генерират електрически заряд в отговор на механична деформация. Тези сензори се използват за измерване на налягане, ускорение и вибрации.

### **Термични сензори.**

Термичните сензори MEMS откриват температурни вариации чрез измерване на термично съпротивление или термоелектричния ефект в микроструктурите. Те намират приложение в мониторинга на температурата и термичните изображения.

### **Резонансни сензори.**

Резонансните MEMS сензори разчитат на промени в резонансната честота на микроструктурите, дължащи се на външни сили или условия на околната среда. Те обикновено се използват в приложения с жироскоп и акселерометър.

## **1.6.2. Приложения на MEMS**

Технологията MEMS е навлязла в различни сектори, кое-то води до набор от иновативни приложения.

**Мониторинг на околната среда** – базираните на MEMS сензори се използват за наблюдение на качеството на въздуха, влажността, температурата и сейзмичната активност.

**Потребителска електроника** – MEMS акселерометрите и жироскопите са неразделни компоненти в смартфони и контролери за игри за отчитане на движение и откриване на ориентация.

**Здравеопазване** – сензори и задвижващи механизми, базирани на MEMS, позволяват прецизно доставяне на лекарства, мониторинг на кръвното налягане и диагностични устройства, базирани на електромеханичен чип.

**Автомобилостроене** – MEMS сензори като акселерометри на въздушни възглавници, сензори за налягане в гумите и системи за впръскване на гориво повишават безопасността и ефективността на автомобила.

**Аерокосмически технологии** – MEMS сензорите играят решаваща роля в аерокосмическите приложения, включително инерционна навигация, наблюдение на надморска височина и сателитни системи.

**Отбрана и сигурност** – технологията MEMS се използва в базирани на MEMS RF превключватели, инфрачервени сензори и микроогледала за приложения като радарни и системи за нощно виждане.

**Индустриална автоматизация** – MEMS акселерометри, сензори за налягане и сензори за поток се използват за прецизен контрол и мониторинг в индустриални процеси.

### 1.6.3. Перспективи за развитие

**BioMEMS** – интегрирането на MEMS с биологията [64], което позволява напредък в директно дозиране и вкарване на лекарства в човешкото тяло, тъканно инженерство и диагностика.

**Производство на енергия** – базирани на MEMS устройства могат да преобразуват вибрациите на околната среда и топлинните градиенти в електрическа енергия, предлагайки потенциални приложения в IoT устройства.

**Наноелектромеханични системи (NEMS)** – NEMS представляват еволюция на технологията MEMS [65], работаща в наномащаба и позволяваща дори по-малки и по-чувствителни устройства.

**Квантов MEMS** – изграждане на базирани на квантови сензори MEMS устройства, които имат потенциала да революционизират прецизното измерване.

**Интернет на нещата и интелигентни градове – сензорите MEMS** са неразделна част от развитието на интелигентните градове и Интернет на нещата (IoT), като позволяват вземането на решения, базирани на данни, и подобряват качеството на живот.

**Техники за нано/микрофабрикация** – непрекъснатият напредък в технологиите за микрофабрикация позволи създаването на по-сложни и прецизни сензорни структури. **Интегриране с CMOS** – интегрирането на MEMS сензори с комплементарна технология метал-оксид-полупроводник (CMOS) ще подобри обработката на сигнала и намали консумацията на енергия.

**Многопараметрично наблюдение** – MEMS сензорите вече са в състояние едновременно да измерват множество физически параметри, което съществено подобрява тяхната гъвкавост и мащабируемост.

**Безжична свързаност** – интегрирането на сензори MEMS с безжична комуникационна технология позволява дистанционно наблюдение на данни и IoT приложения.

### **Библиография към Глава първа:**

1. Bell, L. E. (2008). Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science*, 321(5895), 1457–1461.
2. W.G Cady, “Piezoelectricity”, Dover, New Yard, Vol.2 (1964), p. 417. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a254925.pdf>
3. Tang L., et al. (2008). Nanometre-scale germanium photodetector enhanced by a near-infrared dipole antenna. *Nat. Photonics* 2, 226
4. Childs, Peter. (2001). Resistance temperature detectors. 10.1016/B978-075065080-9/50006-X.
5. Bodic, Milan & Aleksic, Stanko & Rajs, Vladimir &

- Damjanovic, Mirjana & Kisic, Milica. (2023). Thermally Coupled Thick Film Thermistors: Main Properties and Applications. *IEEE Sensors Journal*. PP. 1–1. 10.1109/JSEN.2023.3298224.
6. Xie, Xinhui. (2023). Designing Photoelectric Sensor Module in Infrared Communication and Applying Wireless Sensor Network in Leakage Cable Detection. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 18. 193–201. 10.1166/jno.2023.3377.
7. Feng, Jinxi & Zhang, Tiantian & Sun, Jingxiang & Zhu, Jinzhu & Yan, Wen & Tian, Shuanghong & Xiong, Ya. (2021). Improvement of sewage sludge dewatering by piezoelectric effect driven directly with pressure from pressure filtration: Towards understanding piezo-dewatering mechanism. *Water Research*. 209. 117922. 10.1016/j.watres.2021.117922.
8. Hu, Zhikai & Chu, Zhongyi & Chen, Gen & Cui, Jing. (2023). Design of Capacitive Pressure Sensors Integrated With Anisotropic Wedge Microstructure-Based Dielectric Layer. *IEEE Sensors Journal*. PP. 1–1. 10.1109/JSEN.2023.3300702.
9. Dolga, Lia. (2008). The tensometric force sensor. Design, evaluation and optimal selection. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. 411–412.
10. Qiu, Zhongchao & Su, Kai & Zhang, Jinquan & Sun, Rui & Teng, Yuntian. (2023). A Miniaturized Low-Frequency FBG Accelerometer Based on Symmetrical Cantilever Beam. *IEEE Sensors Journal*. PP. 1–1. 10.1109/JSEN.2023.3241167.
11. MARUYAMA, Yutaka & Mizuno, Takeshi & Ishino, Yuji & Takasaki, Masaya & ISHIGAMI, Takayuki & KAMENO, Hironori. (2007). 21620 Micro Gyroscopic Sensor using Active Magnetic Bearing : 3rd Report: Estimation of Tow-axis Angular Velocity Measurement in Frequency Domain. *The Proceedings of Conference of Kanto Branch*. 2007.13. 17–18. 10.1299/jsmekanto.2007.13.17.
12. Yun, Jaeseok & Song, Min-Hwan. (2014). Detecting Direction of Movement Using Pyroelectric Infrared Sensors. *Sensors Journal, IEEE*. 14. 1482–1489. 10.1109/JSEN.2013.2296601.
13. Crescentini, Marco & Fatima, Syeda & Gibiino, Gian Piero.

(2021). Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques. IEEE Sensors Journal. PP. 1–1. 10.1109/JSEN.2021.3119766.

14. Smith, C. (2022). Optical Sensors: A Comprehensive Review Journal of Optics and Photonics, vol. 12, бр. 3, с. 245–269.

15. D, Jaslin & M., Priyanka. (2023). IOT Integration in two-axis sun tracking system with LDR sensors in a Wheatstone bridge Circuit. 10.59544/PKQW9847/NGCESI23P99.

16. Tekin, Kemal & Karadogan, Muhammed & Gunaydin, Secil & Kismet, Kemal. (2023). Everything About Pulse Oximetry-Part 1: History, Principles, Advantages, Limitations, Inaccuracies, Cost Analysis, the Level of Knowledge About Pulse Oximeter Among Clinicians, and Pulse Oximetry Versus Tissue Oximetry. Journal of intensive care medicine. 38. 8850666231185752. 10.1177/08850666231185752.

17. Garanin, Andrei & Dyachkov, V. & Rubanenko, A. & Reprintseva, O. & Duplyakov, Dmitry. (2023). Pulse oximetry methods: opportunities and limitations. Russian Journal of Cardiology. 28. 5467. 10.15829/15604071-2023-5467.

18. Samantaroy, Rojalin. (2023). ADAS Sensor Data Handling in the World of Autonomous Mobility. 10.4271/2023-01-0993.

19. Algamili et al., A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices, Nanoscale Res Lett (2021) 16:16, <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03481-7>

20. Shinde, Mr & Bhosale, Jaykumar & Katkar, Smita & Salunkhe, Mr. (2023). An Overview Internet Of Things(IoT).

21. Baert, Mathias & Rossey, Jen & Shahid, Adnan & Hoebeke, Jeroen. (2018). The Bluetooth Mesh Standard: An Overview and Experimental Evaluation. Sensors. 18. 2409. 10.3390/s18082409.

22. Kaushik, Shailendra. (2012). An overview of Technical aspect for WiFi Networks Technology. International Journal of Electronics and Computer Science Engineering. 1.

23. Li, Channing & Zhichao, Cao. (2022). LoRa Networking Techniques for Large-scale and Long-term IoT: A Down-to-top Survey. ACM Computing Surveys. 55. 1–36. 10.1145/3494673.

24. Yang, Zixu & Zhu, Minghui. (2023). Case Studies: Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectroscopy. 10.1007/978-3-031-07125-6\_12.
25. Weller, Mark & Young, Nigel. (2023). Mössbauer spectroscopy and nuclear quadrupole resonance (NQR) spectroscopy. 10.1093/hesc/9780199654413.003.00010.
26. Choi, Yong & Sawada, Kazuaki. (2023). Fluorescence Sensors. 10.1016/B978-0-12-822548-6.00095-9.
27. Yao, Yucheng & Zhao, Zhiyong & Tang, Ming. (2023). Advances in Multicore Fiber Interferometric Sensors. Sensors. 23. 3436. 10.3390/s23073436.
28. Mullen, Austin & Akindele, Oluwatomi & Bergevin, Marc & Bernstein, Adam & Dazeley, Steven. (2022). Improvement in light collection of a photomultiplier tube using a wavelength-shifting plate. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1040. 167207. 10.1016/j.nima.2022.167207.
29. Suhr, Birgit. (2010). A Sensor Independent Concept for the Characterisation of Imaging Spectrometers. 10.5167/uzh-45753.
30. Hoffman, Alan & Loose, Markus & Suntharalingham, Vyshnavi. (2006). CMOS detector technology. 10.1007/1-4020-4330-9\_42.
31. Vyshatko, N. & Briosso, P. & Pérez de la Cruz, Javier & Vilarinho, Paula & Kholkin, Andrei. (2005). Measurements of Piezoelectric Properties of Ferroelectric Thick Films by Fotonics Sensor. Ferroelectrics. 320. 171-178. 10.1080/00150190590967035.
32. Keiser, Gerd. (2022). Overview of Biophotonics. 10.1007/978-981-19-3482-7\_1.
33. OArif, Rezoana Bente & Bora, Tanujjal. (2022). Microfluidic Plasmonic Sensors: Theory and Applications. 10.1007/978-3-030-99491-4\_17.
34. Kim, Young Jin & Duffy, Leanne & Savukov, Igor & Chu, Pinghan. (2023). Sensitivity of ultralight axion dark matter search with optical quantum sensors. Physical Review D. 108. 10.1103/PhysRevD. 108.052007.
35. Whitfield, George. (2012). The Electroadsorption Field Effect

Transistor : numerical and experimental treatment of chemisorption on nanostructured chemical sensors.

36. Takahashi, Yuji & Takahashi, Takumi & Abe, Takashi & Noma, Haruo & Sohgawa, Masayuki. (2022). Tactile sensor with microcantilevers embedded in fluoroelastomer/PDMS for physical and chemical resistance. *Electronics and Communications in Japan*. 105. 10.1002/ecj.12369.

37. Oikonomou, Petros & Manoli, Kyriaki & Goustouridis, Dimitris & Raptis, Ioannis & Sanopoulou, Merope. (2009). Polymer/BaTiO<sub>3</sub> nanocomposites based chemocapacitive sensors. *Microelectronic Engineering*. 86. 1286-1288. 10.1016/j.mee.2008.11.081.

38. Nguyen, T. & Sun, Tong. (2020). Optical Fibre Chemical Sensors. 10.1002/9781119534730.ch8.

39. Sreekumar, Gadha & Parashar, Anshumali & Somanathan, Swathi & Mishra, Subhash & Singh, Anil & Sheikh, Imran & Sravani, Dumala. (2023). Overview of Biosensors and Their Application: a review. *European Chemical Bulletin*. 3247–3255. 10.31838/ecb/2023.12.Si9.293.

40. Vicentini, Fernando & Silva, Luiz Ricardo & Stefano, Jéssica & Ferreira Lima, Alan Rogerio & Prakash, Jai & Bonacin, Juliano & Janegitz, Bruno. (2022). Starch-Based Electrochemical Sensors and Biosensors: A Review. *Biomedical Materials & Devices*. 1–20. 10.1007/s44174-022-00012-5.

41. Malhotra, Priti. (2023). Conductometric Methods. 10.1007/978-3-031-26757-4\_11.

42. Nikolay, Koshel & Koshel, S.A.. (2021). Determination of Conditional Constants of Conductometric Sensors. *Elektronnaya Obrabotka Materialov*. 57. 35–42. 10.52577/eom.2021.57.4.35.

43. Fanget, S. & Hentz, S. & Puget, Pierre & Arcamone, Julien & Matheron, Muriel & Colinet, Eric & Andreucci, Philippe & Duraffourg, L. & Meyers, Ed & Roukes, Michael. (2011). Gas Sensors Based on Gravimetric Detection—a Review. *Sensors and Actuators B-chemical – SENSOR ACTUATOR B-CHEM*. 160. 10.1016/j.snb.2011.08.066.

44. Esbenshade, Timothy & Duzic, Emir. (2006). Overview of Signal Transduction. *Current protocols in pharmacology / editorial*

- board, S.J. Enna (editor-in-chief) [et al.]. Chapter 2. Unit2.1. 10.1002/0471141755.ph0201s31.
45. Adil, Nafesa & Wang, Renjie & Wang, Xuewei. (2023). Self-Calibrated Ion-Selective Electrodes. *Analytical chemistry*. 95. 10.1021/acs.analchem.3c02135.
46. Ahn, Jae-Hyuk & Choi, Bongsik & Choi, Sung-Jin. (2020). Understanding the signal amplification in dual-gate FET-based biosensors. *Journal of Applied Physics*. 128. 184502. 10.1063/5.0010136.
47. Lasia, Andrzej. (2014). A. Lasia, *Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications*, book, Springer, 2014. 10.1007/978-1-4614-8933-7.
48. Loyola Leyva, Alejandra & Hernandez Vidales, Karen & Loyola-Rodriguez, Juan & Gonzalez, Francisco. (2022). Noninvasive Glucose Measurements Through Transcutaneous Raman Spectroscopy: A Review. *Journal of Diabetes Science and Technology*. 193229682211096. 10.1177/19322968221109612.
49. Garrido-Cárdenas, José & García-Maroto, Federico & Álvarez-Bermejo, J. & Manzano-Agugliaro, Francisco. (2017). DNA sequencing sensors: An overview. *Sensors*. 17. 588. 10.3390/s17030588.
50. Gupta, Anil & Animesh, Sambhavi & Singh, Amit. (2023). An Overview of Immunosensors and Their Application. 10.1007/978-981-19-8501-0\_8.
51. Zhang, Xiaoyang & Li, Yongfu & Wang, Lei & Zou, Wei & Sun, Yinan & Liu, Yongpan & Yang, Huazhong & Lian, Yong & Zhao, Bo. (2015). Design of Ultra-Low-Power Electrocardiography Sensors. 359-385. 10.1007/978-3-319-14711-6\_14.
52. Chandolias, Konstantinos & Stefanouli, Vasiliki & Tsokani, Aristi & Tsounia, Eleni Argyroula & Kellari, Anthi. (2022). The Use of surface electromyography (sEMG) wearable sensors on land and underwater during hydro-rehabilitation: A review. 4. 88–93. 10.22271/27069567.2022.v4.i2b.412.
53. Iacopi, Francesca & Lin, Chin-Teng. (2022). A perspective on electroencephalography sensors for brain-computer interfaces. *Progress in Biomedical Engineering*. 4. 10.1088/2516-1091/ac993d.

54. Pope, Gunnar & Halter, Ryan. (2019). Design and Implementation of an Ultra-Low Resource Electrodermal Activity Sensor for Wearable Applications †. *Sensors*. 19. 2450. 10.3390/s19112450.
55. Maji, Soumyajyoti & Roubert Martinez, Sebastian & Howe, Robert. (2023). Continuous Surface Electromyography and Bioimpedance Sensing from the Same Electrodes. 10.1109/SAS58821.2023.10254098.
56. Coufalová, Klára & Komarc, Martin & Cochrane, Darryl. (2019). Comparison of Bioelectrical Impedance Analysis and Air Displacement Plethysmography. *International Journal of Morphology*. 37. 985-990. 10.4067/S0717-95022019000300985.
57. Liu, J. Z. & Zhang, L. Y. & Xiong, H. (2023). Chest shape measurement by multi-sensors for pulmonary electrical impedance tomography. *Journal of Instrumentation*. 18. P02008. 10.1088/1748-0221/18/02/P02008.
58. Kanoun, Olfa. (2019). Impedance Spectroscopy Advanced Applications: Battery Research, Bioimpedance, System Design. 10.1515/9783110558920.
59. Pachkawade, Vinayak. (2023). Transduction in MEMS/NEMS Based Actuation and Sensing. 10.36227/techrxiv.22771271.
60. Li, H. & Shi, G-C. (2007). Design of MEMS latch mechanism of lateral orientation deformation based on LIGA technology. 5. 289–292.
61. Markus, Karen & Koester, David & Cowen, Allen & Pai N, Satwik & Dhuler, Vijay & Roberson, Douglas & Smith, L. (1995). MEMS infrastructure: the multiuser MEMS processes (MUMPs). *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 10.1117/12.221300.
62. Noell, Wilfried & Clerc, P.-A & Dellmann, Laurent & Guldinmann, B. & Herzig, H.-P & Manzardo, O. & Marxer, C.R. & Weible, Kenneth & Dändliker, René & Rooij, N. (2002). Applications of SOI-based optical MEMS. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*. 8. 148-154. 10.1109/2944.991410.
63. Bhatt, Manoj. (2023). Recent Trends in CMOS-MEMS Sensors. 10.1063/9780735424395\_004.
64. Borenstein, Jeffrey. (2008). BioMEMS Technologies for

Regenerative Medicine. MRS Proceedings. 1139. 10.1557/PROC-1139-GG02-01.

65. MUSTATA, Stefan-Mircea & Vidan, Cristian & Larco, Ciprian & BOGLIS, Carmen-Ioana & Antofie, Bianca-Gabriela. (2023). Overview of the technologies used in the fabrication of MEMS/NEMS actuators for space applications. INCAS BULLETIN. 15. 57–71. 10.13111/2066-8201.2023.15.3.5.

## **ГЛАВА ВТОРА.**

# **БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРИ И БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ (WSN)**

Концепцията за WSN (Wireless Sensor Networks) е първоначално въведена преди повече от четири десетилетия. По онова време тази концепция е била по-скоро визия, отколкото технология, която да може да се използва широко, поради ограниченията сензорни, компютърни и безжични комуникационни технологии. В резултат на това приложението им се ограничаваше предимно до големи военни системи. Въпреки това технологичният напредък в MEMS, безжичната комуникация и производствените технологии позволиха разработването на малки, евтини и интелигентни сензори с възможности за възприемане, обработка и комуникации, което стимулира развитието на сензорни мрежи и техните приложения.

В сравнение на традиционните безжични комуникационни мрежи, като GSM клетъчни комуникационни системи и мобилните мрежи (MANET), WSN имат уникални характеристики, например по-плътно покриване на зоната за изследване, по-голяма надеждност на измерените сензорни данни чрез интеграция на измервания от съседни модули, по-голяма гъвкавост и възможност за самоуправление.

В същото време при WSN съществуват ограничения относно консумацията на енергия, изчислителна мощ и комуникационни възможности, които генерират много нови предизвикателства в разработването и прилагането внедряването им в реални условия.

## 2.1. Безжична комуникационна технология

Безжичната комуникация е ключова технология за осигуряване на нормална работа на WSN. Днес повечето конвенционални безжични мрежи използват радиочестотна комуникация, включително на база микровълни в милиметровия и микрометровия диапазони.

Основната причина за разпространението на тази технология е, че радиочестотната комуникация в зависимост от дълчината на вълната невинаги изисква директна видимост между приемника и предавателя и е в състояние да осигурява радиорелейна свързаност.

Въпреки това RF комуникацията във високочестотните диапазони има ограничения, например необходимост от относително големи антени и относително лимитирано по площ радиопокритие, които правят RF невинаги най-добрата комуникационна среда за малки сензорни възли с ограничен капацитет от енергия.

Друга възможна среда за комуникация в сензорните мрежи е оптичната комуникация в отворени и затворени пространства, която има някои предимства пред радиочестотната комуникация.

Високата насоченост на оптичната комуникация дава възможност за постигане на високи скорости на обмен на данни чрез използване на технологии като SDMA (Spatial Division Multiple Access) [1], при които не се изисква сложно управление на процеса на комуникация. Този вид оптична комуникационна технология има потенциал да бъде енергийно по-ефективна от протоколите, използвани при радиокомуникацията, като TDMA, FDMA и CDMA [2], [3], [4].

Оптичната комуникация обаче изисква линейна видимост и много точно насочване на приемника и предавателя на данни,

което ограничава използването на тази технология само при специфични приложения, базирани на сензорна мрежа.

От друга страна, повечето съществуващи комуникационни протоколи за конвенционални безжични мрежи, например клетъчни системи, безжични локални мрежи WLAN (Wireless Local Area Networks) [5], безжични лични мрежи WPAN (Wireless Personal Area Networks) [6] и MANET (Mobile Ad-hoc Networks) [7], не отчитат специфичните характеристики на сензорните мрежи, и по-специално нуждата от ограничена консумация на енергия в сензорните възли. Следователно те не могат да се прилагат директно без промяна. Необходим е нов набор от мрежови протоколи за справяне с различни проблеми в мрежата, като се вземат предвид уникалните характеристики на WSN.

### **Хардуерни и софтуерни платформи**

Развитието на WSN до голяма степен зависи от наличието на хардуерни и софтуерни платформи с ниска и ултраниска консумация на енергия и хардуер за сензорни мрежи. Използването на MEMS технологията позволява размерът и цената на сензорния модул да се намалят значително.

За да се постигне ниска консумация на енергия на ниво възел, е необходимо да се имплементират системи и модули за енергийната оптимизация на ниво хардуерен дизайн и архитектура при сензорните мрежи.

Консумацията на енергия на ниво безжични сензорни модули може да бъде допълнително намалена чрез ефективно използване на различни системи за динамично управление на мощността DPM (Dynamic Power Management) [8]. Например често използваната техника при DPM е изключването на хардуерни и/или софтуерни компоненти, когато не се планира използването им. Друга опция е превключването им в режим

ниска мощност, когато има малко натоварване, което може да намали значително потреблението на енергия.

Освен това са възможни допълнителни икономии на енергия в активно състояние чрез използване на техника за динамично мащабиране на напрежението DVS (Dynamic Voltage Scaling) [9]. Доказано е, че базираното на DVS управление на захранването има значително по-висока енергийна ефективност в сравнение с управлението на захранването, базирано на изключване като DPM. В същото време енергийната ефективност може значително да се подобри, ако информацията за моментната консумация на енергия бъде включена в дизайна на системния софтуер, включително на ниво операционната система, приложни и мрежови протоколи.

При повечето операционни системи за тази цел съществува т. нар. планировчик на задачи (Task Manager), който е отговорен за планирането и изпълнението на даден набор от задачи в системата при определени времеви ограничения.

### **Хардуерни платформи.**

Хардуерните платформи на сензорните модули могат да бъдат класифицирани в три основни категории [11]:

- компютърни системи с общо предназначение;
- сензорни модули с микроконтролери за общо предназначение;
- сензорни модули базирани на технологията SoC (System on a Chip).

### **Компютърни системи с общо предназначение**

Този клас платформи включва различни индустриални компютърни системи с ниска изчислителна мощност (напр. PC104) и индустриални лични цифрови асистенти, които обикновено работят със специализирани операционни систе-

ми, например WinCE (Windows Embedded Compact), TiniOS или операционни системи за работа в реално време, използващи стандартни протоколи за безжична комуникация, например IEEE 802.11 или Bluetooth. В сравнение със специализирани и SoC сензорни възли, тези PC-подобни платформи имат по-висока възможност за обработка и по този начин могат да включват по-богат набор от мрежови протоколи, популярни езици за програмиране, междинен софтуер, интерфейси за програмиране на приложения API (Application Programming Interface) и друг специализиран софтуер, нуждаещ се от по-голяма процесорна изчислителна мощност и памет. Основен недостатък на този тип платформи е високият разход на енергия и невъзможност да работи с автономно захранване за големи периоди от време.

### **Специализирани сензорни модули**

Този клас платформи включват серията сензорни модули Renesas [11], семейството Laird, TTI, Strainstert, Dragino и др., които се характеризират с малки размери, относително ниска консумация на енергия и интуитивни сензорни интерфейси.

### **Сензорни възли тип System on Chip (SoC).**

Този клас платформи включва WeC, Rene, Dot, Mica2 и др., базирани на CMOS, MEMS и RF технологии и проектирани с ултраниска консумация на енергия и оптимизирани сензорни, изчислителни и комуникационни възможности.

### **Софтуерни платформи.**

Софтуерната платформа може да бъде операционна система, която предоставя набор от услуги за приложения, включително управление на файлове, разпределение на паметта, планиране на задачи, драйвери за периферни устройства и работа в мрежа, или може да бъде специализирана софтуерна платформа, предоставяща набор от библиотеки от софтуерни

компоненти за системни програмисти.

Операционните системи за безжични сензорни мрежови възли обикновено са по-малко сложни от операционните системи с общо предназначение. TinyOS [12], разработена от David Culler, е първата операционна система, специално проектирана за безжични сензорни мрежи. Тази система е управлявана от събития и използва само 178 байта памет, но поддържа комуникация, многозадачност и модулен код.

TinyOS няма файлова система, поддържа само статично разпределение на паметта, използва ограничен по възможности мениджър на задачи (Task Manager) и осигурява ограничен набор драйвери за устройства и мрежи.

Програмният език *nesC* [13] е диалект на езика на C, за работа с TinyOS. Той предоставя набор от езикови конструкции и ограничения за прилагане на компоненти и приложения в TinyOS.

Когато възникне събитие, например показание на сензор, TinyOS сигнализира на подходящия мениджър на събитието да обработи събитието.

LiteOS е операционна система за безжични сензорни мрежи, която осигурява UNIX-подобна абстракция и поддръжка за езика за програмиране C [14].

Contiki, разработена от Adam Dunkels, е операционна система, която използва по-опростен стил на програмиране в C, като същевременно осигурява развитие като поддръжка на технологии като 6LoWPAN и Protothreads [15].

RIOT (операционна система) е по-нова операционна система в реално време, включваща подобна функционалност като на Contiki [16].

### **Мрежови стандарти за безжични сензори**

За да се улесни разработването и прилагането на WSN в световен мащаб, е необходимо да се усъвършенстват производствените технологии, което да доведе до намаляване на себестойността на производство на сензорни и комуникационни модули и оттам намаляване на крайната цена. За тази цел е важно да се уточнят съответните стандарти, така че сензорните продукти от различни производители да могат да работят съвместно в рамките на една мрежа.

Много усилия са положени и се полагат в много организации за стандартизация и по-специално в IEEE с цел унифициране на пазара, което води до нискобюджетни и оперативно съвместими устройства и избягване на разпространението на собствени несъвместими мрежови протоколи.

Донякъде успехът на WSN като технология до голяма степен разчита на успеха на тези усилия за стандартизация.

## **2.2. Мрежови характеристики**

WSN обикновено се състои от голям брой мултифункционални сензорни модули с ниска излъчваща мощност, които са разположени в определен регион. Тези сензорни модули са оборудвани с един или група сензори, безжични приемо-предаватели и вградени микропроцесори, поради което имат не само способност за измерване на различни физични, химични и биологични параметри, но и възможности за локална обработка на данни и безжично предаване на обработената информация.

Модулите комуникират на сравнително късо разстояние и могат да се комбинират и трансформират в конфигурации за изпълнение на обща задача, например наблюдение на околната среда, контрол на индустритните процеси, охрана и др.

### **Плътност на покритието**

Сензорните възли обикновено са гъсто разположени в зоната на интерес. Броят на сензорните възли в сензорната мрежа може да бъде с няколко порядъка по-голям от този в стандартните комуникационни мрежи като GSM, WiMax и др.

### **Автономно акумулаторно захранване**

Сензорните възли обикновено се захранват от акумулатори или батерии за еднократна употреба. В повечето ситуации те се разполагат в среда с ограничен достъп, където е много трудно или дори невъзможно да се сменят батериите или акумулаторите.

### **Ограничения относно консумацията на енергия**

Поради ограничения капацитет на източника на енергия безжичните сензорни модули са ограничени по отношение на изчислителна мощност, комуникация и автономност.

### **Самоорганизиране и конфигуриране**

В повечето случаи сензорните модули обикновено се разполагат на случаен принцип без внимателно планиране и инженеринг. Веднъж разгърнати, сензорните възли трябва да могат да се конфигурират самостоятелно в комуникационна мрежа.

### **Надеждност**

Сензорните възли обикновено се разполагат в сурови климатични условия или враждебна околна среда и работят без присъствие. Те са предразположени към физически повреди и поради тази причина се проектират процедури за автоматично дублиране на функциите им с тези на съседни сензорни модули.

### **Динамична смяна на топологията**

По правило мрежовата топология на една безжична сензорна мрежа се променя динамично в резултат на временен

или постоянен отказ на сензорен модул или невъзможност за осъществяване на комуникация.

### **Интегриране на измерени данни**

В повечето приложения на сензорната мрежа сензорните модули са гъсто разположени в определен регион и си взаимодействват, за да изпълнят обща задача. По този начин данните, генериирани от множество сензорни възли, обикновено имат определено ниво на корелация или излишък. Този излишък от почти идентични сензорни данни позволява съществено повишаване на надеждността на системата като цяло поради факта, че отказът на един или няколко модула няма да повлияе съществено на точността на измерените данни.

Обработката и интегрирането на сензорни данни като процес поставя нови предизвикателства при проектирането на сензорни мрежи.

### **2.3. Интелигентни сензорни мрежи (ISN)**

Интелигентните сензорни мрежи ISN (Intelligent Sensor Networks) представляват специализирана група безжични сензорни мрежи, част от по-широкия домейн на безжичните сензорни мрежи (WSN), която включва разширена обработка на данни и възможности за вземане на самостоятелни решения.

ISN са предназначени да подобрят функционалността и ефективността на традиционните сензорни мрежи, като позволяват по-интелигентно събиране и обработка на данни.

#### **Мониторинг на околната среда**

Мониторингът на околната среда е едно от най-ранните приложения на сензорните мрежи. В процеса на мониторинг сензорите се използват за наблюдение на различни текущи параметри или промяна на условия на околната среда.

ISN могат да наблюдават и анализират параметри на околната среда като качество на въздуха, температура, влажност и нива на замърсяване. Те могат да помогнат за ранно откриване на опасности за околната среда, като горски пожари или химически разливи.

### **Интелигентно земеделие**

ISN се използват в прецизното земеделие за наблюдение на почвените условия, здравето на културите и метеорологичните условия. Те позволяват оптимизирано управление на ресурсите и могат да подобрят добивите и да намалят използването на ресурси.

### **Контрол на индустриалните процеси**

В промишлеността ISN могат да се използват за наблюдение на производствените процеси или състоянието на производственото оборудване. Например безжичните сензори могат да бъдат имплементирани в производствени и монтажни линии за наблюдение и контрол на производствените процеси.

Химическите инсталации или рафинериите използват сензори, за да наблюдават състоянието на тръбопроводи. Миниатюрни сензори се вграждат в машинно оборудване на недостъпни за наблюдение места и сигнализират при повреда. В общия случай индустриалното оборудване и производствени линии се спират на определени интервали от време за планови ремонти и профилактики. Това е процедура, изискваща време и ресурси.

С помощта на сензорни мрежи поддръжката може да се проведе въз основа на реалното състояние на оборудването, което намалява разходите за поддръжка и увеличава живота на технологичното оборудване.

В производствени и промишлени условия ISN могат да наблюдават и контролират машини и оборудване. Те се използ-

ват за предсказуема поддръжка, контрол на качеството и оптимизация на процеси.

### **Здравни приложения.**

ISN могат да се използват за наблюдение и проследяване на състоянието на възрастни хора за целите на здравеопазването, което може значително да облекчи сериозния недостиг на медицински персонал и да намали разходите за здравеопазване в съвременните системи за здравеопазване.

В здравеопазването ISN могат да наблюдават жизнените показатели на пациента, да проследяват движението на медицинско оборудване и дори да следят нивото на хигиена и санитарните условия в болниците. Това може да доведе до подобрена грижа за пациентите и ефективно управление на ресурсите. ISN често са интегрирани в мобилни устройства като смарт часовници и фитнес тракери, за да наблюдават биометричните данни и да предоставят обратна връзка в реално време.

Безжични сензори могат да бъдат интегрирани в човешкото тяло в мрежи, наречени WBAN (Wireless Body Area Network) [17] за наблюдение на жизнени параметри на човешкия организъм, параметри на околната среда и географско местоположение и по този начин да позволят дългосрочно, неинвазивно и амбулаторно наблюдение на пациенти или възрастни хора с незабавна реакция в случай на спешност, доклади до наблюдаващия лекар за техните текущи здравни състояния и актуализации в реално време на медицинските записи на потребителите.

### **Ителигентни градове**

ISN могат да се използват в различни приложения за интелигентни градове, включително управление на трафика, управление на отпадъците, обществена безопасност и мониторинг на околната среда, за да направят градовете по-ефективни и устойчиви.

ISN играят решаваща роля в интелигентните домове, като наблюдават и контролират различни устройства и системи, като интелигентни термостати, охранителни камери и системи за управление на енергията.

### **Умен дом (Smart home)**

Безжичните сензори могат да бъдат вградени в дома и да бъдат свързани към автономна домашна мрежа. Например интелигентен хладилник, свързан към интелигентна печка или микровълнова фурна, може да подготви меню въз основа на инвентара на хладилника и да изпрати рецепта и параметри за готвене към интелигентна печка или микровълнова фурна, които ще зададат желаната температура и време за готвене [18]. Съдържанието и статусът на медийни устройства (телефони, аудиосистеми и др.) могат да се наблюдават и контролират дистанционно, за да отговарят на различните изисквания на членовете на семейството.

Сензорите могат да бъдат разположени в дома на пациента, за да наблюдават поведението на пациента. Например сензор може да предупреди лекарите, когато пациентът падне и се изисква незабавна медицинска помощ. Той може да следи какво прави пациент и да предоставя напомняния или гласови инструкции.

### **Мониторинг на местообитанията**

Сензорите могат да се използват за наблюдение на условията на дивите животни или растения в природата, както и промяната на условията на околната среда от местообитанията. ISN помагат на изследователи и природозащитници да изучават поведението на дивата природа, моделите на миграция и условията на местообитанията. Те допринасят за опазването и защитата на застрашени видове и екосистеми.

### **Мониторинг на инфраструктурата**

ISN се използват в много приложения за сигурност и наблюдение. Например акустични, видео и други видове сензори се разполагат в сгради, летища, подлези и други критични инфраструктури, като атомни централи или комуникационни центрове за идентифициране и проследяване на нарушители и осигуряване на навременни аларми и защита от потенциални атаки.

Мостове, язовири и друга критична инфраструктура могат да бъдат наблюдавани от ISN, за да се открият структурни аномалии и да се гарантира тяхната безопасност.

### **Дистанционно измерване**

Безжичните сензори се използват за отдалечно отчитане на консумацията на електроенергия, вода или газ и след това да изпращат показанията до отдалечен център чрез безжична комуникация.

В допълнение към горните приложения, самоконфигурируемите (Ad-Hock) WSN могат да се използват в много други области, например помош при бедствия, контрол на движението, управление на складове и гражданско строителство.

### **Мониторинг на бедствия**

Сензорите могат да бъдат плътно разположени в определен регион за откриване на природни бедствия и катализми. Например сензорите могат да бъдат разпръснати в горите, за да сигнализират за възникване на горски пожари или наводнения. Сеизмичните сензори могат да бъдат инсталирани в сграда, за да се установи посоката и големината на трус и да се направи оценка на безопасността на сградата.

ISN подпомагат системите за ранно предупреждение за природни бедствия като земетресения, наводнения и свлачища. Те могат също така да помогнат при координирането на усилията за реагиране при извънредни ситуации.

### **Транспорт и логистика**

ISN могат да се използват за проследяване на превозни средства, товари и наблюдение на условията на трафика. Това повишава ефективността на логистиката, намалява разхода на гориво и подобрява безопасността.

### **Управление на енергията**

ISN могат да наблюдават потреблението на енергия в сгради и промишлени съоръжения, позволявайки по-добро енергоспестяване и спестяване на разходи.

### **Мониторинг на опасностите**

Този вид мрежи се използват за наблюдение на биологични или химични опасности в района на наблюдение, например химически завод или бойно поле. ISN се имплементират в системите за сигурност за откриване на нежелани прониквания, наблюдение на чувствителни зони и подобряване на автоматизирания видеоанализ.

### **Военни приложения**

Безжичните сензори могат бързо да бъдат внедрени в бойно поле или във враждебен регион без инфраструктура. Поради лекотата на разгръщане, самоконфигурируемостта, непретенциозната работа и толерантността на грешките сензорните мрежи ще играят важна роля в бъдещите военни C3I системи и ще направят бъдещите войни по-интелигентни с по-малко човешко участие [19].

Сензорите могат да бъдат разположени в бойно поле за наблюдение на присъствието на сили и превозни средства и проследяване на техните движения, което позволява да се извърши мониторинг в реално време на противниковите сили.

Безжични сензори могат да бъдат монтирани на беспилотни летателни апарати, танкове, изтребители, подводници,

ракети или торпеда, за да ги насочват около препятствията към техните цели и да ги накарат да се координират помежду си за осъществяване на по-ефективни атаки или отбрана.

Сензорните възли могат да бъдат разположени около чувствителни обекти, например атомни електростанции, стратегически мостове, нефто и газопроводи, комуникационни центрове и военни щабове с цел защита.

Сензорите могат да бъдат използвани за дистанционно наблюдение на ядрени, биологични и химически оръжия, откриване на потенциални терористични атаки и разузнаване.

### **Селскостопанска автоматизация**

ISN могат да се използват в прецизното земеделие за наблюдение и контрол на напояването, торенето и контрола на вредителите, което води до по-устойчиви и ефективни земеделски практики.

#### **2.3.1. Характеристики на ISN**

Характеристиките на сензорните мрежи и изискванията на различните приложения имат решаващо влияние върху целите на архитектурата и топологията на мрежата по отношение на мрежовите възможности и ефективността. Основните цели в процеса на проектиране на интелигентни сензорни мрежи включват следните няколко аспекта:

##### **Минимизация на сензорния модул**

Намаляването на размера на електронните сензорни модули е една от основните цели на дизайна на сензорните мрежи. Намаляването на размера на сензорните устройства улеснява техния монтаж и намалява разходите и консумацията на енергия.

### **Оптимизиране на себестойността на сензорния модул**

Намаляването на цената на модула е друга основна цел при проектирането на сензорните мрежи. Тъй като сензорните модули (възли) често се разполагат в негостоприемна или враждебна среда и е почти невъзможно да могат да бъдат използвани повторно, важно е да се намали цената на сензорните възли, така че да се намали цената на цялата мрежа.

### **Оптимизация на енергоемкостта на сензорния модул**

Намаляването на консумацията на енергия е най-важната цел при проектирането на сензорна мрежа. Тъй като сензорните възли имат като правило автономно захранване, което често е много трудно или дори невъзможно да се подмени, от решаващо значение е да се намали консумацията на енергия на сензорните възли, така че животът на отделните сензорни възли, както и на мрежата като цяло да се удължи.

### **Самостоятелно конфигуриране**

В сензорните мрежи сензорните възли често се разполагат в регион, който е труднодостъпен и няма възможност за предварително планиране и инженеринг. Веднъж разгърнати, сензорните възли трябва да могат да се организират автономно в комуникационна мрежа и да преконфигурират своята свързаност в случай на промени в топологията и повреди на възлите.

### **Скалируемост**

В сензорните мрежи броят на сензорните възли може да бъде от порядъка на десетки, стотици или хиляди. По този начин мрежовите протоколи, предназначени за сензорни мрежи, трябва да бъдат мащабири унифицирани до различни размери на мрежата.

### **Адаптивност**

В сензорните мрежи модулът може да се повреди или да се премести, което би довело до промени в плътността на

възлите и топологията на мрежата. По този начин мрежовите протоколи, предназначени за сензорни мрежи, трябва да са адаптивни към такива промени.

### **Надеждност**

За много приложения на сензорната мрежа се изиска надеждно предаване на данни по натоварени безжични канали. За да изпълнят това изискване, мрежовите протоколи, проектирани за сензорни мрежи, трябва да осигуряват механизми за контрол на грешки и корекции, за да осигурят надеждна доставка на данни.

### **Тolerантност към грешки (Fault tolerance)**

Сензорните възли са предразположени към повреди поради работата им в неблагоприятни външни условия. Поради тази причина сензорните възли трябва да са устойчиви на повреди и да имат вградени процедури за самотестиране (self test), самокалибиране (autocalibration) и самовъзстановяване при леки повреди [20].

### **Сигурност**

При работа във военни системи сензорните възли са уязвими за противника. В такива ситуации сензорната мрежа трябва да има ефективни механизми, за да защити данните от неоторизиран достъп или злонамерени атаки.

### **Използване на канала**

Безжичните сензорни мрежи, използващи радиокомуникация, по правило имат ограничена честотна лента.

Поради тази причина комуникационните протоколи, предназначени за сензорни мрежи, трябва ефективно да използват честотната лента, за да се подобри пропускната способност на комуникационните канали.

### **QoS (Quality of Service) поддръжка**

В сензорните мрежи различните приложения могат да имат различни изисквания за качество на услугата QoS (Quality of Service) [21] по отношение на латентността на доставката и загубата на пакети. Някои приложения, например използващи сензори за откриване на пожар, са чувствителни към забавяне и поради това изискват бърза доставка на данни. Други приложения, като събирането на данни за научно изследване, са толерантни към забавяне, но не могат да понесат загуба на пакети. По този начин дизайнът на мрежовия протокол трябва да отчита изискванията за QoS на конкретни приложения.

По принцип сензорните мрежи се проектират за специфични цели и имат различни изисквания към архитектурата си и начина на работа.

#### **2.3.2. Предизвикателства при проектирането на ISN**

Специфичните изисквания към безжичните мрежови компоненти на сензорните мрежи генерираят много предизвикателства при проектирането, които включват следните основни аспекти:

##### **Ограничен енергиен капацитет**

Безжичните сензорните възли по правило са с автономно захранване и поради това имат ограничен енергиен капацитет. Това ограничение представя много нови предизвикателства при проектирането на мрежови архитектури и протоколи за сензорни мрежи, както и разработването на хардуер и софтуер за тях.

Удължаването на експлоатационния живот на сензорната мрежа изисква оптимизация на консумацията на енергия като част от дизайна на сензорната мрежа, хардуер и софтуер и мрежови архитектури и протоколи.

## Ограничени хардуерни ресурси

Сензорните възли имат ограничен капацитет за обработка и съхранение на данни и могат да изпълняват само ограничени изчислителни функции. Тези хардуерни ограничения поставят много предизвикателства при разработването на софтуер и проектирането на мрежови протоколи за сензорни мрежи, които трябва да отчитат не само енергийното ограничение в сензорните възли, но и капацитета за обработка и съхранение на сензорните възли.

### **Ad hoc характеристики**

Повечето сензорни мрежи се състоят от голям брой сензорни възли, стигащ до десетки хиляди в даден регион. Архитектурата на мрежата и топологията на възлите обикновено зависят от приложението [22].

Разпространена практика е сензорните възли да бъдат разпръснати на случаен принцип в планирана област или да се спуснат масово върху недостъпен или враждебен регион. Сензорните възли трябва да могат да се организират автономно в комуникационна мрежа, преди да започнат да изпълняват задачи за измерване и мониторинг.

### **Работна среда.**

Сензорната мрежа обикновено работи в динамична и ненадеждна среда. От една страна, топологията на сензорната мрежа може да се променя често поради повреди, допълнения или изчерпване на енергия.

От друга страна, сензорните възли се свързват, използвайки обща радиокомуникационна среда, което повишава риска от грешки при предаване или приемане на данни.

### **Разнообразни приложения**

Сензорните мрежи имат широк спектър от различни при-

ложenia. Изискванията за различните приложения могат да варират значително. Не съществува мрежов протокол, който да отговаря на изискванията на всички приложения. Дизайнът на сензорните мрежи е специфичен за приложението и често сензорни мрежи, съставени от едни и същи компоненти като хардуер, имат коренно различна архитектура и топология.

### Библиография към Глава втора:

1. Villordo-Jiménez, Iclia & Zaldivar-Huerta, I. & Galvan-Tejada, G. (2006). An Overview of SDMA in Communications Systems. 1. 168–171. 10.1109/MWSCAS.2006.382023.
2. Inukai, T. & Jupin, D. & Lindstrom, R. & Meadows, D. (1988). ACTS TDMA network control architecture. 10.2514/6.1988-798.
3. Sinha, Madhusudan & Trivedi, Vinay & Kumar, P. (2015). Single Carrier FDMA for Next Generation Communication Systems: An Overview.
4. Petrosky, Eric & Michaels, Alan & Ernst, Joseph. (2019). A Low Power IoT Medium Access Control for Receiver-Assigned CDMA. International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking. 11. 24–41. 10.4018/IJITN.2019040103.
5. Du, Rui & Xie, Hailiang & Hu, Mengshi & Narengerile, & Xin, Yan & McCann, Stephen & Montemurro, Michael & Han, Tony & Xu, Jie. (2022). An Overview on IEEE 802.11bf: WLAN Sensing. 10.48550/arXiv.2207.04859.
6. Gandolfo, Pierre & Gilb, Jim. (2002). Project: IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs) 802.15.3 Overview – High Rate WPAN Standard for 1394 Trade Association. 10.13140/RG.2.2.21898.08640.
7. Singh, Umesh & Mewada, Shivilal & Laddhani, Lokesh & Bunkar, Kamal. (2011). An Overview and Study of Security Issues & Challenges in Mobile Ad-hoc Networks (MANET).
8. Narang, Gaurav & Deshwal, Aryan & Ayoub, Raid & Kishinevsky, Michael & Doppa, Janardhan & Pande, Partha. (2023). Dynamic Power Management in Large Manycore Systems: A Learning-

to-Search Framework. ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems. 28. 10.1145/3603501.

9. Ghosh, Shreya & Das, Jaydeep. (2022). Dynamic Voltage and Frequency Scaling Approach for Processing Spatio-Temporal Queries in Mobile Environment. 10.1007/978-3-031-08038-8\_9.

10. Karani, Manish & Kale, Ajinkya & Kopekar, Animesh. (2011). Wireless Sensor Network Hardware Platforms and Multichannel Communication Protocols: A Survey.

11. Eady, Fred. (2007). Chapter 11. Renesas. 10.1016/B978-012370887-8/50012-2.

12. Levis, Philip & Gay, David. (2009). TinyOs Programming. 10.1017/CBO9780511626609.

13. Gay, David & Levis, Philip & von Behren, Rob & Welsh, Matt & Brewer, Eric & Culler, David. (2014). The nesC language. ACM SIGPLAN Notices. 49. 41–51. 10.1145/2641638.2641652.

14. Cao, Qing & Abdelzaher, Tarek & Stankovic, John & He, Tian. (2008). LiteOS, a UNIX-like operating system and programming platform for wireless sensor networks.

15. Sesli, Erhan & Hacioglu, Gökçe. (2017). Contiki OS Usage in Wireless Sensor Networks (WSNs). 2. 1–6.

16. Rasool, Illa Ul & Zikria, Yousaf & Musaddiq, Arslan & Amin, Farhan & Kim, Sung. (2016). RIOT-OS: Operating System for Future IoTs.

17. Kurunathan, Harrison. (2017). Study and overview on WBAN under IEEE 802.15.6. U.Porto Journal of Engineering. 1. 11-21. 10.24840/2183-6493\_001.001\_0003.

18. Rehman, Attique Ur & Tito, Shafiqur & Ahmed, Daud & Nieuwoudt, Pieter & Lie, Tek Tjing & Vallès, Brice. (2020). An Artificial Intelligence-Driven Smart Home Towards Energy Efficiency: An Overview and Conceptual Model. 10.1109/FORTEI-ICEE50915.2020.9249816.

19. Bai, Haowei. (2010). Implementation of An Interoperable Architecture for Command, Control, and Communication. 10.2514/6.2010-8646.

20. Kabashkin, Igor. (2021). Fault tolerance of cluster-based nodes

in IoT sensor networks with periodic mode of operation. 10.1016/B978-0-12-821255-4.00007-9.

21. Higgins, L. & Hsu, K. & McDowell, G. & Nakamoto, G. & Sax, W.. (2001). The quality of service (QoS) event manager – automated implementation of QoS policies. 850 – 854 vol.2. 10.1109/MILCOM.2001.985960.

22. C. Siva Ram Murthy and B.S. Manoj. (2004). Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols. Prentice Hall PTR, USA.

# **ГЛАВА ТРЕТА.**

## **МРЕЖОВИ АРХИТЕКТУРИ И ТОПОЛОГИИ НА БЕЗЖИЧНИТЕ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ**

### **3.1. Мрежови архитектури**

Изборът и изграждането на мрежовата архитектура е основна стъпка в проектирането на една компютърна мрежа. Това е т.нар. framework за спецификация на физическите компоненти на мрежата и тяхната функционална организация и конфигурация, нейните оперативни принципи и процедури, както и използваните комуникационни протоколи.

В областта на телекомуникациите спецификацията на мрежова архитектура включва подробно описание на продуктите и услугите, доставяни чрез комуникационната мрежа.

Мрежовата архитектура на Интернет се изразява предимно чрез използването на стандартизиран пакет от интернет протоколи, а не специфични за всяко приложение начини за взаимно свързване на мрежи или възли в мрежата, или използването на нестандартизиирани типове хардуерни връзки.

#### **Разпределени изчисления**

При системи за разпределени изчисления, мрежовата архитектура често описва структурата и класификацията на архитектурата на разпределено приложение [1].

Популярен пример за използване на термина „разпределени приложения“ е организацията на възли в т.нар. peer-to-peer (P2P) мрежи [2].

P2P мрежите обикновено се изграждат като надстройка

на основна физическа или логическа мрежа. Тези надстройващи мрежи могат да изграждат определени организационни структури на възлите според различни модели и използвани мрежови архитектури на системата.

### **Видове мрежови архитектури**

Типовете мрежова архитектура могат да бъдат разделени на два основни типа:

- клиент/сървър архитектура;
- peer-to-peer архитектура.

#### **3.1.1. Архитектура клиент/сървър**

Архитектурата клиент–сървър е структура на разпределено приложение, която разделя задачи или работни натоварвания между доставчиците на ресурс или услуга, наречени сървъри, и заявители на услуги, наречени клиенти. Този модел е подкатегория на разпределените изчисления, за разлика от архитектурата peer-to-peer, при която всички възли в мрежата могат да действат едновременно като „клиенти“ и „сървъри“ на другите възли.

##### **Основни концепции:**

**Клиент** – клиентът е компютър, който има достъп до споделени мрежови ресурси, предоставени от друг компютър (сървъра). В контекста на Интернет клиентите обикновено са уеб браузъри, мобилни приложения или други потребителски приложения.

**Сървър** – сървърът е компютър или компютърна програма, която предоставя услуги на клиента по мрежа. Сървърът съдържа ресурси и услуги като файлове на уеб сайтове, съдържание на база данни и приложения.

**Цикъл на заявка и отговор** – клиентът инициира заявка към сървъра и чака отговор. Сървърът обработва заявката и изпраща обратно необходимия отговор, който може да бъде исканият ресурс, потвърждение или съобщение за грешка.

**Споделяне на ресурси** – сървърите често предоставят ресурси на множество клиенти едновременно и могат да управяват начина, по който тези ресурси са достъпни и модифицирани.

**Мрежа** – клиентът и сървърът комуникират през компютърна мрежа, която може да бъде сензорна мрежа (WSN), локална мрежа (LAN) или облачна услуга.

#### **Видове сървъри:**

**Уеб сървър** – доставя уеб страници на клиенти при поискване. Това е най-често среяната форма, като примери са Apache и Internet Information Services (IIS) на Microsoft.

**Сървър за приложения** – хоства процеси и динамично съдържание на уеб приложения. Тези сървъри предоставят бизнес логика на приложните програми чрез различни протоколи, включително HTTP и HTTPS.

**Сървър на бази данни** – предоставя услуги за достъп и управление на бази данни, действайки като централен склад за данни. Microsoft SQL Server, ORACLE и MySQL са примери за СУБД (Системи за Управление на Бази Данни).

**Файлов сървър** – съхранява и управлява файлове на централно място, което е достъпно за клиенти.

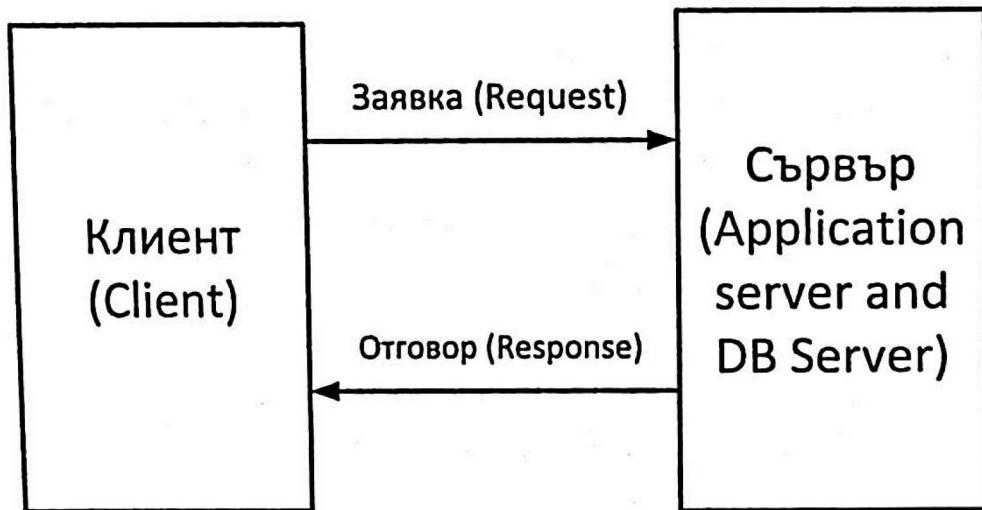
**Пощенски сървър** – управлява и прехвърля електронна поща като част от услугите за съобщения.

#### **Основни видове архитектура при сензорните мрежи**

##### **Двуслойна архитектура**

Двуслойната архитектура (2-tier architecture) е показана на фиг. 1 и се състои от клиентски слой на приложението и слой сървър на данни [3].

## Двуслойна архитектура

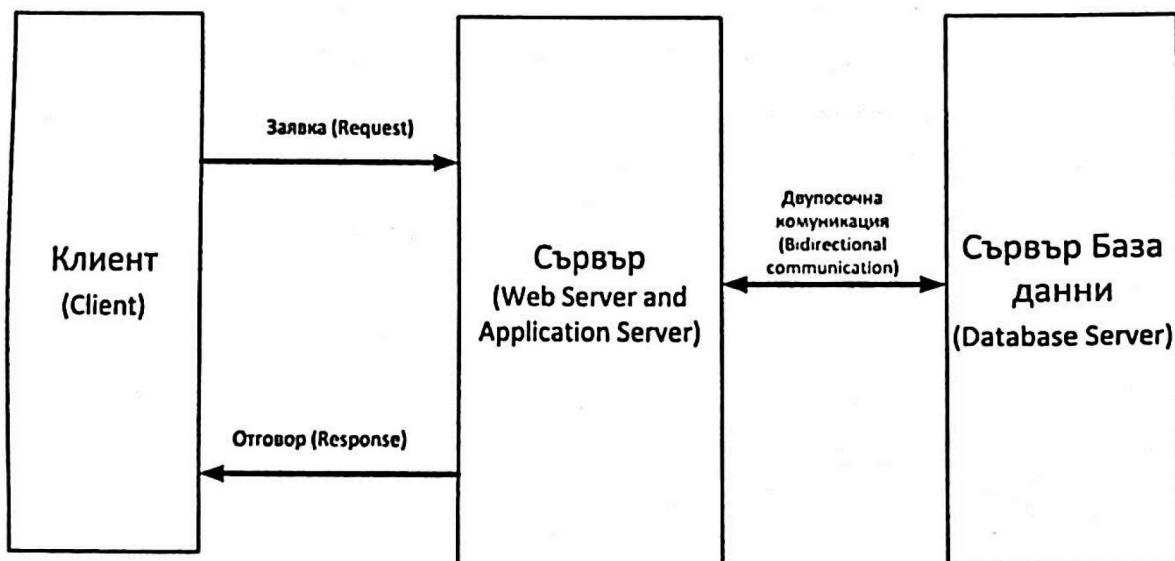


Фиг. 1. Блокова схема на двуслойна архитектура

## Трислойна архитектура

Архитектурата с три нива (3-tier architecture) е показана на фиг. 2 и включва слой сървър на приложения, слой сървър на данни, както и слой клиентско приложение.

## Трислойна архитектура

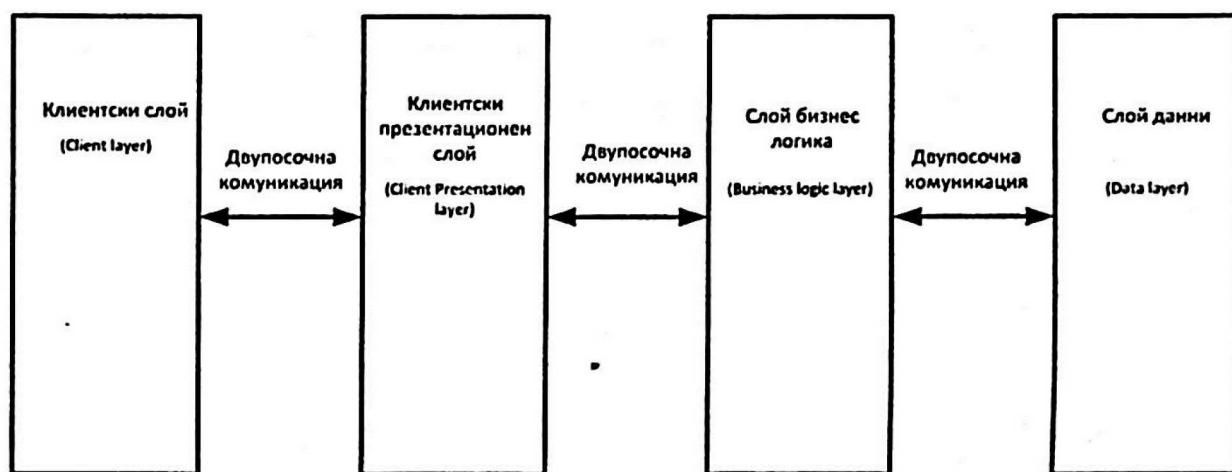


Фиг. 2. Блокова схема на трислойна архитектура

## Многослойна архитектура

Многослойната архитектура е показана на фиг. 3, като освен базовата архитектура на три нива, се състои и от допълнителни слоеве данни и сървъри на приложения [4].

### Многослойна архитектура



Фиг. 3. Блокова схема на многослойна архитектура

#### 3.1.2. Архитектура peer-to-peer

Както вече бе споменато, това, което отличава peer-to-peer типовете мрежова архитектура от архитектурата клиент/сървър, е отсъствието на сървър. Всеки компютърен модул се обозначава с термина *peer*. Всеки peer в общия случай има приблизително същото натоварване и права за комуникация като останалите модули в мрежата.

Възможно е също така йерархично изградена архитектура и архитектурата *peer-to-peer* да се появят в съвместна форма [5]. Такова подреждане е възможно, когато възлите във всеки слой на йерархична архитектура осъществяват равнопоставена peer-to-peer комуникация.

### 3.2. Мрежови топологии при безжичните сензорни мрежи

Топологията на една мрежа представлява графично описание на тази мрежа.

Основно се разглеждат два вида топологии – физическа и логическа.

Физическата топология има отношение към начина, по който е разположена една мрежа физически. Този вид топология описва разположението на кабелите и работните станции и реалното местоположение и връзки на всички мрежови компоненти.

Логическата топология описва начина на взаимодействие на компонентите на мрежата на ниво обмен на съобщения.

Има четири основни типа топология:

- Шина (bus) – може да бъде както логическа, така и физическа;
- Пръстен (ring) – може да бъде както логическа, така и физическа;
- Мрежа (mesh) – може да бъде както логическа, така и физическа;
- Звезда (star) – само физическа.

#### 3.2.1. Топология шина (bus)

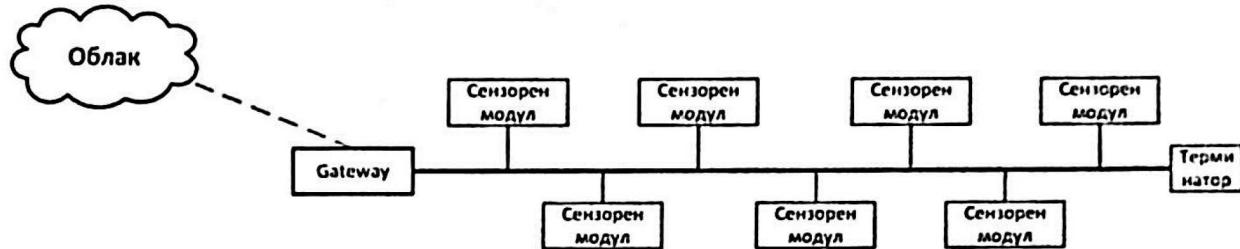
Физически представлява комуникационен кабел (обикновено коаксиален) с разклонения, към които са включени сензорните модули [6].

Предимства:

- лесен монтаж;
- ниска цена на изграждане.

Недостатък:

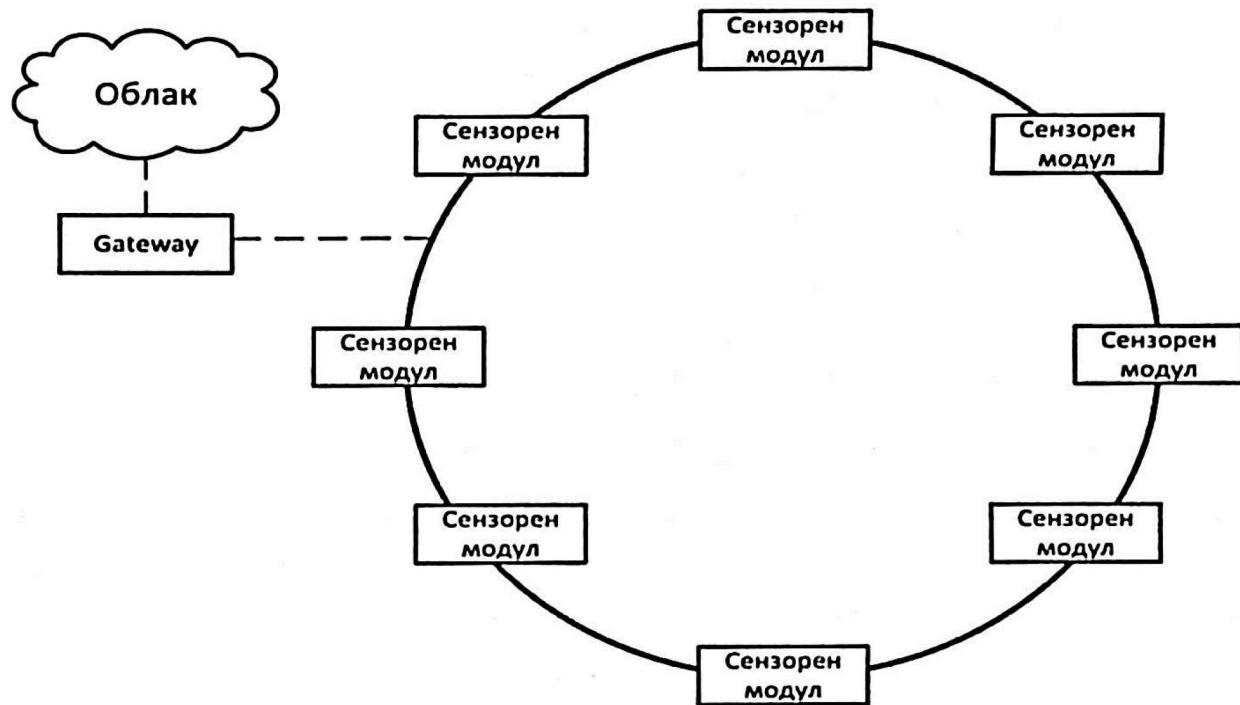
- трудно изолиране на повредата;
- честотната лента е обща и се споделя от всички модули.



*Фиг. 4. Блокова схема на топология шина*

### 3.2.2. Топология пръстен (ring)

Всяко устройство има специална линия от точка до точка свързан само към двете устройства от двете страни [7].



*Фиг. 5. Блокова схема на топология пръстен*

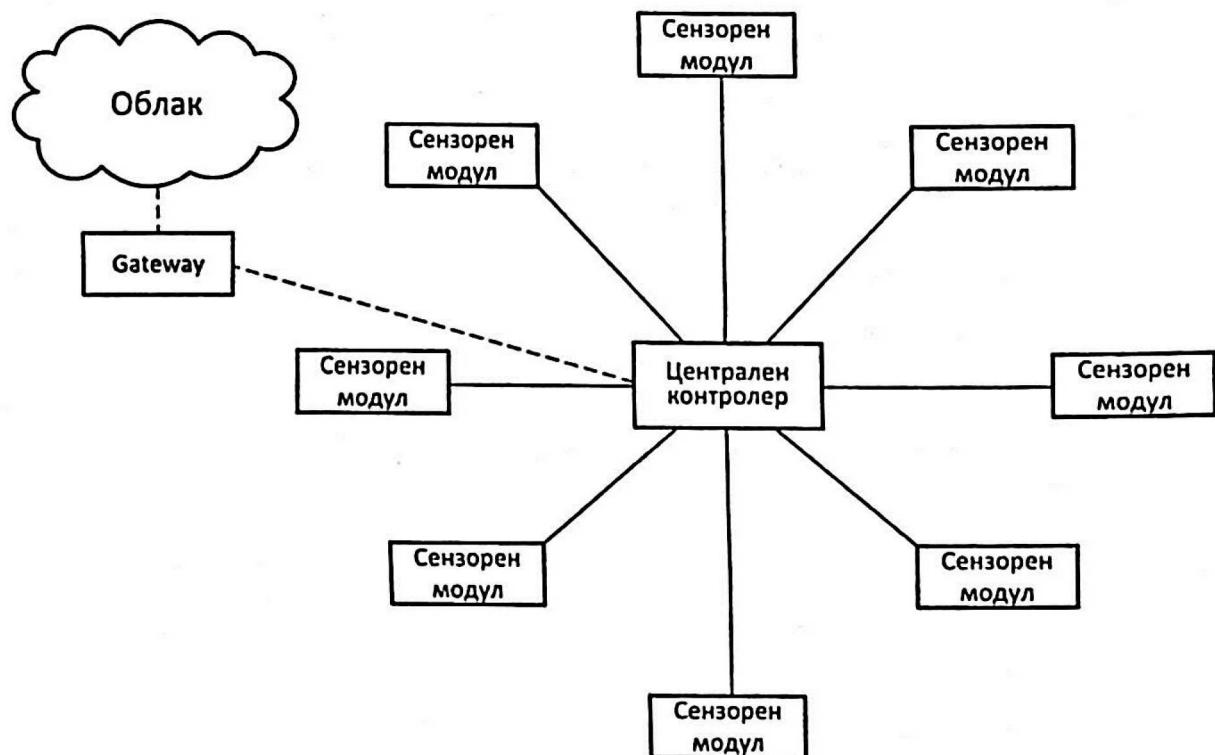
Предимство:

- лесен монтаж;
- изолирането на грешки е опростено.

Недостатък:

- смяната на модул може да повлияе на мрежата;
- честотната лента е обща и се споделя от всички модули.

### 3.2.3. Топология звезда (star)



Фиг. 6. Блокова схема на топология звезда

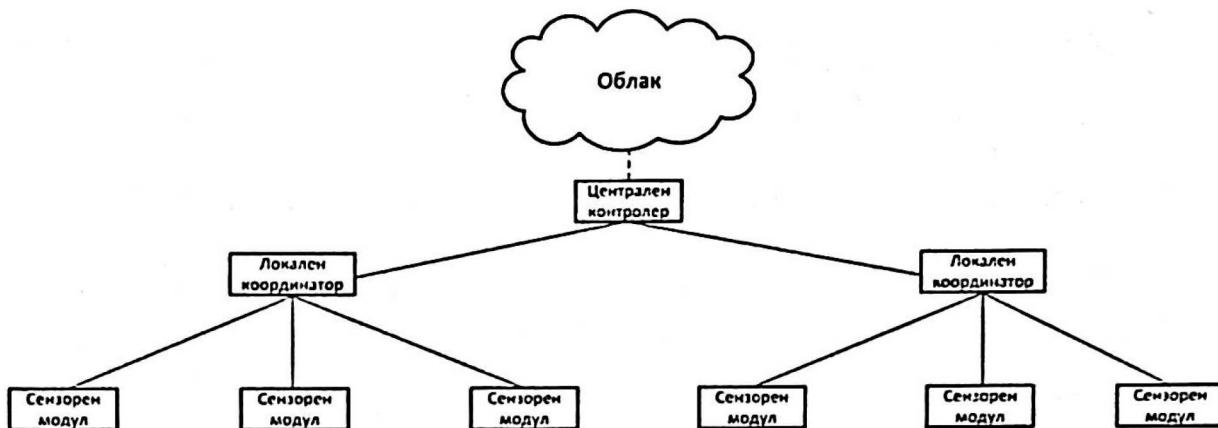
При топология звезда един сензорен модул изпълнява ролята на централен контролер и притежава права и технически възможности (процесорна мощ и обем памет) да управлява цялата мрежа. При тази топология през него преминават всички потоци от данни.

Други мрежови устройства се включват в мрежата само след като се асоциират към централния контролер [7].

На база на топология звезда (star) се формира и топология дърво (tree).

### 3.2.4. Дърводидна (tree) топология

Група от сензорни модули и свързана йерархично с нея група базови сензорни модули-координатори образуват дърводидна топология.



*Фиг. 7. Блокова схема на дърводидна топология*

Дърводидната топология може да бъде във форма на едно или няколко разклонения с йерархична структура [7]. Единичната дърводидна структура съдържа само един координатор. Всички сензорни модули са свързани към координатора директно и формално в процеса на формиране на мрежата топологията на мрежата се превръща в звездовидна.

По принцип дърводидната мрежова топология може да съдържа повече от един координатор.

Групата от координатори формира йерархична подмрежа. Всеки от координаторите може да комуникира както с централния координатор, така и с други външни за мрежата устройства, като възли за синхронизация, gateway устройства и др.

#### Предимства и недостатъци

##### Предимства:

- ако връзката се провали, само тази връзка е засегната;
- честотната лента не се споделя.

Недостатък:

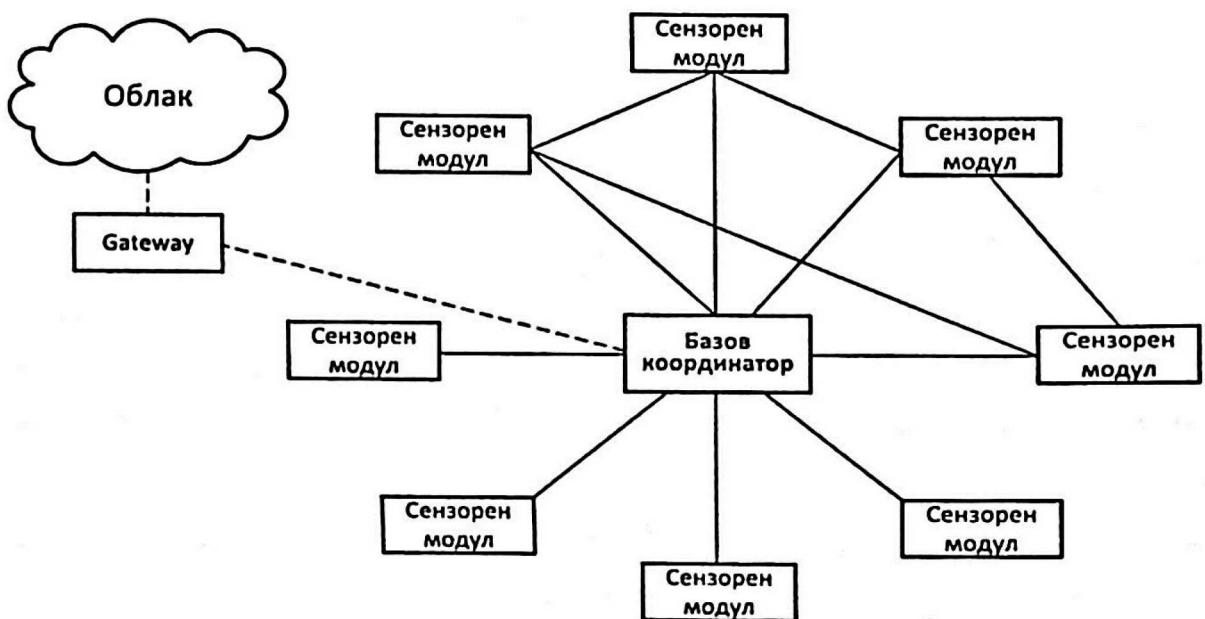
- повреда на централния хъб блокира цялата мрежа.

Недостатък на тази топология е относително ниската надеждност при предаване на данни поради липса на алтернатива при маршрутизация.

При отказ на някой от координаторите се прекъсва комуникацията до цяла група от възли и цял клон.

### 3.2.5. Топология разширена звезда (extended star)

Този вид топология също изисква базов координатор за стартиране на процедурата по инициализиране на мрежата.



Фиг. 8. Блокова схема на топология разширена звезда

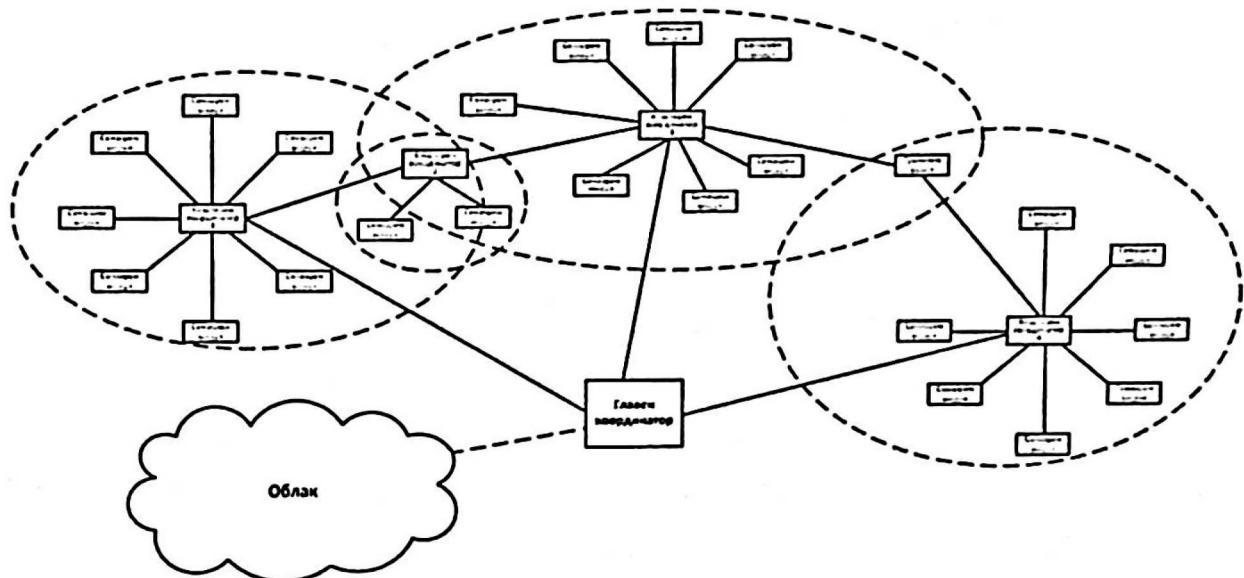
За разлика от стандартната топология звезда, при extended star комуникацията между сензорните модули е директна и не се ограничава от централния координатор (Hub).

Всеки сензорен модул може свободно да комуникира с друг сензорен модул в режим, специфициран от режима на работа на мрежата [8].

На база топология extended star се формира топология кълъстер.

### 3.2.6. Кълъстерна топология

На фиг. 9 е показана примерна кълъстерна топология, където всеки кълъстер се свързва с друг кълъстер чрез възел, който е общ за два съседни кълъстера, т.нр. граничен възел (border node). Като гранични възли могат да се специфицират както кълъстерни координатори (CH), така и обикновени възли с FFD (Full Function Device) функционалност [9].

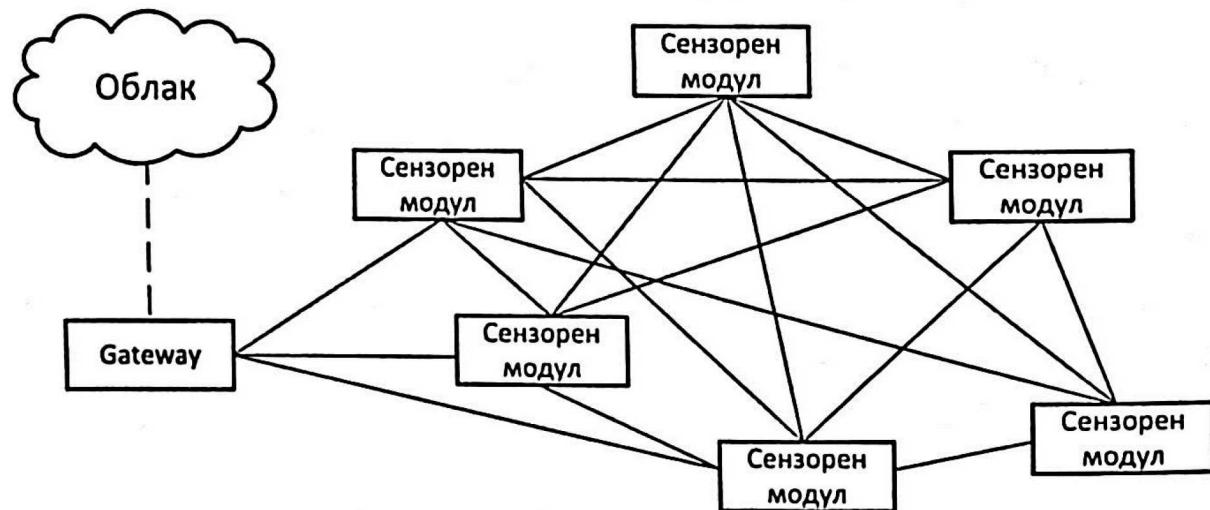


Фиг. 9. Блокова схема на топология разширена звезда

Както е показано на фиг. 9, кълъстерният координатор може да играе ролята и на граничен възел. Особеното при този тип кълъстерни координатори е че той има 2 логически адреса – един като кълъстерен координатор и друг като граничен възел. В останалите случаи сензорни модули, които са регистрирани в два съседни кълъстера, могат да изпълняват функцията и на гранични устройства (border node).

### 3.2.7. Mesh топология

Има две форми на mesh топологията: пълно и частично свързана мрежа.



Фиг. 10. Блокова схема на mesh топология

При топология напълно свързана мрежа всеки сензорен модул в мрежата има директна връзка с всеки от другите сензорни модули в тази мрежа.

При частично свързаната mesh топология, показана на фиг. 10, най-малко два от сензорните модули в мрежата имат връзки към множество други сензорни модули в тази мрежа [10].

Това е нискобюджетен начин за резервиране на сензорна мрежа. Ако един от основните модули или връзки в мрежата се повреди, останалата част от мрежата продължава да работи нормално.

#### Предимства на mesh топологията

Управлява големи количества трафик, тъй като множество устройства могат да предават данни едновременно. Mesh топологията е стабилна. Линиите не се споделят (в повечето случаи).

Повреда на едно устройство не причинява прекъсване на мрежата или предаване на данни. Добавянето на допълнител-

ни устройства не прекъсва предаването на данни между други устройства.

### **Недостатъци на mesh топологията**

Разходите за внедряване са по-високи от други мрежови топологии, което я прави по-малко желан вариант откъм цена на изграждане. Поддържането на топологията е трудно и отнема време.

Вероятността за излишни връзки е висока, което добавя към високите разходи за изграждане и потенциал за намалена ефективност.

Всяко устройство има специална връзка от точка до точка към (почти) всяко друго устройство. Напълно свързаната mesh топология има  $N(N-1)/2$  физически канала за свързване на  $N$  устройства.

### **Библиография към Глава трета:**

1. Steenkiste, Peter. A high-speed network interface for distributed-memory systems: architecture and applications, ACM Transactions on Computer Systems (TOCS), Volume 15, Issue 1, pp. 75–109  
<https://doi.org/10.1145/244764.244767>
2. Buford, John & Yu, Heather & Lua, Eng. (2009). Peer-to-Peer Concepts. 10.1016/B978-0-12-374214-8.00002-7.
3. Voinov, Artem & Senokosov, Ilya. (2022). The Concept of Client-Server Architecture for Remote Control of a Distributed Knowledge Base. 10.1007/978-3-031-21340-3\_12.
4. Tahir, Shaniar. (2019). Client-Server Architecture. 10.13140/RG.2.2.26275.50720.
5. Cornelius Ihle, Dennis Trautwein, Moritz Schubotz, Norman Meuschke, and Bela Gipp. (2023). Incentive Mechanisms in Peer-to-Peer Networks – A Systematic Literature Review. ACM Comput. Surv. 55, 14s, Article 308 (December 2023), 69 pages. <https://doi.org/10.1145/3578581>
6. Peter I. P. Boulton and E. Stewart Lee. (1983). Bus, ring, star

and tree local area networks. SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 13, 3 (July 1983), 19–24. <https://doi.org/10.1145/1024842.1024844>

7. Kessler, Gary. (2015). Local Area Network Topologies, Protocols, and Design. 10.1002/9781118851678.ch6.

8. Satoru Watanabe and Satoshi Okawa. (2003). An extended star graph: a proposal of a new network topology and its fundamental properties. In Proceedings of the 2003 international conference on Parallel and distributed processing and applications (ISPA'03). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 220–227.

9. Kuhlman, Chris, Bryan Lewis, Richard Beckman, Stephen Eubank, and Tridib Dutta. (2010). Clustering method incorporating network topology and dynamics. In Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference (SpringSim '10). Society for Computer Simulation International, San Diego, CA, USA, Article 14, 1–9. <https://doi.org/10.1145/1878537.1878552>

10. Loscri, V. (2007). A topology-independent scheduling scheme for wireless mesh networks. In Proceedings of the 3rd international conference on Wireless internet (WICON '07). ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), Brussels, BEL, Article 2, 1–9.

# **ГЛАВА ЧЕТВЪРТА.**

## **ОСНОВНИ СТАНДАРТИ ПРИ БЕЗЖИЧНИТЕ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ**

### **4.1. Приложими стандарти**

Безжичните сензорни мрежи се считат за една от най-важните технологии на ХХI век. В последните години технологиите, свързани с тях, получават сериозно развитие. Типичната сензорна мрежа е изградена от голям брой мултифункционални безжични сензорни модули с автономно захранване, микроконтролерно управление с вградена памет тип SoC (System on Chip) и радиокомуникационен модул.

Особено голямо внимание се обръща на проектирането и изграждането на хетерогенни безжични сензорни системи за интелигентно управление на дома, т.нр. Smart Home [2]

Един от основните стандарти в областта на безжичните сензорни мрежи е разработеният от IEEE стандарт 802.15.4. Детайлен сравнителен анализ на този стандарт и свързаните с него протоколи е публикуван в Alexandrov et al [1].

### **4.2. Стандарт IEEE 802.15.4 и протоколи за безжични сензорни мрежи**

Стандарт IEEE 802.15.4 [3] е стандарт, разработен от IEEE 802.15 Task Group 4, който определя физическите и MAC слоеве за нискоскоростни WPAN.

Стандартът дефинира физически и media access слоеве на нискоскоростни безжични мрежи. Той се поддържа от ра-

ботна група IEEE 802.15 и е дефиниран през 2003 г. Този стандарт се явява основа за комуникационните протоколи ZigBee, 6LowPan, ISA100.11a, WirelessHart и MiWi, всеки от които се явява надстройка на стандарта и изгражда слоеве, които не са дефинирани от 802.15.4.

Както е дефинирано в преамбула на стандарта, целта на група 4 е да предостави стандарт за висока надеждност, с ниска цена, ниска консумирана мощност и безжична свързаност, базирана на относително ниска скорост на обмен на данни между сензорните устройства.

Стандартът има следните характеристики:

- скорост на данни от 250 Kbps, 40 Kbps и 20 Kbps;
- два режима на адресиране: 16-битово кратко и 64-битово IEEE адресиране;
- поддръжка на критични латентни устройства, например джойстици;
- достъп до CSMA-CA канал;
- автоматично изграждане на мрежа чрез оторизиран модул координатор;
- протокол базиран на ръкостискане (handshaking) за надеждност на трансфера;
- управление на мощността за осигуряване на ниска консумация на енергия;
- 16 канала в 2,4-GHz ISM диапазон, 10 канала в обхвата 915-MHz и 1 канал в обхвата 868-MHz.

Физическият слой на стандарта IEEE 802.15.4 е определен за съвместна работа с други IEEE стандарти за безжични мрежи, например IEEE 802.11 (WLAN) [4] и IEEE 802.15.1 (Bluetooth) [5]. Той включва активиране и деактивиране на радиоприемника и предаване на пакети на физическо ниво.

Стандартът работи в една от следните три ленти без лиценз:

- 868–868,6 MHz (Европа) със скорост на предаване на данни 20 Kbps.
- 902–928 MHz (Северна Америка) със скорост на предаване на данни 40 Kbps.
- 2400–2483,5 MHz (в световен мащаб) със скорост на предаване на данни 250 Kbps.

MAC слоят базиран на този стандарт предоставя данни и услуги за управление на горните слоеве. Услугата за данни позволява предаване и приемане на MAC пакети през физическия слой. Услугите за управление включват синхронизация, управление на времеви интервали и асоцииране и разделяване на устройства към мрежата. MAC слоят също така реализира и базови механизми за сигурност.

#### **Стандарт IEEE 802.15.4 и пакет протоколи ZigBee**

Пакетът протоколи и стандарт ZigBee е предложен в края на 2004 г. от ZigBee Alliance [6], [7] асоциация от компании, които работят заедно за създаване на надеждни, икономически ефективни, нискомощни безжични мрежи за мониторинг и контрол на безжични продукти, базирани на отворен глобален стандарт.

Първото издание на стандарта ZigBee бе преразгледано в края на 2006 г. и въвежда разширения относно стандартизацията на профилите на приложенията и някои незначителни подобрения на мрежовия и приложния слой.

И двете версии на стандарта са със свободно разпространение.

По принцип стандартът IEEE 802.15.4 определя само физическите и MAC слоеве, без да се дефинират по-високите слоеве на протокола, като мрежовите и приложните слоеве. В същото време стандартът ZigBee [8] е разработен като надстройка над IEEE 802.15.4 и дефинира и мрежовия и приложния слоеве.

Мрежовият слой осигурява функционалности за различни мрежови топологии, а приложният слой осигурява рамка за разпределено развитие и комуникация на приложения.

ZigBee оперира в нелицензираните радиобандове (радиоленти) включващи радиочестотите 2.4 GHz, 900 MHz и 868 MHz.

Протоколът позволява на сензорните устройства да комуникират в различни мрежови топологии и допуска проектиране на устройства с голяма автономност, достигаща до 10 години без смяна на батерията и фърмуера.

Основните предимства на ZigBee протокола включват:

- поддръжка на различни мрежови топологии като point-to-point, point-to-multipoint и mesh;
- допуска дълъг duty cycle, което осигурява ниско ниво на консумация на енергия.
- ниска латентност;
- директен DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) [5];
- поддържа до 65 000 възела с една мрежа;
- 128-битово AES криптиране на пакетите;
- вградена процедура за избягване на колизиите при предаване на пакети.

Комбинацията от стандарт 802.15.4 и ZigBee позволява поддръжката на безжична комуникация с ниска консумация на енергия и ниска скорост на предаване на данни с безжични устройства, захранвани от батерии.

Потенциалните приложения на тези стандарти включват безжични сензорни модули, безжични системи за автоматизация на дома, дистанционни управления и др.

### IEEE 802.15.4 – стандарт и 6LoWPAN протокол

Терминът 6LoWPAN е акроним на IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks [9]. 6LoWPAN също така е

име на работна група, развиваща протокола (IETF).

Концепцията 6LoWPAN е породена от идеята, че IP протоколът трябва да може да се имплементира даже и в най-малките устройства с ниска консумация на енергия и ограничени процесорни ресурси.

Групата, разработваща протокола 6LoWPAN, е дефинириала механизми за капсулиране и компресиране на хедъра на пакета, което позволява IPv6 пакети да бъдат изпращани и приемани от всички базирани на стандарта IEEE 802.15.4 мрежи, както и от мрежи, използващи други протоколи (WiFi 802.11, WiMax и др.).

#### **IEEE 802.15.4 стандарт и протокол ISA 100.11a**

Протоколът ISA100.11a е одобрен от стандарта ISA/ANSI и е проектиран специално за автоматизация и контрол на индустриални процеси.

Протоколът е базиран на стандарта IEEE 802.15.4, „personal area network“ (PAN), който дефинира само долните два слоя (физически и media access) на комуникационния стек [10]. ISA100.11a надгражда комуникационния стек чрез добавяне на допълнителни слоеве, осигуряващи маршрутизация, защита от интерференции, duocast meshing, peer-to-peer messaging и интернет адресируемост. В момента той е стандартизиран и от IEC като IEC62734.

#### **IEEE 802.15.4 и WirelessHART протокол**

Протокол WirelessHART е специализиран индустрислен безжичен протокол вариант на HART (Highway Addressable Remote Transducer) протокола. Основното приложение на този протокол е за изграждане на мрежи за автоматизирано управление и контрол на технологични процеси [11].

Разглежданият протокол използва времева синхронизация и притежава вградени механизми за самоорганизация и само-

възстановяване на безжичната мрежа в случай на отказ на едно или няколко безжични устройства. Протоколът оперира в нелицензирания 2.4GHz обхват и се явява надстройка на физическия и media access слоеве на стандарта IEEE 802.15.4.

### **IEEE 802.15.4 MiWi протокол**

MiWi е частен безжичен протокол, проектиран от Microchip Corporation, използваш производствените от Microchip радиочипове с батерийно захранване с цел изграждане на безжични персонални мрежи WPANs (Wireless Personal Area Networks).

Протоколът е реализиран на база на стандарта IEEE 802.15.4 и осигурява ценово оптимизирана нискоскоростна комуникация на къси дистанции.

Главното предимство на MiWi протокола е, че редуцира съществено себестойността на безжични сензорни мрежи за индустриски мониторинг и контрол и намира широко приложение при контрол на големи групи от светлинни източници, както и при отдалечно събиране на данни от измервателни прибори.

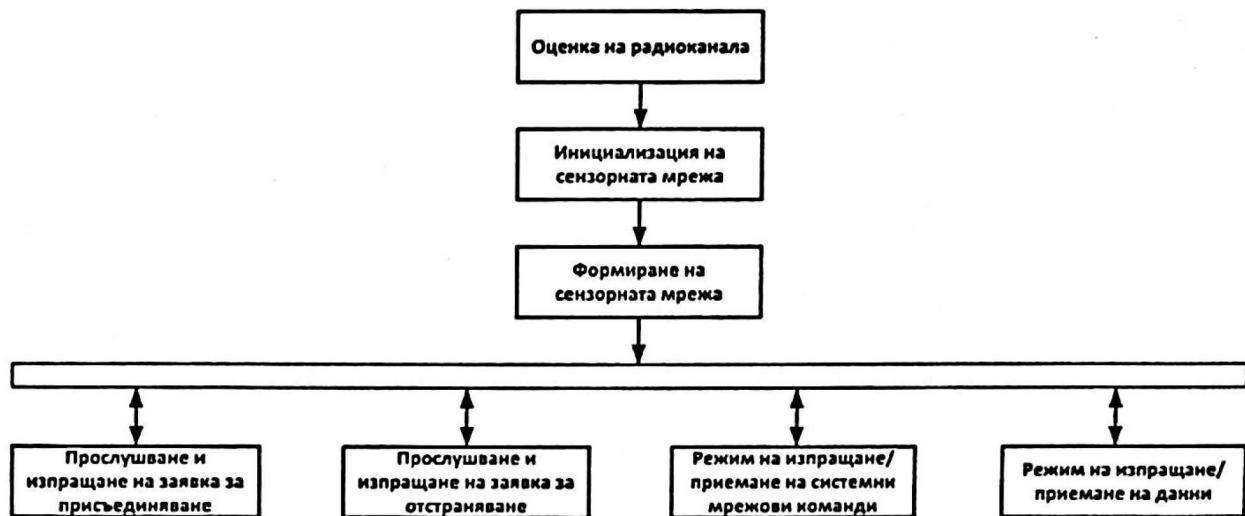
Протоколът се поддържа от всички 32-битови PIC и dsPIC микроконтролери.

### **Процедури по конфигуриране на мрежи, базирани на IEEE 802.15.4**

Процесът на формиране и свързаните с него комуникационни протоколи на една типична безжична сензорна мрежа, изградена по стандарт 802.15.4, е показан на фиг. 11.

Процедурата започва с оценка на радиоканал, след това стартира инициализация на мрежата и процедура по анонсиране (обявяване на формираната мрежа).

След процедурата по анонсиране стартират няколко процедури, показани на фиг. 11, които се осъществяват паралелно в съответствие с концепциите, дефинирани в стандарта 802.15.4.



*Фиг. 11. Процедура по изграждане на безжична сензорна мрежа, базирана на стандарта 802.15.4*

### 4.3. Стандарт 802.11ah

IEEE 802.11ah е безжичен мрежов протокол, публикуван през 2017 г., наречен Wi-Fi HaLow [12],[13],[14], като изменение на стандарта за безжична мрежа IEEE 802.11-2007. Той използва нелицензириания честотен обхват 900 MHz с цел създаване на Wi-Fi мрежи с разширен обхват, в сравнение с конвенционалните Wi-Fi мрежи, работещи в честотния обхват 2,4 GHz и 5 GHz.

IEEE 802.11ah позволява по-ниска консумация на енергия, чрез създаването на големи свързани групи от безжични модули или сензори, с възможност на ретранслиране на данни, поддържайки концепцията на IoT (Internet of Things).

Ниската консумация на енергия на протокола се конкурира с Bluetooth и има като допълнително предимство по-високите скорости на данни и по-голям обхват на покритие.

#### 4.4. Стандарти ITU-T Y.4480 LoRa и LoRaWAN

LoRaWAN използва звездна мрежова топология подобна на локална мрежа. Всички крайни възли се свързват към LoRaWAN шлюзове, които се свързват към един централен мрежов сървър. С LoRaWAN производителите на IoT могат да изградят или закупят своя собствена мрежова инфраструктура или да намерят доставчик, който обслужва района, който искаат да внедрят [15].

Има няколко основни причини производителите да търсят LoRaWAN за своите нужди от IoT свързаност и това е един от най-популярните видове LPWAN(Low-Power Wide-Area Network). Но тази технология има и някои недостатъци.

Доста често термините LoRa и LoRaWAN се използват взаимозаменяемо, но те дефинират два различни типа комуникационни протоколи.

LoRa (Long Range) е LPWAN протокол [16], който дефинира физическия слой на мрежата. Това е патентована технология, собственост на Semtech, която използва Chirp Spread Spectrum за преобразуване на радиочестотите в битове, така че да могат да бъдат транспортирани през мрежа. LoRa е една от безжичните технологии, на които е базиран LoRaWAN, но не се ограничава само до LoRaWAN.

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) е протокол от горен слой, който определя комуникацията и архитектурата на мрежата [17]. По-конкретно това е протокол за ниво на контрол на достъпа до средата (MAC) с някои компоненти на мрежовия слой. Той използва LoRa, но се отнася конкретно до мрежата и дефинира начина на предаването на данни през нея.

### **Предимства от използването на LoRaWAN**

LoRaWAN в много отношения е уникална мрежова технология. По-долу са изброени основните причини, поради които производителите на IoT го намират за подходящ за имплементация.

#### **Нелицензирани честотни ленти**

Докато клетъчните оператори работят основно на лицензирани честоти, всички LoRaWAN мрежи използват нелицензирани бесплатни честотни ленти, които варират според държавата. В известен смисъл това е и проблем, тъй като всички LoRaWAN мрежи използват едни и същи честоти.

При покриващите се LoRaWAN мрежи и други мрежи в една и съща честотна лента могат да си пречат една на друга и да представляват предизвикателства за сигурността на IoT.

#### **Технология с отворен код**

В сравнение със собствения чип софтуерът LoRaWAN е с отворен код, което означава, че е лесно да се разработят собствени LoRaWAN решения и има множество доставчици, които продават оперативно съвместими мрежовите компоненти като сървъри и шлюзове.

#### **Добро покритие**

LoRaWAN работи добре в закрити пространства. Използват се честоти под 1 GHz и много тясна честотна лента, което осигурява добро покритие и проникване на закрито.

LoRaWAN също е полезен, защото може да се получи покритие почти навсякъде по света – стига или да има съществуващ доставчик на услуги с инфраструктура, или да има възможност от изграждане за собствена инфраструктура.

### **Ниска консумация на енергия**

LoRaWAN позволява на свързаните устройства да „спят“, когато не предават активно или не слушат сигнал. Освен това предаването или получаването на сигнал през LoRaWAN изисква по-малко от 50 милиампера (mA) ток. Това означава, че производителите могат да очакват техните устройства да имат до 10 години живот на батерията.

### **Проблеми с LoRaWAN**

Въпреки силните си страни, LoRaWAN има и няколко сериозни недостатъка, като липса на инфраструктура, ограничен роуминг, ниска пропускна способност и др.

#### **Липса на мрежова инфраструктура**

С клетъчно базирани IoT устройства може да се изгради мрежа навсякъде по света само чрез свързване с мобилен оператор. Инфраструктурата е налице, преди да се изгради IoT мрежата. В много райони на света има доставчици на LoRaWAN, но съществуват държави, региони или градове, които не предлагат такива услуги [18]. LoRaWAN е идеален за разширяване на покритието до места, където няма други решения за свързаност, като конкретни сгради или изолирани места. Също така може да бъде жизнеспособна алтернатива на безжичния MBus, Wifi или Bluetooth. Ниските разходи на LoRaWAN (поради нелицензирани ленти) за съжаление често се обезсмислят от значителната инвестиция, която трябва да се направи при внедряването.

#### **Ограничени възможности за роуминг**

Докато доставчиците на LoRa услуги могат да предложат достъп до LoRa шлюзове, които вече са внедрени, често тези доставчици нямат споразумения за роуминг помежду си [19]. Това означава, че внедряването в нови региони ще изисква

или да се подпише договор с друг доставчик, или да се изгради собствен LoRaWAN, за да се покрие новата област.

Използването на различно решение за всяко внедряване може да превърне управлението на свързани мрежи в сериозен проблем.

### **Ограничени възможности за обмен на голям обем данни**

LoRaWAN мрежите могат да улеснят IoT комуникациите. Но те не могат да се справят с пренос на голям обем данни. LoRaWAN позволява на всички свързани устройства да предават, когато имат нужда. Колкото повече устройства сте свързали наведнъж, толкова по-голям е шансът те да предават по едно и също време и да си прочат. LoRaWAN често създава високо ниво (над 50%) на грешки PER (Packet Error Rate) в пакети при предаване. По-високият PER увеличава продължителността на предаванията и прави консумацията на енергия по-трудна за прогнозиране [20]. Ако приложение изисква нисък PER (много приложения изискват PER от 0%), това няма да работи като система.

LoRaWAN шлюзовете не могат да предават и получават едновременно. Така че ако едно приложение изисква потвърждения за получаване на съобщения (за да се гарантира, че данните са доставени правилно) и LoRa устройства предават често, това може често да направи тези шлюзове недостъпни.

LoRaWAN не предоставя потвърждения за съобщения, освен ако възлите не ги поискат, а изпращането на актуализации на фърмуера до устройство за коригиране на грешки или уязвимости ще ги направи недостъпни. Това принуждава да се направи избор между прекъсване на услугата и надеждност.

## 4.5. Стандарти IEEE 1451

Стандартите IEEE 1451 са фамилия комуникационни стандарти за интелигентни преобразуватели на сигнала (т.нр. transducers), която определя набор от отворени, общи и независими от мрежата комуникационни интерфейси за свързване на преобразуватели (т.е. сензори или задействащи механизми) към микропроцесори, системи за измерване и контролни / полеви мрежи [21].

Преобразувателите имат много приложения в промишлеността, например в индустриалния контрол, автомобилостроенето, аерокосмическото строителство, биомедицината и др.

Тъй като пазарът на преобразуватели е много разнообразен, производителите търсят начини за изграждане на евтини мрежови безжични мултифункционални интелигентни датчици.

Тъй като е скъпо и неефективно за производителите на преобразуватели да произвеждат интелигентни датчици, специфични за всяка от големия брой безжични мрежи на пазара, е разработен пакетът от базирани на IEEE 1451 отворени стандарти за преобразуване, за справяне с тези проблеми [22].

Основната характеристика на тези стандарти е дефинирането на електронно базиран списък с данни на преобразувателя TEDS (Transducer Electronic Data Sheets), представляващ устройство с памет, прикрепено към датчика за съхранение на идентификацията на преобразувателя, данни за калибриране, корекция, диапазон на измерване, информация, свързана с производството и т.н.

TEDS се имплементира основно по два начина:

- TEDS може да се намира във вградена памет, обикновено FLASH или EEPROM, в самия преобразувател, който е свързан към измервателния уред или системата за управление;
- TEDS може да съществува виртуално като файл с дан-

ни, достъпен от измервателния уред или системата за управление. Виртуалният TEDS разширява стандартизирания TEDS до наследени сензори и приложения, където вградената памет може да не е налична.

Целта на IEEE 1451 е да улесни производителите на преобразуватели да разработят интелигентни устройства и да свържат тези устройства с мрежи, системи и инструменти, като включат съществуващи и нововъзникващи сензорни и мрежови технологии. Основната идея при този подход е да се позволи достъпът до данните на преобразувателя чрез общ набор от интерфейси, независимо дали предавателите са свързани към системи или мрежи чрез жичен или безжичен носител.

Семейството на стандартите IEEE 1451 е спонсорирано от Техническия комитет за сензорни технологии на IEEE [23]. Определенията на стандартите IEEE 1451 са описани накратко по-долу:

- IEEE P1451.0 дефинира набор от общи команди, общи операции и TEDS за семейството на стандартите за интелигентни преобразуватели IEEE 1451. Чрез този набор от команди може да се получи достъп до всякакви сензори или изпълнителни устройства, базирани на IEEE P1451 като част от кабелни и безжични мрежи.
- IEEE 1451.1 дефинира общ модел на обект, описващ поведението на интелигентните датчици и оптимизиращ измервателните процеси и комуникационните модели.
- IEEE 1451.2 дефинира интерфейс преобразуватели към NCAP (Network Capable Application Processor) и TEDS (Transducer Electronic Data Sheets) за конфигурация от точка до точка.
- IEEE 1451.3 дефинира интерфейс преобразувател към NCAP и TEDS за т. нар. multidrop преобразуватели, използ-

вайки разпределена комуникационна архитектура. Това позволява на много преобразуватели да бъдат представени като сензорни възли, в преобразувателна мрежа, споделящи общи комуникационни канали [24].

- IEEE 1451.4 дефинира интерфейс със смесен режим на работа на аналогови преобразуватели с аналогови и цифрови режими на работа.
- IEEE P1451.5 дефинира интерфейс преобразувател към NCAP и TEDS за безжични преобразуватели [25].

Стандартите за протоколи за безжични мрежи, например 802.11 (WiFi), 802.15.1 (Bluetooth) и 802.15.4 (ZigBee), се считат за някои от физическите интерфейси за IEEE P1451.5.

- IEEE P1451.6 дефинира и преобразувател към NCAP интерфейс и TEDS, използвайки високоскоростния мрежов интерфейс CANopen.

#### **Библиография към към Глава четвърта:**

1. Alexandrov, A. (2014). Comparative analysis of IEEE 802.15.4 based communication protocols used in wireless intelligent sensor systems. Proc. of the International conference RAM 2014.
2. Zouheir, Labbi, Mohamed Senhadji, Ahmed Maarof and Mostafa Belkasmi. (2018). IoT Smart Homes based on RFID Technology: Localization Systems Review. In Proceedings of the Fourth International Conference on Engineering & MIS 2018 (ICEMIS '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 2, 1–7. <https://doi.org/10.1145/3234698.3234700>
3. L. De Nardis and M. G. Di Benedetto. Overview of the IEEE 802.15.4/4a standards for low data rate Wireless Personal Data Networks, 2007 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, Hannover, Germany, 2007, pp. 285-289, doi: 10.1109/WPNC.2007.353647.
4. Qureshi, I.A., Asghar, S. A Systematic Review of the IEEE-802.11 Standard's Enhancements and Limitations. Wireless Pers Commun 131,

2539–2572 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10553-7>

5. Yang Xiao, Yi Pan, “Overview of IEEE 802.15.1 Medium Access Control and Physical Layers,” in Emerging Wireless LANs, Wireless PANs, and Wireless MANs: IEEE 802.11, IEEE 802.15, 802.16 Wireless Standard Family, Wiley, 2009, pp. 105–134, doi: 10.1002/9780470403686.ch5.

6. Domenico De Guglielmo, Simone Brienza, Giuseppe Anastasi, IEEE 802.15.4e: A survey, Computer Communications, Volume 88, 2016, Pages 1–24, ISSN 0140-3664, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.05.004>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366416301980>)

7. Farahani, S.. (2008). ZigBee Wireless Networks and Transceivers. 10.1016/B978-0-7506-8393-7.X0001-5.

8. Deshmukh, Ratnadeep & Sawale, Datta. (2006). ZigBee: Wireless Technology for Low-Power Sensor Networks: Review.

9. Geoff Mulligan. (2007) The 6LoWPAN architecture. In Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors (EmNets '07). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 78–82. <https://doi.org/10.1145/1278972.1278992>

10. T. P. Raptis, A. Passarella and M. Conti, “A Survey on Industrial Internet With ISA100 Wireless,” in IEEE Access, vol. 8, pp. 157177–157196, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019665.

11. D. Chen, M. Nixon, S. Han, A. K. Mok and X. Zhu, “WirelessHART and IEEE 802.15.4e,” 2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Busan, Korea (South), 2014, pp. 760–765, doi: 10.1109/ICIT.2014.6895027.

12. Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov, Alexander Krotov, Andrey Guschin, A survey on IEEE 802.11ah: An enabling networking technology for smart cities, Computer Communications, Volume 58, 2015, Pages 53–69, ISSN 0140-3664, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.08.008>.

13. Tian, L., Santi, S., Seferagić, A., Lan, J., Famaey, J.: Wi-Fi HaLow for the Internet of Things: an up-to-date survey on IEEE 802.11 ah research. J. Netw. Comput. Appl. 182, 103036 (2021)

14. Šljivo A, Kerkhove D, Tian L, Famaey J, Munteanu A, Moerman I, Hoebeka J, De Poorter E. Performance Evaluation of IEEE

802.11ah Networks With High-Throughput Bidirectional Traffic. Sensors (Basel). (2018) Jan 23;18(2):325. doi: 10.3390/s18020325. PMID: 29360798; PMCID: PMC5854999.

15. Pablo Avila-Campos, Fabian Astudillo-Salinas, Andres Vazquez-Rodas, and Alcides Araujo. 2019. Evaluation of LoRaWAN Transmission Range for Wireless Sensor Networks in Riparian Forests. In Proceedings of the 22nd International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 199–206. <https://doi.org/10.1145/3345768.3355934>

16. Zehua Sun, Huanqi Yang, Kai Liu, Zhimeng Yin, Zhenjiang Li, and Weitao Xu. (2022) Recent Advances in LoRa: A Comprehensive Survey. ACM Trans. Sen. Netw. 18, 4, Article 67 (November 2022), 44 pages. <https://doi.org/10.1145/3543856>

17. Ismail Butun, Nuno Pereira, and Mikael Gidlund. 2018. Analysis of LoRaWAN v1.1 security: research paper. In Proceedings of the 4th ACM MobiHoc Workshop on Experiences with the Design and Implementation of Smart Objects (SMARTOBJECTS '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 5, 1–6. <https://doi.org/10.1145/3213299.3213304>

18. Bonilla, Vicky & Campoverde, Brandon & Yoo, Sang Guun. (2023). A Systematic Literature Review of LoRaWAN: Sensors and Applications. Sensors. 23. 10.3390/s23208440.

19. Qadir, Junaid & Butun, Ismail & Gastaldo, Paolo & Caviglia, Daniele. (2023). Review of Security Vulnerabilities in LoRaWAN. 10.1007/978-3-031-30333-3\_33.

20. H. Noura, T. Hatoum, LoRaWAN security survey: Issues, threats and possible mitigation techniques, Internet of Things, 12 (2020), p. 100303, 10.1016/j.iot.2020.100303, URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2542660520301359>

21. Janusz Bryzek, Introduction to IEEE-P1451, the emerging hardware-independent communication standard for smart transducers, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 62, Issues 1–3, 1997, Pages 711–723, ISSN 0924-4247, [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)01536-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)01536-7).

22. Kang Lee, "IEEE 1451: A standard in support of smart transducer networking," Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [Cat. No. 00CH37066], Baltimore, MD, USA, 2000, pp. 525–528 vol.2, doi: 10.1109/IMTC.2000.848791.
23. Da Rocha, H.; Abrishambaf, R.; Pereira, J.; Espirito Santo, A. Integrating the IEEE 1451 and IEC 61499 Standards with the Industrial Internet Reference Architecture. Sensors 2022, 22, 1495. <https://doi.org/10.3390/s22041495>
24. D. Potter, "Overview and applications of the IEEE P1451.4 smart sensor interface standard," Proceedings, IEEE AUTOTESTCON, Huntsville, AL, USA, 2002, pp. 777-786, doi: 10.1109/AUTEST.2002.1047959.
25. D. Wobischall, "IEEE 1451 an universal transducer protocol standard," (2007) IEEE Autotestcon, Baltimore, MD, USA, 2007, pp. 359-363, doi: 10.1109/AUTEST.2007.4374241.



## **ГЛАВА ПЕТА.**

# **КОМУНИКАЦИОННИ ПРОТОКОЛИ ПРИ БЕЗЖИЧНИТЕ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ**

Изборът на подходящ комуникационен протокол, съобразен с изискванията на конкретна сензорна мрежа, е от съществена важност за безпроблемна работа на сензорните устройства. Изискванията за оперативната съвместимост на една сензорна мрежа са водещи при избора на комуникационен протокол.

През последните няколко десетилетия комуникацията, базирана на OSI (Open Systems Interconnection), е обект на непрекъснати разработки в областта на конвенционалните безжични мрежи и е постигнат значителен напредък в различни аспекти на безжичното предаване на данни.

### **OSI модел – комуникационни протоколи**

Моделът за свързване на отворени системи OSI (Open Systems Interconnection) дефинира и кодифицира концепцията за стандартизирана многослойна мрежова архитектура [1].

Изпращането на данни по мрежа е сложно, тъй като различни хардуерни и софтуерни технологии трябва да работят надеждно през географски и политически граници.

OSI моделът на данни предоставя универсален език за компютърни мрежи, така че различни технологии да могат да комуникират, използвайки стандартни протоколи или правила за комуникация.

Моделът на практика е концептуална рамка, която разделя основните комуникационни функционалности на мрежата на седем слоя [2],[3].

Всяка технология в конкретен слой предоставя определени възможности и изпълнява специфични функции. Технологиите в по-високите слоеве се базират на технологии от по-ниско ниво, без да се налага да се тревожат за основните детайли на изпълнението.

Така дефинираните функционални групи от протоколи се използват за допълнително разделяне на комуникационна система на по-малки елементи за по добро управление на комуникацията.

Слотът е колекция от подобни функции. Всеки слой предоставя услуги на слоевете над него и изисква услуги от слоя под него, както е показано на фиг. 12.

OSI Слоеве	Приложение
7. Приложен слой	Application layer - позволява на потребителските приложения да заявяват услуги или информация.
6. Презентационен слой	Presentation layer- Извършва конвертиране, компресиране/декомпресиране, както и криптиране/декриптиране на информацията.
5. Сесион слой	Session layer - управлява създаването на сесиите между представителните слоеве на две (или повече) системи.
4. Транспортен слой	Transport layer - Предоставя на по-горните слоеве услуги за връзка (connection-oriented или connectionless), в зависимост от протоколите.
3. Мрежов слой	Network layer - задава логически адреси на източника и местоназначението, както и определя най-добрия път за маршрутизиране на данните
2. Канален слой	DataLink layer - предава и да приема кадри (frames), и отговаря за тяхното физическо адресиране.
1. Физически слой	Physical layer- е основният слой на модела и работи само с битове. Основната му функция е да предава данни по комуникационна линия

Фиг. 12. OSI модел – описание

В областта на безжичните сензорни мрежи се използва съкратен вариант на OSI, в който са изключени сесийният и презентационният слоеве [4].

Този вариант е показан на фиг. 13.

WSN OSI Слоеве	Комуникационни протоколи
Приложен слой	HL7, Modbus, AFP, ZIP, RTMP, NBP, RIP, SAP, APPC, LZW,S-LZW, DSC,
Транспортен слой	CODA, STCP, ARC, RMST, PSFQ, ESRT, GARUDA
Мрежов слой	LEACH, Directed diffusion, AODV, TEEN, SPIN
Канален слой	802.3 (Ethernet MAC), 802.11a/b/g/n MAC/LLC, 802.1Q (VLAN), Token Ring, CSMA, CSMA/CD, DCF, IEEE802.4, Bluetooth, ZigBee (802.15.4), CAN, FDDI
Физически слой	RS-232, Full duplex, RJ45, V.35, V.34, I.430, I.431, T1, E1, 10BASE-T, 100BASE-TX, POTS, SONET, SDH, DSL, 802.11a/b/g/n PHY, ITU-T G.hn PHY, Controller Area Network, DOCSIS

Фиг. 13. WSN базиран OSI модел – комуникационни протоколи

Протоколният стек за WSN е базиран на OSI, но е съкратен до пет стандартни протоколни слоя с цел адаптация към типичните характеристики на сензорите, а именно приложен слой, транспортен слой, мрежов слой, канален слой и физически слой. Тези слоеве са насочени към динамиката на сензорната мрежа и нейната ефективност. Внедряването на WSN ориентирани протоколи в различни слоеве в протоколния стек цели минимизиране на потреблението на енергия и поддържане на ефективността на системата [5].

Във физическия слой са разработени разнообразни техники за модулация, синхронизация и излъчване за различни мрежови сценарии и изисквания за приложение. На по-високи слоеве са разработени ефективни протоколи за комуникация

за справяне с различни проблеми в мрежата, като контрол на достъпа, маршрутизация, QoS (Quality of Service) и мрежова сигурност.

### **5.1. Безжични комуникационни технологии и протоколи на физическо ниво**

В тази глава основно внимание е обрнато на безжичната комуникация, базирана на радиочестоти в метровия, дециметровия и сантиметровия диапазон ( $30\text{MHz} - 30\text{GHz}$ ). Безжичните методи на комуникация базирани, на оптична и ултразвукова комуникация, имат относително малко приложение при изграждането на безжични сензорни мрежи и не са обект на тази монография.

Физическият (PHY) слой е отговорен за превръщането на битовите потоци в радиосигнали, които са най-често използвани за комуникация през безжичния канал [6]. По-конкретно физическият слой е отговорен за избор на радиочестота, генериране на носеща радиочестота, откриване на сигнал, модулация и криптиране на данни. Надеждността на комуникацията зависи и от хардуерните свойства на възлите, като коефициент на усиливане на антената и чувствителност на приемо-предавателния блок.

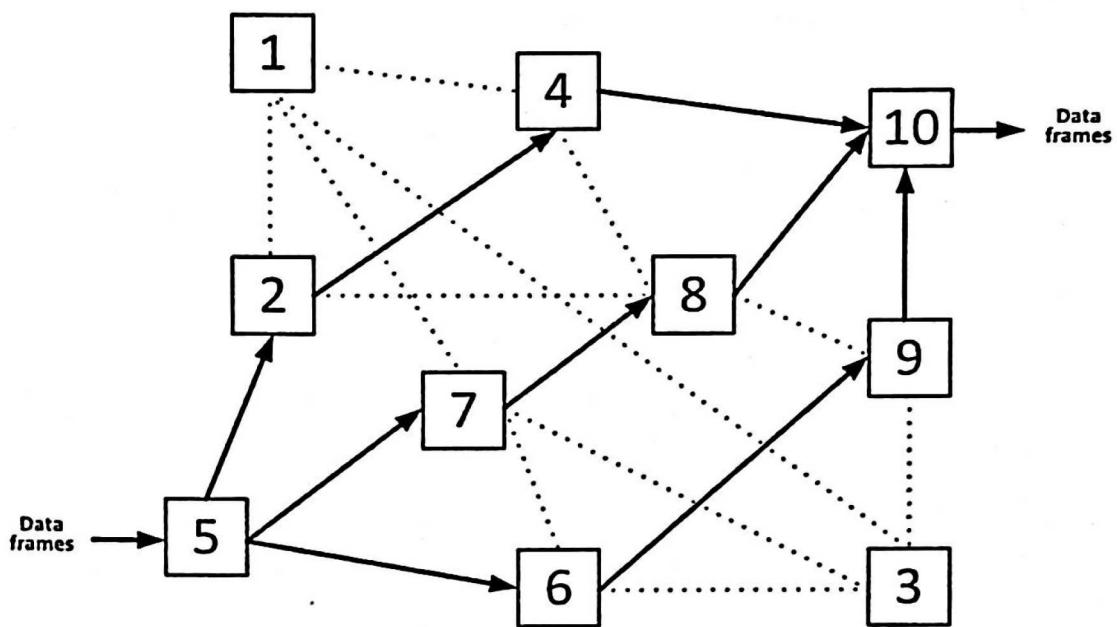
Основните предимства на безжичните сензорни мрежи са базирани на безжичната комуникация между сензорните модули. Безжичната комуникация дава възможност за бързина и лекота на изграждане, гъвкава мрежова инфраструктура и адаптивност.

Въпреки това безжичната комуникация носи и няколко предизвикателства по отношение на ограничения комуникационен обхват, като относително чести комуникационни сри-

вове и смущения в райони, наситени с инсталирано индустритално оборудване.

Безжичната комуникация на дълги разстояния може да е проблематична по отношение разходите за поддръжка на безжичната инфраструктура поради ефекта на разсейването, дифракцията, отражението и затихващите ефекти, влияещи върху разпространението на радиосигнала.

Използването на т.нар. *multi-hop* метод на комуникация в безжичните сензорни мрежи може достатъчно ефективно да преодолее ефектите на радиосянка, разсейване и отражение на радиосигнала, ако плътността на разположение на сензорните възли е достатъчно висока [7].



*Фиг. 14. Multi-hop метод на комуникация в безжичните сензорни мрежи*

Изборът на безжична среда за предаване на данни, използван в WSN, е един от най-важните фактори, тъй като уникалните свойства на различни среди поставят специфични ограничения върху възможностите на физическия слой.

Като цяло, безжичните връзки могат да бъдат формирани чрез радиочестотни, оптични, акустични или техники на магнитна индукция.

Въпреки, че RF (Radio Frequency) комуникацията е най-широко използвана среда за безжичен обмен на данни, другите техники за комуникация също имат конкретни сценарии на приложение.

### Радиочестоти

По-голямата част от съвременния хардуер за безжични сензорни модули е базиран на предаване на сензорни данни чрез радиосигнал (RF signal). Най-често използваните радиочестотни ленти за предаване на данни в безжичните сензорни мрежи са в диапазона 30 KHz до 300GHz.

Възможност за ниско бюджетна радиокомуникация при сензорните мрежи е използването на т.нар. ISM (Industrial Scientific and Medical) радиочестотни ленти, които предлагат комуникация без лиценз в повечето страни [8].

Основните видове технологии, използвани за радиочестотна комуникация при WSN, могат да бъдат класифицирани в три основни групи като теснолентови, с разширен спектър и ултрашироколентови UWB ( Ultra Wide Band) техники.

Теснолентовите технологии имат за цел да оптимизират ефективността на относително тясната честотна лента чрез използване на различни схеми за радиомодулация и контрол на грешките. По правило този тип технологии предлагат нискоскоростен обмен на данни.

Технологиите, използващи разширен и ултраразширен спектър, използват много по-голяма честотна лента, което гарантира по-висока скорост на обмен на данни.

Основните техники за радиочестотна комуникация са описани по-долу.

### **Теснолентова радиочестотна комуникация**

Голяма част от хардуерните платформи, разработени за WSN, и по-конкретно IoT (Internet of Things), използват теснолентови комуникационни техники. Такива платформи са Mica2, използваща трансивъра на Texas Instruments CC1000, със скорост на предаване на данни от 76 Kbps, LoRa и LoRaWAN със скорост на предаване 27 Kbps и др.

Голяма част от архитектурата на сензорите за безжична комуникация с автономно захранване [9] също използва теснолентови радиочестотни техники за комуникация поради ниската консумация на енергия.

### **Радиокомуникация с разширен спектър**

Напоследък се използват техники с разширен спектър за радиочестотна комуникация за подобряване на скоростта на данни и устойчивост на смущения. При този подход радиосигнал с ограничена честотна лента се разпространява в широка честотна лента, с цел увеличаване на дистанцията между съседни радиоканали. Това води до съществено повишаване на устойчивостта от смущения по съседен канал и отношение сигнал/шум.

Основните използвани техники са FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) [10] и DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) [11].

FHSS разчита на схема за превключване на предварително дефинирани честотни канали в рамките на един широколентов канал. При тази технология двойката предавател и приемник превключва динамично тези канали на базата на предварително определена схема за превключване (скачане). FHSS се използва основно в Bluetooth стандарта [12].

Пример за използване на FHSS са базираните на радиотрансивъра HC-05 сензорни модули, използващи Bluetooth

съвместим радиомодул с честота 2.4 GHz.

От друга страна, DSSS е техника, която предава сигнал за данни в диапазон от честоти, като го разпределя равномерно в разширен радиоспектър. Разширеният спектър с директна последователност (DSSS) се използва, за да се гарантира, че дадена честотна лента (и съответният диапазон от радиочестоти) се поддържа свободна от смущения.

Тази техника елиминира драстично проблема със смущенията в един и същ канал (две различни безжични мрежи, предаващи в една и съща честотна лента) и смущенията от кръстосани комуникации.

DSSS може също да се използва като алтернативен подход към мултиплексиране с ортогонално разделяне на честотите, където baseband сигналът се кодира и предава през количество фиксирани, предварително определени канали.

При този подход всеки канал може да носи различна информация, сигнали за данни или времеви интервали за различни приложения в рамките на една и съща мрежа. Разширеният спектър с директна последователност (DSSS) също се използва за предаване на данни, които са криптирани, а в някои процеси се използва за предаване на контролни сигнали за мониторинг на радиоканала.

DSSS технологията стана фактически стандарт за WSN със създаването на стандарта IEEE 802.15.4 [13]. Съответно много от последните сензорни платформи, базирани на чипа на Texas Instruments TI CC2420, използват тази технология. Сензорните модули, базирани на този чип, работят в диапазон 2.4 GHz и скорост 250 Kbps.

## **Радиокомуникация в ултраширок радиоспектър (UWB)**

UWB (Ultra Wide Band) е радиотехнология, която се използва за комуникации на къси разстояния с ултраширака честотна лента и нисък разход на енергия [14]. UWB се прилага с успех при персоналните безжични сензорни мрежи WBSN (Wireless Body Sensor Networks), насочени към събиране на данни от медицински сензори, за прецизно локализиране [15] и проследяване [16],[17],[18].

Поддръжката на UWB започна да се появява в смартфони от висок клас още в началото на 2019 г.

UWB използва предаване по базовата лента и по този начин не изисква междинни или носещи радиочестоти. Обикновено се използва модулация на импулсна позиция PPM (Pulse-position modulation). Тъй като UWB използва модулация на честотната лента, разходите за внедряване са значително пониски от DSSS системите. UWB е широко използвана техника и за безжични мултимедийни сензорни мрежи WMSN (Wireless Multimedia Sensor Network).

### **Други безжични технологии**

При имплементацията на WSN се използват основно RF базирани комуникационни технологии. Проблемите при този вид комуникация са свързани с ограничена честотна лента и податливост на смущения от други безжични източници. В допълнение към RF базираните комуникационни технологии, няколко други решения също са използвани за специфични приложения във WSN. Това са технологии, базирани на оптична (инфрачервена), акустична и магнитно-индукционна комуникация.

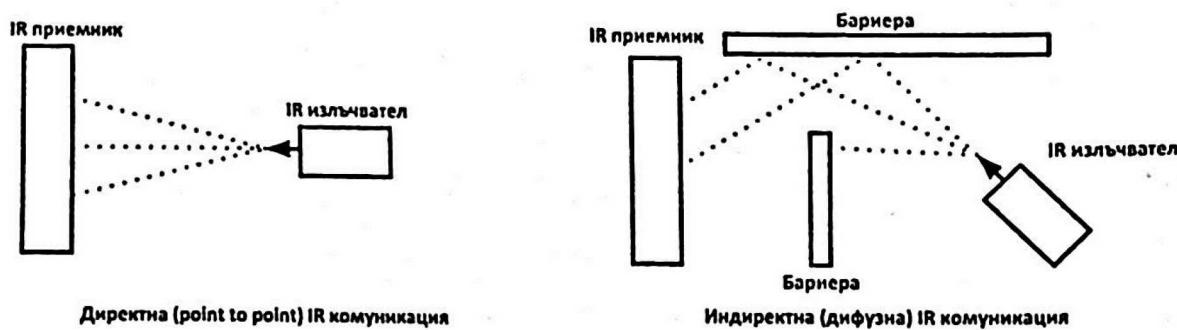
## Оптична комуникация

Оптичната (инфрачервената) комуникация се осъществява в лентата, която е в долния край на видимия спектър с дължина на вълната от 750 до 1000 nm. Инфрачервената оптична комуникация се използва главно за комуникация на къси разстояния в преносими устройства като мобилни телефони, лаптопи и smart устройства.

Методът на обмен на данни се базира на предавател, състоящ се от инфрачервен светодиод (IR-LED) за излъчване на модулирана инфрачервена светлина, която може да бъде приета от чувствителен към инфрачервения спектър фотодиод [19]. Предавателят модулира интензитета на инфрачервения спектър на база данните, подлежащи на предаване.

В приемника токът на фотодиода се използва за демодулиране и при нужда и декодиране на предаваната информация.

Инфрачервената комуникация може да се извърши по два начина, както е показано на фигура 15.



Фиг.15. Директна и дифузна инфрачервена комуникация

Най-често използван тип оптична комуникация е насочената комуникация от точка до точка, където предавателят и приемникът са насочени един към друг.

Комуникацията от точка до точка изисква линия на пряка видимост LoS (Line of Sight) между предавател и приемник.

Използвайки фокусиращи и насочващи средства, е възможно да се постигнат комуникационните дистанции от порядъка на 10 м при пряка видимост.

Вторият тип инфрачервена комуникация е дифузна комуникация, която не изисква LoS (Line of Sight). Вместо това комуникацията се провежда въз основа на отражения на светлината от заобикалящите обекти. За да се подобри обхватът при дифузната комуникация, се използват светодиодни излъчватели с голям ъгъл на излъчване на предавателя и широко зрително поле на приемника.

Поради ограничения в излъчваната мощност обхватът на обмен на данни при дифузните комуникационни системи е силно ограничен.

Оптичната комуникация базирана на лазерни диоди позволява съществено разширяване на комуникационната дистанция (до 20–30 km).

В сравнение с радиочестотната комуникация, оптичните комуникационни технологии не страдат от електромагнитни смущения. Поради тази причина оперативната съвместимост със съществуващите безжични системи не е проблемна. Друго предимство е възможността за безпроблемна комуникация между близко разположени приемно-предавателни двойки. Този факт значително намалява сложността, изисквана от MAC протоколите.

Въпреки устойчивостта към електромагнитни смущения сериозен проблем при оптичната комуникация са външните източници на светлина – естествени и изкуствени, както и запрашеността на въздуха. Това силно ограничава приложимостта на оптичната комуникационна технология като предавателна среда за WSN, разположени в открити или закрити пространства.

### Акустична комуникация

Конкретните характеристики на средата за разполагане на сензорни мрежи също диктуват характера на безжичната комуникация за внедряване в сферата на безжичните сензорни мрежи.

Като пример за влияние на средата за комуникация са подводните безжични сензорни мрежи UWSN (Underwater Wireless Sensor Networks), където преносната среда е вода [20]. Тъй като комуникационните диапазони на RF и оптичните комуникационни техники са силно ограничени във водна среда, акустичната комуникация е успешна алтернатива за изграждане на подводни безжични сензорни мрежи.

Акустичните вълни могат да се разпространяват във вода на много големи разстояния. Подводната акустична комуникация изисква мощни акустични излъчватели и чувствителни микрофони за установяване на безжична връзка във вода на голяма дистанция.

При акустичната комуникация съществено влияние оказват страничният шум, отражението на сигнала, температурата и съставът на водата.

Скоростта на обмен на данни при акустична комуникация варира в зависимост от целевия диапазон на комуникация. Повечето акустични комуникации са ограничени до няколко десетки Kbps (килобита в секунда). Допълнителна специфика при акустичната комуникация е триизмерният характер на подводната топология на сензорните мрежи. Поради тази причина акустичните канали за обмен на данни се класифицират като вертикални и хоризонтални, според посоката на звуковия лъч по отношение на океанското дъно.

### **Комуникация чрез магнитна индукция**

Нуждата от изграждане на подземни безжични сензорни мрежи WUSNs (Wireless Underground Sensor Networks) доведе до развитието на комуникационни технологии за предаване на данни базирани на електромагнитна индукция MI (Magnetic Induction) [21].

Традиционните техники за разпространение на сигнали с помощта на радиовълни срещат три основни проблема в почвената среда:

- радиовълните имат високи нива на затихване поради погълщане от почва, скали и вода под земята;
- дистанцията на предаване силно зависи от специфични свойства на почвата, като съдържание на вода, метална руда, глина, пясък и др. и може да се промени драстично с времето и пространството;
- RF базираните технологии за ефективно предаване и приемане на данни изискват антени с относително голям размер, което е трудно осъществимо.

Магнитната индукция (MI) е алтернативен подход за подземна безжична връзка. Спецификите на земния грунт като почва, скали и вода причиняват сравнително малка промяна в степента на затихване на магнитните полета от тази на въздуха, тъй като магнитните проницаемости на материалите са подобни.

Този вид комуникация гарантира относително стабилни параметри на комуникационния канал и оптимални размери на антените за приемане и предаване.

### **Страницни ефекти в процеса на безжична комуникация**

Съществуващите технологии и алгоритми за модулация на цифров сигнал преобразуват поток от битове в електро-

магнитни ЕМ (Electro Magnetic) вълни със специфични характеристики. Тези ЕМ вълни се излъчват в пространството и се получават в приемна антена. По време на процеса на предаване и приемане на сигнала ЕМ вълни се изкривяват поради външни фактори основно поради затихване, отражение, пречупване, дифракция и разсейване и е възможно да не се демодулират (декодират) правилно в приемащия модул.

**Отражение и пречупване** – когато излъчваният радиосигнал срещу среда с различна плътност, на границата между тези две физически различни среди (въздух/вода, вакум/въздух, въздух/земя) определена част от вълната отскоча от повърхността и променя посоката си, което се нарича отражение. В зависимост от свойствата на двете среди, определена част от вълната може се разпространи през границата като също променя посоката си и този процес се нарича пречупване. Ефектите отражение и пречупване на радиовълни обикновено са наблюдавани в йоносферата на земята, върху земни повърхности и стени и покриви на сгради.

**Разсейване** – при среща на радиосигнала по време на разпространението му с неравна повърхност се наблюдават множество процеси на хаотично отражение и пречупване в различни посоки, намаляващи съществено силата на основния радиосигнал. Този процес се нарича разсейване.

**Дифракция** – радиосигналът може също да се разпространява през остри ръбове, като връх на планина или сграда. В този случай острият ръб действа като вторичен източник на радиосигнал за сметка на силата на основния радиосигнал.

**Затихване** – докато електромагнитната (ЕМ) вълна, носеща информация, се разпространява през определена среда, с увеличаване на разстоянието силата на сигнала отслабва. Този процес се нарича затихване. Степента на затихване е

право пропорционална на изминатото разстояние и плътността на средата, в която се разпространява сигналът.

Отслабването на силата на ЕМ вълна определя и обхвата на комуникация. Ако силата на излъчваната с определена мощност модулирана ЕМ вълна (радиосигнал) намалее под определен праг, радиоприемникът не може правилно да декодира радиосигнала. Този праг се нарича чувствителност на приемника и може да варира в зависимост от коефициента на усилване на използваната приемна антена.

Разстоянието, при което силата на сигнала пада под чувствителността на комплекса антена и приемник, може да се счита за максимален обхват на комуникация на даден сензорен модул.

Затихването обикновено се моделира въз основа на емпирични формули, които показват как силата на радиосигнал с мощност  $P$  и честота  $F$  намалява като функция на разстоянието  $L$  между предавателя и приемника.

За изчисляване на загубата на мощност  $P_{loss}$  в процеса на затихване на радиосигнал честота  $F$  на дистанция  $L$  във въздух се използва формулата:

$$P_{loss} = 32.4 + 20 \times \log F + 20 \times \log L \quad (1),$$

където

$P_{loss}$  е загубата на мощност;

$F$  е честотата на радиосигнала;

$L$  е дистанцията между предаващата и приемаща антени на сензорните модули.

От това уравнение се вижда, че с увеличаване на разстоянието, необходимото ниво на излъчване на мощност трябва да се повиши съществено за успешна комуникация.

**NLOS (Non Line of Sight) ефект** – формула 1 за изчисляване на загубата на мощност при затихване на сигнала във функция от разстоянието отразява не само картината на особеностите при разпространение на сигнал.

Факторите на отражение и разсейване също влияят върху качеството на комуникация в безжичния канал. Поради сравнително късите разстояния, използвани за безжична сензорна комуникация, дифракцията не е основен фактор при радиоизлъчване с ниска мощност и на малки дистанции.

Ефектите на отражение и разсейване от повърхности водят до получаване на множество копия на сигнала в приемника. Това е свързано главно с многопосочното разпространение на радиовълни от предавателя.

В процеса на приемане на радиосигнал при липса на линия на пряка видимост (LoS), по пътя си между сензорен предавател и приемник, радиосигналите могат да се отразяват и разпръскват от повърхности в съседство и на принципа на многократното отразяване да достигат антената на приемника въпреки липсата на пряка видимост между антените им.

Тези NLoS (Non Line of Sight) радиосигнали, също допринасят за успеха на комуникацията. Този ефект се нарича NLOS ефект поради множеството радиосигнали, които се приемат в антената на приемаща сензорен модул от различни посоки извън зоната на пряка видимост между предаваща и излъчваща антена [22].

Ефектът на NLOS комуникацията зависи както от околните радиочестотни ленти, така и от честотата на носещия радиосигнал. Тези ефекти варират с времето поради промени в околната среда и не могат да бъдат точно моделирани чрез формулата на затихване в зависимост от разстоянието и честотата поради наличието на случайни величини. NLOS ефек-

тът на разпространение въвежда елемент на случайност и може да се представи с няколко вероятностни функции на разпределение в зависимост от типа радиокомуникация, честотата и географско разположение.

Поради тази причина комуникацията зависи не само от разстоянието между предавателя и приемника, но и от случаини величини, подобряващи или влошаващи качеството на прием на радиосигнали.

### **Модел на грешките в канала на радиопредаване**

Разработеният досега модел на канала при комуникация точка-точка улавя ефектите от разпространението на сигнала от един предавател до определен приемник при условия, близки до идеалните. Успехът на безжичната комуникация зависи не само от силата на получния сигнал от един предавател, но също така и от ефекта на генерираните радиосмущения в канала от други потребители.

Радиосмущенията се разделят основно в две групи – интерференция и радиошум.

**Интерференция** – влиянието на близки по честота източници на радиосигнал в основния комуникационен радиоканал за обмен на данни

Интерференцията според източника си се разделя в следните основни категории:

- електромагнитна интерференция EMI (Electromagnetic Interference), породена от източници на електромагнитни излъчвания;

- интерференция от съседен радиоканал ACI (Adjacent-Channel Interference);

- интерференция по носещ канал ICI (Inter Carrier Interference), базирана на доплер ефекта при OFDM модулирани канали;

– вътрешноканална интерференция CCI (Co-Channel Interference), т.нар. crosstalk, когато два предавателя излъчват едновременно в един радиоканал и др.

Интерференцията влошава условията за правилно декодиране на получените в приемника на сензорния модул данни.

**Радиошум** – съвкупността от нежелани хаотични радиочестотни сигнали с голям процент хармоники, породени от електрически източници с високо напрежение, мощни електродвигатели или индуктивности, работещи в близост до радиоприемника, радиосмущения породени от атмосферни влияния като гръмотевични бури, слънчеви изригвания, промени в йоносферния слой на атмосферата и др.

Под радиошум се разбира и вътрешни за електронния модул източници на радиосигнали породени от недобре филтрирани захранващи блокове, от р-п преходи на мощни биполярни транзистори, термоустабилизиирани кварцови резонатори и интегрални схеми.

Радишумът е вид интерференция, но не всяка интерференция е радиошум.

Успехът на безжичната комуникация зависи от демодулирането на получената сигнална форма на сигнала според схемата за модулация. В допълнение към конкретната схема за модулация успехът на този процес зависи от силата на получения сигнал в сравнение с изкривяването, причинено от радиошум и интерференция.

Поради тази причина при безжичната радиокомуникация се дефинира терминът „съотношение сигнал към шум и смущения“ SNIR (Signal to Noise plus Interference Ratio), с който се измерва качеството на връзката на безжичния радиоканал [23].

SNIR се дефинира като отношение на мощността на полезнния радиосигнал към сумата от мощността на интерфе-

ренцията и мощността на някакъв фонов радиошум.

$$SNIR = \frac{\text{Мощност на радиосигнала}}{\text{Мощност на радиошуума} + \text{интерференция от съседни или огледални канали}}$$

Съотношението сигнал към шум и смущения (SNIR) се измерва в dB, както следва:

$$SNIR_{dB} = 10 \log_{10} P_{received} P_{noise} + I_i k \quad (2),$$

където

$P_{received}$  е мощността на приетия сигнал;

$P_{noise}$  – мощността на шума в канала;

$I_i$  е интерференцията от възел  $i$ ;

$k$  е броят на съседните безжични сензорни модули, допринасящи за нивото на интерференция.

Колкото по-висок е SNIR, толкова по-добра е безжичната връзка и качеството на канала. При WSN опитите за комуникация на множество възли се контролират чрез MAC-слойните решения. Като цяло тези протоколи на MAC (Medium Access Control) ограничават едновременната комуникация ефекти, така че намесата от различни възли да бъде сведена до минимум. Следователно влиянието на  $I_i$  във формулата може да се пренебрегва за WSN.

## 5.2. Протоколи за каналния (MAC) слой

Слойт за контрол на достъпа до средата MAC (Medium Access Control) е вторият от седемте слоя в OSI модела, отговорен за управлението на достъпа до споделената комуникационна среда, която може да бъде кабелен или безжичен ка-

нал [24]. Неговата основна цел е да арбитрира между множество устройства, които се опитват да предават данни едновременно, като гарантира ефективна комуникация без сблъсъци.

### **5.2.1. Основни функции**

**Инкапсулиране на рамка** – в каналния слой се капсулират данните, получени от по-горните слоеве в рамки, добавяйки необходимата адресна и контролна информация.

**Адресиране** – в този слой се присвояват уникални адреси (например MAC адреси в Ethernet) на всяко устройство в мрежата, което позволява правилна доставка на кадри.

**Контрол на достъпа до средата** – тази функция регулира начина, по който устройства се борят за достъп до комуникационната среда, като гарантира организирано предаване без сблъсъци.

**Откриване на грешки** – MAC слоят често включва механизми за откриване и коригиране на грешки, повишавайки надеждността на предаването на данни.

Различните мрежови технологии използват специфични протоколи на MAC слой за контрол на достъпа до средата.

### **5.2.2. Базови комуникационни протоколи на каналния слой**

#### **Ethernet MAC (802.3)**

Ethernet, една от най-широко използваните LAN технологии [25], използва различни MAC протоколи, включително CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) за кабелни връзки и CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) с процедура за избягване на сблъсък при безжични връзки.

## IEEE 802.11 MAC

За безжични LAN стандартът IEEE 802.11 [26] разчита на комуникационния протокол DCF (Distributed Coordinated Function) като свой MAC протокол по подразбиране. DCF използва базиран на конкуренция подход, при който устройствата чакат неактивен канал, преди да изпратят пакет.

### MAC Token Ring:

Мрежите Token Ring прилагат MAC протокол за предаване на токени [25]. Устройствата трябва да придобият токен за предаване на данни, осигурявайки комуникация без сблъсъци.

### Carrier Sense Multiple Access (CSMA)

CSMA е клас от MAC протоколи, използвани в различни мрежови технологии. Устройствата слушат носителя и предават, когато каналът е чист (CSMA/CD) или когато каналът е разпознат като зает, с кратък период на забавяне (CSMA/CA) [27].

Ролята на MAC слоя при безжичните мрежи е различна в сравнение с конвенционалните кабелно свързани мрежи.

В кабелните мрежи MAC слоят често се фокусира върху откриване на сблъсък (напр. Ethernet с CSMA/CD), като същевременно гарантира, че множество устройства могат ефективно да споделят една и съща физическа среда. В режим на комуникация пълен дуплекс Ethernet откриването на сблъсък вече не е от значение, но MAC слоят все още играе роля в кадрирането и адресирането.

В безжичните мрежи MAC слоят (например IEEE 802.11 MAC) адресира проблеми като конкуренция и проблеми със скрити възли. Той управлява как устройствата оствъществяват достъп до споделената безжична среда и се справя със смушенията, разпространението на сигнала и избягването на конфликти.

### **5.2.3. Основни протоколи и стандарти на каналния слой при WSN**

#### **IEEE 802.11 MAC (Wi-Fi)**

Стандартът IEEE 802.11, известен като Wi-Fi, използва няколко MAC протокола за управление на достъпа в безжични LAN мрежи [28], [29]:

- **DCF (Distributed Coordination Function).** Този базиран на конкуренцията MAC протокол е приет по подразбиране за Wi-Fi мрежи. Той използва CSMA/CA за контрол на достъпа до средата;
- **PCF(Point coordination function).** Това е допълнителен MAC протокол, който позволява на централния координатор AP (Access Point) да управлява достъпа до свързани устройства.

#### **Token Ring**

Мрежите Token Ring също използват MAC протокол за предаване на токени. Устройствата в мрежата трябва да придобият токен, за да могат да предадат пакет с данни. Токенът циркулира в мрежата, като дава разрешение на устройството, което го държи.

#### **Токен шина (IEEE 802.4)**

Мрежите тип токен шина (Token Bus) използват MAC протокол за предаване на токени, подобен на Token Ring. Устройствата в мрежата трябва да притежават токена за предаване на данни.

#### **Bluetooth**

Bluetooth използва множествен достъп с разделение по време (TDMA) като свой MAC протокол. Устройствата в Bluetooth мрежа предават данни през предварително зададени времеви интервали.

### **Zigbee (IEEE 802.15.4)**

Zigbee е стандарт за безжична комуникация, предназначен за приложения с ниска мощност и ниска скорост на предаване на данни [30]. Той използва CSMA/CA и множествен достъп с разделяне по време TDMA (Time-Division Multiple Access) за контрол на достъпа до средата.

### **CAN (Controller Area Network)**

CAN протоколът обикновено се използва в автомобилни и индустриални приложения. Той използва MAC протокол за побитов арбитраж, при който устройствата се борят да предават данни въз основа на техния приоритет на съобщението [31].

### **FDDI (Fiber Distributed Data Interface)**

FDDI е базиран на високоскоростна LAN технология с двоен пръстен. Той използва MAC протокол за предаване на токени, подобен на Token Ring, но работи през оптични кабели [32].

WSN често използват MAC протоколи, предназначени за устройства с ниска мощност и ограничени ресурси като:

- TDMA-базирани протоколи за времева синхронизация;
- базирани на конкуренция протоколи с ниски работни цикли за пестене на енергия;
- протоколи, управлявани от събития, които предават данни само когато възникнат конкретни събития.

## **5.3. Протоколи на мрежовия слой**

Мрежовият слой служи като междинен слой между слоя за връзка с данни (слой 2) и транспортния слой (слой 4).

### **5.3.1. Основни функции**

**Логическо адресиране** – мрежовият слой присвоява логически адреси, като например IP адреси, на устройства в

мрежа. Тези адреси са от съществено значение за маршрутизирането на пакети с данни до техните предназначения.

**Маршрутизиране** – мрежовият слой отговаря за определянето на оптималния път за преминаване на пакетите с данни от източника до дестинацията. Той използва алгоритми за маршрутизиране и таблици, за да вземе тези решения.

**Ретранслиране** – след като маршрутът е определен, мрежовият слой ретранслира пакети с данни между мрежите, като ги капсулира с необходимите заглавки и информация за адресиране.

**Обработка на грешки** – мрежовият слой може да открива и управлява грешки, включително загуба на пакети и претоварване. Може да използва протоколи като ICMP (Internet Control Message Protocol), за да информира подателя за грешка.

### **5.3.2. Изисквания към протоколите на мрежовия слой**

#### **Потребление на енергия**

При безжичните сензорни мрежи (WSN) данните, събрани от различните сензорни модули, се препращат колективно към специалния възел, наречен приемен възел (gateway) или концентратор. Изграждането на концентратори на данни играе важна роля за намаляване на латентността и консумацията на енергия от сензорните модули в WSN.

Основната цел на протоколите за маршрутизиране е ефективно предоставяне на информация между сензорите и концентратора. За тази цел консумацията на енергия е основната грижа при разработването на всеки протокол за маршрутизиране за WSN. Поради ограниченияте енергийни ресурси на сензорните възли данните трябва да бъдат доставени по енергийно ефективен начин, без да се нарушава точността на информационното съдържание. Следователно много конвенционални по-

казатели за маршрутизиране, като алгоритъмът за най-кратък път, невинаги са подходящи. Поради това причините за потреблението на енергия трябва да бъдат внимателно проучени и разработени нови енергийно ефективни маршрути.

Основните причини за консумацията на енергия при маршрутизация в WSN са класифицирани както следва:

#### **Откриване на съседен възел**

Много протоколи за маршрутизиране изискват всеки възел да обменя информация между своите съседи. Информацията, която се обменя, варира в зависимост от маршрута и често е придружена от системна информация (локален timing, стойност на индикатора на батерията и др.).

Въпреки че повечето протоколи за географско маршрутизиране изискват познаване на местоположението на съседните възли, маршрутизиращ протокол, ориентиран към ефективно предаване на сензорни данни, може да изиска и допълнителен анализ на измерените от всеки сензор данни. Във всеки случай възлите консумират енергия при обмен на такава информация, което увеличава енергийните разходи съпътстващи функционирането на протокола.

За да се подобри енергийната ефективност на протоколите за маршрутизиране, трябва да се минимизира локалният обмен на данни, без да има нужда от преизчисляване на маршрута.

#### **Отдалечена срещу локална обработка на данни**

В много случаи локалната обработка на сензорни данни изиска по-малко енергия от предаването на тези данни до концентратора на мрежата и последващата им обработка.

Основната цел при WSN, е предаване на полезна информация, нуждаеща се от минимална допълнителна обработка. В практиката масово се използват техники за локална обработка и интегриране на сензорни данни с цел намаляване на

мрежовия трафик, а оттам и постигане на по-ниска консумация на енергия.

### **Машабируемост**

WSN обикновено се състоят от голям брой възли. Необходимостта да се наблюдават физическите явления – обект на измерване от сензорните възли, може също да изиска увеличаване на физическата плътност на разполагане на сензорните модули в определени райони.

Големият брой сензори позволява по-добра оптимизация на маршрута при преноса на сензорни данни и увеличава надеждността на сензорната мрежа като цяло. Разработката на адаптивни маршрутизиращи протоколи с разпределено действие, работещи еднакво добре в сензорни мрежи със стотици и/или десетки хиляди сензори, съществено подобрява машабируемостта, което е критично при ad-hoc мрежите.

### **Адресиране**

Големият брой сензорни възли в една мрежа прави неефективно присвояването на уникален адрес на всеки възел. В някои случаи механизмите за локално адресиране все още могат да се използват за улесняване на комуникацията между съседни възли или при малки сензорни мрежи с клъстерна архитектура. В същото време стандартните мрежови протоколи за маршрутизация, базирани на локално адресиране не са ефективни поради големия разход на енергия и необходимостта от непрекъснат обмен на системна информация.

В общия случай крайните потребители на сензорни данни се интересуват от локално обработени и интегрирани сензорни данни, а не от измерените необработени данни от отделен сензор.

### **Надеждност**

При безжичните сензорни мрежи сензорните модули се използват и като комуникационни възли за ретранслиране на данни от други сензорни модули. Повредата на сензорен модул оказва влияние не само на ниво сензорни данни, но от комуникационна гледна точка може да причини срив в мрежата и/или да прекъсне връзката с отделни сегменти на мрежата.

Важно изискване към протоколите за маршрутизиране при сензорните мрежи е да осигуряват стабилност на обмена на данни при отпадане на един или няколко сензорни възли и адаптивно реконфигуриране на мрежата.

### **Топология**

Процесът на конфигуриране при WSN може да бъде предварително реализиран или стартиран на база определена стратегия (например ad-hock). В случай на предварително конфигурирана топология могат да се използват по-ефективни протоколи за маршрутизиране. При голям брой съвременни безжични сензорни мрежи процесът на конфигурация протича динамично. Отделните сензорни възли обикновено не са запознати с първоначалната топология на мрежата. Поради тази причина в протоколите за маршрутизиране, специфични за сензорните мрежи, се имплементират алгоритми за откриване на съседни възли и на база тази информация се конфигурира маршрутът на данните. В този случай мрежовата топология се променя динамично през целия живот на мрежата.

Тъй като енергийната ефективност при сензорните възли с автономно захранване е от решаващо значение, периодично възлите могат да изключват комуникационния си модул, което на практика води до временно изключване на този възел от топологията на мрежата.

Всеки път, когато възелът иска да предаде данни, той се активира и присъединява към мрежата. Тези промени между активни и пасивни състояния на възлите динамично засягат конфигурацията на сензорната мрежа. Именно поради тази причина в мрежовите протоколи се имплементират алгоритми и методи за динамична адаптация на топологията на мрежата и маршрута на данните.

### 5.3.3. Ключови протоколи на мрежовия слой при WSN

В тази част на глава 5 са описани някои от най-разпространените протоколи на мрежовия слой, проектирани да отговорят на специфичните изисквания и предизвикателства на WSN.

#### Протокол LEACH

#### (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

LEACH е кълстър-базиран протокол за маршрутизиране, който намалява консумацията на енергия чрез редуване на ролята на главите на кълстъра (CH) между сензорните възли [33]. Главите на кълстърите събират и обобщават данни от членовете на кълстъра, преди да ги предадат към базовата станция.

#### Протокол Насочена дифузия (Directed Diffusion)

Това е ориентиран към данни протокол, който разчита на градиенти за разпространение на данни от изходните възли към базовата станция [34]. Той набляга на агрегирането на данни и обработката в мрежата.

#### Протокол AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector)

AODV е протокол за маршрутизиране при поискване, който установява маршрути само когато е необходимо [35]. Той намалява разходите за маршрутизиране и се адаптира добре към динамичните мрежови условия.

### **Протокол TEEN (Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol)**

TEEN е проектиран да предоставя отчитане на данни, управявани от събития [36]. Той използва подход, базиран на прагове, за изпращане на данни само когато възникнат значими събития, намалявайки потреблението на енергия.

### **SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)**

SPIN е семейство от ориентирани към данни протоколи, които минимизират комуникационните разходи чрез договаряне на трансфери на данни между възли само когато е необходимо [37]. Той е особено ефективен за приложения, ориентирани към данни.

## **5.4. Протоколи за транспортния слой (Transport Link Layer)**

Успехът и ефективността на WSN директно зависят от надеждната комуникация между сензорния възел и концентратора на данни.

При сензорна мрежа, състояща се от голям брой безжични сензорни модули, е от съществено значение е изборът на подходящи протоколи за транспортния слой, съчетаващи техники за контрол на грешките, мултиплексиране и демултиплексиране, буфериране на пакетите и др.

### **5.4.1. Основни функции**

**Контрол на задръстванията** – загубите на пакети поради комуникационни задръстванията и/или препълване на буфери могат да влошат надеждността на концентратора на данни и на мрежата като цяло. Ефективният контрол на задръстванията не само увеличава ефективността на мрежата, но

също така помага за запазване на ограничените енергийни ресурси на сензорните модули.

**Надежден транспорт** – въз основа на изискванията на приложния слой данните и командите, свързани с функционалната част, касаеща управлението на сензорните възли, трябва да бъде надеждно доставени до всеки сензорен модул. По подобен начин системните команди и данни за препограмиране и промяна на режима на работа на сензора трябва да бъдат надеждно доставени до всеки сензорен модул, за да се гарантира правилното функциониране на WSN като цяло.

**Мултиплексиране/демултиплексиране** – различни приложения могат да работят в паралелен режим и да се обслужват от компонентите на една сензорна мрежа в т. нар. режим времеделене. Транспортният слой трябва да може да свързва и обслужва приложенията от приложния слой чрез използване техниките мултиплексиране и демултиплексиране.

### **Съществуващи решения**

Съществуват няколко решения за транспортен слой на безжична сензорна мрежа, базирани на технологии за конвенционални безжични мрежи.

Повечето от съществуващите решения се фокусират върху надежден транспорт на данни, базирани на TCP (Transmission Control Protocol).

Вродената корелация в потоците от данни, генериирани от сензорните възли прави тези механизми за надеждност от вида на т. нар. от край до край (end-to-end) значително енергийно неефективни. Освен това, всички тези протоколи поставят значителни изисквания към размера на буфера на предаваните пакети. В същото време като правило сензорните възли имат ограничено буферно пространство и ограничени възможности за обработка.

#### **5.4.2. Предизвикателства за транспортния слой**

Ограниченията за енергия, обработка и хардуер на безжичните сензорни възли носят допълнителни предизвикателства за проектиране на протокола на транспортния слой. В това отношение основните цели и предизвикателства на транспортен слой са следните:

##### **Решения end-to-end**

Конвенционалните решения за транспортен слой базирани на TCP имплементират т.нар. AIMD (Additive-Increase/Multiplicative-Decrease), представляващ процедура за коригиране на грешки и механизми за контрол на задръстванията. Тези механизми предоставят решения за надеждност и контрол на трафика от вида на т.нар от край до край (end-to-end) и от точка до точка (point-to-point).

По-конкретно, предотвратяването на загубите на пакети и намаляването на задръстванията се извършват чрез комуникация между източник и дестинация без участието на междинните страни. По същество механизмите за контрол на транспорта се намират само в източника и местоназначението. Тези механизми за управление от тип end-to-end, които в общия случай се използват за конвенционални протоколи на транспортен слой, обикновено водят до разхищаване на ресурси в WSN, където колективната информация от група сензори е много по-важна от индивидуалната информация от всеки възел на сензора.

Техниките точка-точка на конвенционален транспортен слой могат да доведат до загуба на енергийни ресурси при безжичните сензори. Вместо това се използват локални решения за надеждност и контрол на трафика с цел подобряване на енергийната ефективност на протоколите на транспортния слой.

## Работа в зависимост от приложението

Друга разлика в работата на WSN е, че те се конфигурират на база специфично сензорно приложение. Например сензорните възли могат да се използват в определен сценарий за внедряване за изпълнение непрекъснато засичане на специфично явление, като мониторинг на температурата. От друга страна, друго приложение може да изиска множество сензори за откриване на събитие и идентификация. Аналогично, друго приложение може да изпраща заявки за определяне на местоположението и локален контрол при широк спектър от области на приложение. Поради тази причина различните приложения имат различни изисквания към надеждността. Например за приложение за мониторинг надеждността е приоритетна и е важен показател. В същото време приложението за откриване на събития е от решаващо значение непрекъснатата актуализация на данните.

На практика при WSN фокусът на техническите решения в транспортния слой зависи от спецификата на приложението.

Приоритетът на тези решения може да варира в зависимост и от областта на приложение на сензорната мрежа.

## Потребление на енергия

Енергийната ефективност е един от ключовите моменти при проектирането на WSN и съществено влияе на дизайна на имплементацията на транспортния слой. Функционалностите на транспортния слой трябва да са енергийно адаптирани за нуждите на WSN, т.е. контролът на грешките и трафика трябва да бъде постигнат с възможно минимални енергийни разходи.

Например ако се установява, че нивата на надеждност в концентратора на данни надвишават необходимите за откриване на събития, може да се спести енергия чрез намаляване на количеството изпратена информация или временно из-

ключване на системите, контролиращи тези процеси.

Аналогично, мерки за повишаване на надеждността, които успешно се използват при конвенционален тип телекомуникации, обикновено изискват значително потребление на енергия. Поради тази причина такъв тип решения не са подходящи за WSN.

Протоколът на транспортния слой трябва да бъде проектиран така, че да има оптимално ниво на надеждност при относително ниски нива на потребление на енергия.

При избора на подходящи комбинации от транспортни протоколи при проектиране на безжични сензорни мрежи с различно предназначение трябва да се имат предвид следните основни фактори:

- вид на използваната топология;
- специфика на използваните приложения;
- характеристики на трафика от сензорни данни;
- ограничения на ресурсите – енергия, местоположение и др.

#### **Базови компоненти на транспортните протоколи**

Основните компоненти за обмен на данни при транспортните протоколи могат да се разделят на две основни групи:

- контрол на трафика;
- протоколи за контрол на надеждността (възстановяване на загуби от данни).

В зависимост от конкретното приложение на сензорната мрежа тези два основни компонента се използват в различни комбинации.

##### **5.4.3. Протоколи за контрол на трафика**

Основните и най-разпространени типове транспортни протоколи за контрол на трафика са следните:

- Congestion Detection and Avoidance (CODA);
- Sensor Transmission Control Protocol (STCP);
- Adaptive Rate Control (ARC).

В същото време в комбинация с тях се използват следните популярни транспортни протоколи за контрол на надеждността:

- Reliable Multi-Segment Transport (RMST);
- Pump Slowly Fetch Quickly (PSFQ);
- Event-to-Sink Reliable Transport (ESRT).



*Фиг. 16. Класификация на основни протоколи за контрол на трафика*

### Протоколи за контрол на трафика

#### Протокол за откриване и избягване на задръствания CODA (*COngestion Detection and Avoidance*)

Идентификацията на претоварване на канала при WSN е от съществено значение за контрола на мрежата. Целта на CODA е да открие и избегне задръстванията от пакети с данни при работа на WSN [38]. При този протокол се използва комбинация от контрол на нивото на запълване на буфера и информация за натоварването на канала. Използвайки този

подход, CODA може да идентифицира както локално, така и глобално задръстване (end to end congestion) в една сензорна мрежа. По този начин се осигурява механизъм за контрол на трафика надолу по веригата.

CODA може да увеличи производителността на мрежата чрез избягване на задръстванията. Поради спецификата на топологията и капацитета на една сензорна мрежа, може да съществуват определени постоянни канали с натоварване над средното.

Това изисква механизми за глобално регулиране на скоростта на данни в изходните възли. По принцип в една сензорна мрежа най-често трафик се генерира близо до изходните възли (gateways) поради конкуренцията в безжичния канал.

При трафик на пакети с ниска скорост може да възникне временно задръстване и в сензорни модули, обслужващи или ретранслиращи големи потоци от данни.

За контрол на трафика CODA предоставя три основни механизма:

– **механизъм за откриване на задръствания, базиран на контрол на буфера** – CODA регистрира задръствания, като анализира нивото на запълване на буфера на всеки сензорен модул и натоварването на безжичния му канал;

– **механизъм на отворен цикъл за сигнализиране с обратна връзка** – ако трафикът от данни превиши предварително зададена прагова стойност, сензорният модул възел ще уведоми своя съсед да намали скоростта на предаване, той от своя страна ще намали своята скорост и ще уведоми своите съседни възли и така нататък по веригата;

– **механизъм на затворен цикъл на регулиране на трафика** – при този механизъм, преди да изпрати пакет, сензорният възел прослушва канала на фиксиран интервал от

време и ако установи, че каналът е зает повече от предварително определен брой прослушвания, той добавя т.нар. бит за индикация на задръстване в заглавната част на пакета от данни, за да информира контролния център на мрежата, че има задръстване. Когато контролният център получи пакет с активиран бит за задръстване, той изпраща обратно контролно съобщение до съответния сензорен модул възел, информирайки го да намали скоростта на изпращане на пакети. Когато задръстването се премахне, се изпраща второ контролно съобщение до съответния възел да увеличи отново скоростта на предаване на данни.

Точното откриване на претоварване е важно, тъй като механизмите за контрол на претоварването обикновено налагат допълнителни изисквания за обработка и комуникация на сензорните възли.

Ясно е, че задръстванията възникват поради увеличаване на заетостта на буфера на възел и произтичащите от това падания на пакети. Следователно нивото на заетост на буфера се използва най-вече като показател за откриване на задръствания.

Въпреки това в среда с множество възли, поради грешки в предаваните данни и конфликти в безжичния канал, нивото на заетост на буфера невинаги отразява точно претоварването. Възможно е претоварването в определени сензорни модули на мрежата да се увеличи, без да повлияе на нивото на запълване на буфера на възлите в този сегмент на мрежата.

На практика CODA използва комбинация от ниво на заетост на буфера и състояние на натоварване на канала като индикация за претоварване. Освен това, тъй като задръстванията обикновено възникват в приемни възли, е проектиран механизъм за откриване на задръствания, базиран на анализ на нивото на запълване на приемния буфер на сензорния модул.

Базираният на анализ на приемния буфер на сензорния модул механизъм за откриване на претоварване разчита както на заетостта на буфера, така и на натоварването на канала. Натоварването на канала се оценява чрез прослушване на канала всеки път, когато даден възел има пакет за изпращане. CODA взема решение за претоварване, ако натоварването на канала е по-високо от част от максималното използване на канала. В резултат на това се открива задръстване в приемните буфери на сензорните възли.

На практика CODA осигурява само избягване на задръстванията и не осигурява механизми за контрол на надеждността. Следователно, той трябва да бъде съчетан с допълнителни протоколи и механизми за контрол на надеждност. Допълнителен проблем е че, механизмът за регулиране на множество източници със затворен цикъл води до допълнително забавяне на скоростта на обмен на данни в случаите, когато мрежовият трафик е висок.

### Sensor Transmission Control Protocol (STCP)

Протоколът STCP [39] е широко използван upstream транспортен протокол за WSN приложения. STCP осигурява откриване и избягване на задръствания при адаптируема степен на надеждност въз основа на изискванията на приложението.

STCP използва три вида пакети: иницииране на сесия, данни и ACK (*Acknowledgement*).

Пакетът за иницииране на сесия е предназначен да синхронизира всеки сензорен възел с контролера на сензорната мрежа и конфигурира параметрите на предаване (тип поток от данни, скорост на предаване и изисквана надеждност).

STCP пакетите играят важна роля в поддържането на информацията за моментния трафик. STCP използва повечето от неговите функционалности в базовата станция.

Базовата станция използва NACK (*Negative Acknowledgment or not Acknowledged*) за приложения, изискващи непрекъснато поток от сензорни данни, и поддържа синхронизация на таймера на контролера и сензорните възли, с които той комуникира. При сензорни мрежи с имплементирани управлявани от събития приложения, предаващите данни сензорни възли използват ACK, за да се уверят, че приемащият сензорен модул или контролер е получил пакетите. Всеки пакет се съхранява в буфера на предаващия сензорен възел, докато не получи ACK от приемащия възел. Ретранслиращите сензорни възли откриват задръствания въз основа на дълбината на опашката и уведомяват приемащия възел чрез задаване на управляващ бит в заглавието на пакета с данни.

STCP предполага, че всички сензорни възли в рамките на WSN имат коректна синхронизация на таймера с контролера. Отклонения в тайминга могат да генерират проблем с производителността, понеже сензорните възли, чакащи ACK отговор от приемащия възел, ще причиняват латентност в WSN.

### **Адаптивен контрол на скоростта**

Адаптивният контрол на скоростта ARC (Adaptive rate control) е базиран на LIMD (Linear Increase/Multiplicative Decrease) алгоритъм. В ARC, ако ретранслиращ възел изпрати ACK до изпращащия сензорен възел като потвърждение, че предишните пакети са препратени успешно, тогава изпращащия възел увеличава своята скорост на пренос на пакети с фиксирана стъпка и обратно.

ARC не използва механизми за откриване на задръствания или сигнализиране за претоварване. Когато приемащият възел получи пакет с включен контролен бит за претоварване, той счита, че има претоварване, и излъчва контролен сигнал, уведомяващ всички предаващи данни сензорни възли за намаляване на скоростта на обмен на пакети. Сензорният възел,

в който е детектирано претоварване, генерира контролен бит за претоварване CN (Congestion Notification).

Когато CN битът е зададен, съседните възли, получили този сигнал спират временно препращането пакети към този претоварен възел до намаляване на натоварването в канала за данни.

#### **5.4.4. Транспортни протоколи за контрол на надеждността**

##### **Протокол Pump Slowly Fetch Quickly (PSFQ)**

Протоколът PSFQ [40] е предназначен да осигури надеждност при обмена на данни за управление и конфигуриране от приемащия сензорен възел или контролера на мрежата към предаващите сензорни възли. За разлика от други протоколи на транспортния слой, които се фокусират върху предаването на данните от предаващи към приемащи сензорни възли, при този протокол фокусът е върху обратната връзка за гарантирале на коректно изпращане на управляващи пакети между контролера на мрежата и приемащите и предаващи пакети сензорни модули.

При този протокол управляващото съобщение от контролера на мрежата се изпраща към сензорните възли с относително бавно темпо и позволява на всеки междинен сензорен възел, който има загуба на пакети, бързо да възстанови всеки липсващ пакет чрез изпращане на повторна заявка към предаващите възли.

PSFQ използва механизъм за възстановяване на грешки тип hop-by-hop, в който ретранслиращите възли кешират пакети и при нужда стартират механизми за повторно предаване и възстановяване на данните.

Докато загубата на пакети с данни между предаващи сензори и контролера може да се толерира в известна степен по-

ради относително голямата корелация на данни от сензорите, обратният обмен на управляващи и конфигуриращи пакети изисква висока надеждност и гарантирано изпращане и получаване на управляващи сигнали.

При този протокол са предвидени три механизма за поддържане на надеждността: работа на помпата, извлечане операция и отчет за операция.

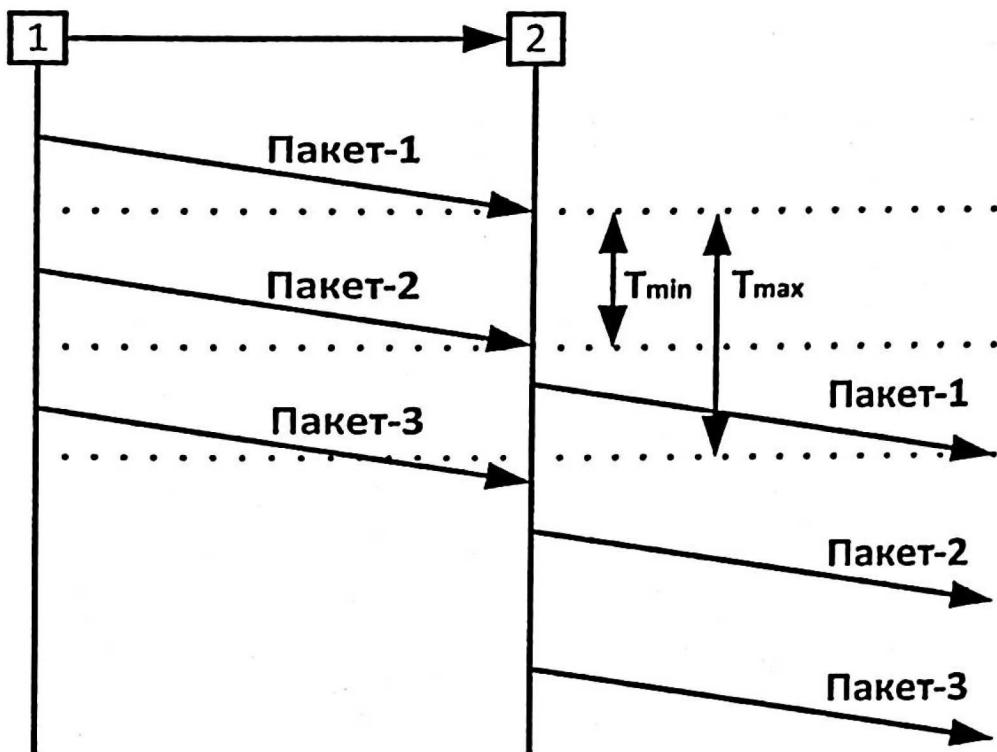
• „Напомпване“ на управляващи пакети в мрежата. Тъй като надеждността обикновено е по-важна от скоростта на обмен, PSFQ използва механизъм за изпращане (инжектиране) на пакети с ниска скорост. В такъв режим на предаване на данни всеки сензорен възел по маршрута до крайния приемащ възел изчаква определен период от време преди да ретранслира управляващия пакет.

• Механизъм за извлечане. В случай на грешки при получаване на пакета, приемащият възел има достатъчно време да стартира процедура по възстановяване чрез изпращане на заявка за повторно изпращане на пакета от предаващия възел.

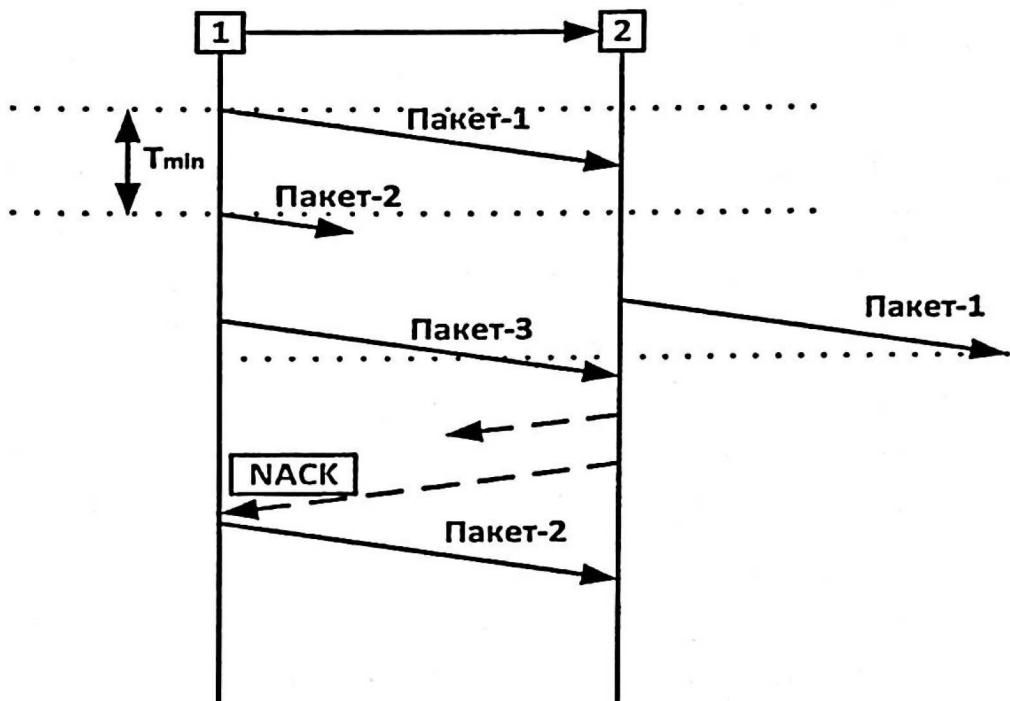
• Механизъм за отчитане на състоянието. PSFQ също предоставя функционалност за отчитане, която създава комуникация в затворен цикъл между сензорите и контролера на мрежата. Чрез тази функционалност контролерът може да получава информация, свързана с работата на мрежата.

Начинът на работа на т.нр. „помпа“ е стратегията по подразбиране в PSFQ за разпространение на информация от управляващия контролер към крайните сензорни модули, освен ако няма грешки.

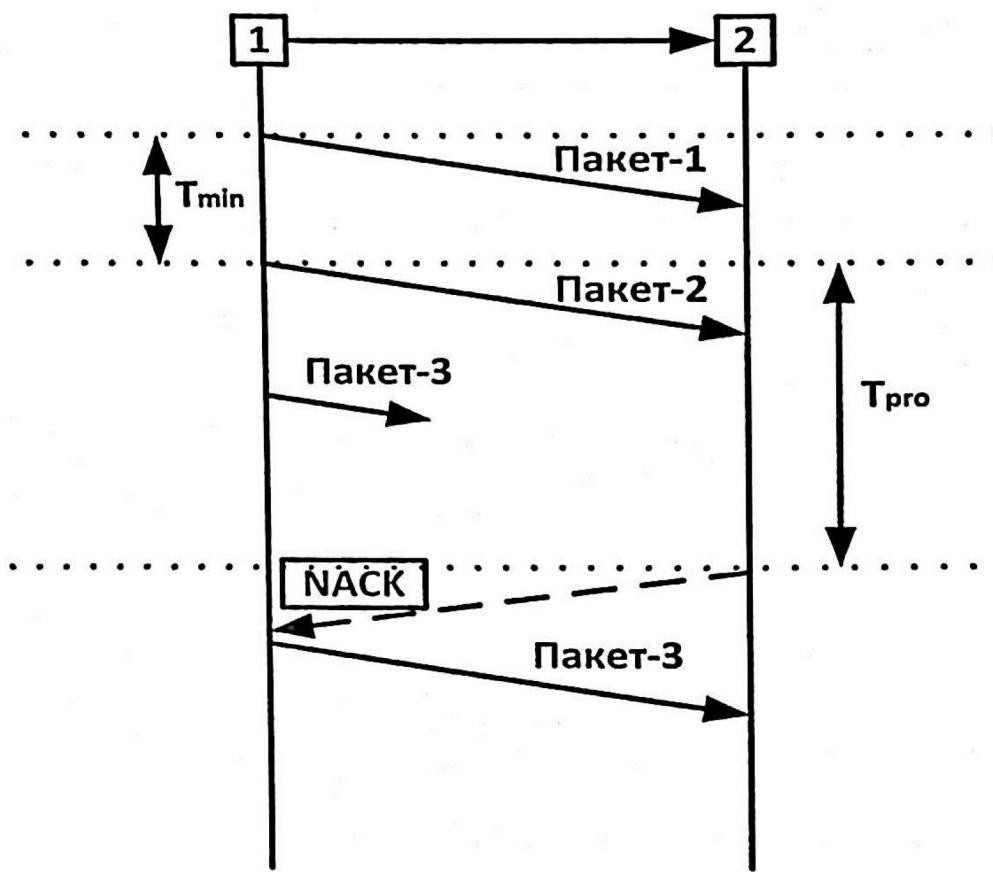
Работата на протокола е илюстрирана на фигури 17, 18 и 19.



Фиг. 17.  $PSFQ$  в режим помпа



Фиг. 18.  $PSFQ$  в режим извличане (*fetch*)



Фиг. 19. PSFQ в комбиниран режим (помпа и извлечане)

По време на режим „напомпване“ контролерът изпраща управляващ пакет, съдържащ контролни скриптове, към своите съседи с ниска скорост на фиксирани интервали от време  $T$ . Механизмът за извлечане се задейства веднага щом се открие пропуск в поредния номер от предаващия към приемащия сензорен възел. В този режим приемащият сензорният възел спира редовното си маршрутизиране на данни и изпраща NACK съобщение към своя съседен сензорен възел, от който е получил пакета за да стартира процедура за възстановяване на пакета.

PSFQ поддържа т.нар. термин агрегиране на загуби, при който операцията за извлечане може да обработва повече от един загубени пакети.

И накрая, по време на операцията за отчет контролерът

на мрежата събира информация от всеки сензор за статуса на доставка на данни.

Един от недостатъците на протокола PSFQ е, че не може да възстанови загубата на всеки единичен пакет поради претоварване, защото използва само NACK. Както при механизма за „напомпване“, така и операцията за извлечане се реализират чрез безжично излъчване на относително голям обем данни, което е неефективно от енергийна гледна точка. Също така ниската скорост в режим на „напомпване“ при PSFQ води до забавяне на работата на мрежата.

PSFQ не позволява доставка на пакети извън реда, по който са изпратени, което може да генерира проблеми при управлението на съдържанието на буферите за данни от ретранслиращите възли. Този протокол обикновено се имплементира в комбинация с протокол за контрол на трафика, тъй като не предоставя ефективен механизъм за контрол на задръстванията.

### **Протокол Reliable Multi-Segment Transport (RMST)**

Протоколът RMST е един от първите протоколи на транспортен слой, разработен за WSNs [41]. Основната задача на RMST е да осигури т.нар. надеждност от край до край (end-to-end reliability).

На практика RMST осигурява две от трите функционалности, необходими за протокол на транспортния слой: надежден транспорт и мултиплексиране/демултиплексиране.

Мултиплексирането и демултиплексирането се извършват при източника на сензорни данни и при концентратора на данни, съответно. В същото време RMST предоставя и механизми за проверка на грешки по маршрутите в мрежата. За тази цел RMST използва механизми за кеширане и осигурява гарантирана доставка на пакетите с данни, генериирани от сензорните възли.

RMST допуска неявното предположение, че пакетите с данни следват един и същ път, освен ако няма повреда на възел и се налага промяна на маршрута.

RMST има два режима на работа – режим без кеширане и режим с кеширане.

- **Режим без кеширане** – този режим на работа е много подобен на конвенционалния транспортен слой протоколи, където само източникът и местоназначението играят роля за осигуряване на надеждност. Следователно загубите на пакета се откриват в концентратора на данни и се изискват от възела, предаващ тези данни, като NACK пакетът преминава през целия маршрут. Предимството на този режим е, че той не изиска допълнителен контрол, междинна обработка и съхранение на предаваните данни по време на маршрутизацията и следователно е по-малко енергоемък.

- **Режим на кеширане** – в този режим междинните приемо-предаващи възли по маршрута кешират предаваните пакети за намаляване на енергийните разходи при препредавания обратно до източника на данни.

В RMST всеки пакет от потока с данни се маркира с уникален пореден идентификационен номер. Съответно механизът за откриване на грешки се задейства веднага при пропуски в поредицата от идентификационни номера на пакети. В случай на грешки в процеса на предаване на сензорни данни възлите изискват повторно предаване, като изпращат NACK пакет по обратния маршрут от концентратора на данни към сензорния възел-източник на данни аналогично, както в режима без кеширане. В същото време в кеширация режим RMST създава надеждни маршрутни сегменти между два последователни кеширащи възела и препредаванията се извършват вътре в тези сегменти. В резултат на това разходите, свързани с препреда-

ването от край до край, са сведени до минимум.

Това е полезно за приложения, където специфичната информация, характеризираща всеки отделен сензорен възел, е важна, особено в сензорни системи за управление и контрол на технологични процеси, системи за сигурност и др.

В същото време RMST може да доведе до допълнително потребление на енергия, тъй като кеширането изисква допълнителни процесорни ресурси за обработка на данните и допълнителна памет в кеширащите възли.

На практика работата на RMST в режим кеширане третира всеки поток от сензорни данни индивидуално, което може да доведе до претоварване на ресурсите в WSN.

Основният фокус на работата на RMST е върху надеждното предаване на данни и в практиката той се имплементира в комбинация с други протоколи за маршрутизация и контрол на трафика.

### **Протокол за надежден транспорт (ESRT)**

Протоколът ESRT (Event-to-Sink Reliable Transport) е специализиран комуникационен протокол, предназначен за безжични сензорни мрежи [42]. ESRT наблюга на енергийно-ефективното предаване на данни, надеждно отчитане на събития и мащабируема комуникация.

Протоколът ESRT включва няколко ключови функции за оптимизиране на предаването на данни в WSN:

- **Операция, управлявана от събития** – ESRT се фокусира върху комуникация, управлявана от събития, където сензорните възли предават данни само когато възникнат значими събития. Това минимизира ненужното предаване на данни и спестява енергия;

- **Надеждно отчитане на събития** – ESRT гарантира надеждно отчитане на събития чрез използване на агрегиране

на данни, обработка в мрежата и техники за смекчаване на загубата на данни и излишъка;

- **Адаптивно предаване на данни** – протоколът адаптира своята скорост на предаване на данни, мощност на предаване и решения за маршрутизиране въз основа на текущите условия на мрежата, като оптимизира консумацията на енергия и надеждността на мрежата;
- **Енергийно ефективно събиране на данни** – ESRT използва механизми като цикъл на работа, агрегиране на данни в мрежата и йерархично маршрутизиране, за да намали консумацията на енергия;
- **Машабируемост** – ESRT е проектиран да бъде машабируем, като включва WSN с различен брой възли и изисквания за докладване на събития.

Протоколът ESRT следва многоетапен процес за предаване на данни:

- **Откриване на събитие** – когато сензорен възел открие събитие (например промяна на температурата, движение или звук), той задейства процеса на предаване;
- **Агрегиране на данни** – данните от множество възли се агрегират, обобщават и обработват в мрежата, намалявайки количеството данни, предавани към приемника;
- **Препращане на събития** – обработените данни се препращат към приемния възел, който отговаря за събирането и агрегирането на данни от цялата мрежа;
- **Механизми за обратна връзка** – ESRT използва механизми за обратна връзка, за да осигури надеждно предаване на данни. Ако данните са загубени или не са получени при приемника, се инициират повторни предавания или адаптивни настройки.

Предимства на протокол ESRT:

- **Енергийна ефективност** – работата на ESRT, управлявана от събития, и механизмите, съобразени с енергията, значително намаляват потреблението на енергия, удължавайки живота на мрежата;
- **Надеждна комуникация** – чрез използване на обработка в мрежата, агрегиране на данни и адаптивни настройки, ESRT гарантира надеждно отчитане на данни, дори при наличие на мрежова динамика;
- **Машабируемост** – ESRT е проектиран да машабира ефективно, което го прави подходящ както за малки, така и за големи WSN;
- **Управляван от събития** – ESRT е проектиран да дава приоритет на предаването на данни за събития. Той използва фокусирания върху данните характер на WSN, където сензорните възли улавят и предават данни, когато възникнат конкретни събития;
- **Надеждност** – ESRT осигурява надеждна доставка на данни чрез използване на различни механизми за справяне със загубите на пакети, повреди на връзката и повреди на възли, което го прави подходящ за приложения с критично значение;
- **Енергийна ефективност** – за да увеличи максимално живота на мрежата, ESRT включва енергийно ефективни стратегии, като цикъл на работа, адаптивна мощност на предаване и селективно пренасочване.

Протоколът ESRT включва няколко ключови функции, които допринасят за неговата ефективност в WSN:

- **Отчитане на данни, задействани от събития** – ESRT дава приоритет на отчитането на данни, задействани от събития, като намалява ненужните предавания на данни по време на периоди на неактивност;

- **Обработка в мрежата** – протоколът поддържа обработка в мрежата, позволяйки на междинните възли да агрегират и обработват данни, преди да ги препратят към приемника, намалявайки излишното предаване на данни;
- **Прогнозиране на данни** – ESRT използва техники за прогнозиране на данни, за да оцени бъдещите стойности на данните от сензорите, като позволява проактивно предаване на данни и намалява латентността;
- **Механизми за надеждност** – ESRT използва механизми като потвърждение на данни, повторно предаване и резервиране на пътя, за да осигури надеждна доставка на данни дори при наличие на загуби на пакети или повреди на възел.

Протоколът ESRT допринася значително за подобряването на WSN чрез:

- **Подобрена надеждност** – механизмите за надеждност на ESRT го правят много подходящ за приложения, където точността на данните е от решаващо значение, като мониторинг на околната среда и наблюдение;
- **Енергийна ефективност** – чрез минимизиране на не-нужните предавания на данни и използване на енергийно ефективни стратегии, ESRT удължава живота на мрежата, намалявайки разходите за поддръжка;
- **Намалена латентност** – подходът на ESRT, управляем от събития, и техниките за прогнозиране на данни минимизират латентността при предаване на данни, което го прави подходящ за приложения в реално време.

### **Протокол за реално време и надежден транспорт (RT)<sup>2</sup>**

Протоколът (RT)<sup>2</sup> е разработен за надеждно транспортиране на данни и характеристики на събития от сензорни модули с минимален разход на енергия [44].

Основен фокус на този протокол са функциите на конт-

рол на трафика и надежден транспорт на сензорни данни в реално време.

Протоколът (RT)<sup>2</sup> използва комбиниран механизъм за откриване на задръствания, основан на изчисляване на средното закъснение при предаване на данни от възела, и проследяване на ниво на запълване на буфера на сензорните възли за детекция на задръствания в мрежата.

(RT)<sup>2</sup> се самоконфигурира и може да работи ефективно с ad-hoc базирани сензорни мрежи с динамична топология.

Въпреки предимствата си, работата на протокола (RT)<sup>2</sup> се базира на обратна връзка от концентратора на данни, приемащ трафика от данни, което невинаги е приложимо при мрежови топологии от клъсттерен тип и мулти-хоп комуникация.

## **5.5. Протоколи на приложния слой (Application Layer)**

Приложният слой е най-високият слой на OSI модела и отговаря за предоставянето на специфични услуги и функционалности на потребителите и приложенията в мрежата. Приложният слой дефинира протоколите, които позволяват обмена на данни, команди и отговори между приложенията, както и форматите и семантиката на данните. Приложният слой е важен за WSN комуникацията, тъй като влияе върху оперативната съвместимост, сигурността и използваемостта на мрежата.

### **5.5.1. Основни функции**

Приложният слой в WSN трябва да изпълнява няколко основни функции, за да осигури ефективна и надеждна комуникация.

### **Агрегиране на данни**

WSN обикновено генерираат огромни количества данни. Протоколите на приложния слой трябва да агрегират и обработват тези данни, преди да ги препратят на крайните потребители, за да спестят енергия и честотна лента.

### **Енергийна ефективност**

WSN често се захранват от батерии и енергийната ефективност е от първостепенно значение. Протоколите на приложния слой трябва да минимизират консумацията на енергия от сензорните възли по време на комуникация.

### **Машабируемост**

WSN могат да варираат по размер, от няколко възела до хиляди. Протоколите на приложния слой трябва да могат да се машабират, за да се справят с различни размери на мрежата.

### **Надеждност**

Предаването на данни в WSN трябва да е надеждно, за да се гарантира, че няма загуба на данни по време на комуникация. Механизмите за резервиране и коригиране на грешки често са включени в протоколите на приложния слой.

Основната роля на приложния слой е да отдели физическата топология на WSN от приложенията, работещи със сензорни данни. Протоколите свързани с приложния слой попадат в три основни категории:

- Протоколи за компресиране на данни;
- Протоколи за обработка на заявки;
- Протоколи за управление на мрежата.

### **5.5.2. Базови комуникационни протоколи на приложния слой**

Някои от най-разпространените и подходящи протоколи и стандарти за приложния слой на WSN са CoAP (Constrained Application Protocol), MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), AMQP (Advanced Message Queuing Protocol), DDS (Data Distribution Service), Modbus, BACnet (Building Automation and Control Networks), SMP (Sensor Management Protocol), SQDDP (Sensor Query and Data Dissemination Protocol) и ZigBee Cluster Library (ZCL).

#### **CoAP (Constrained Application Protocol)**

CoAP е специализиран протокол, предназначен за безжични сензорни устройства и мрежи с ниска мощност и ограничена честотна лента, което го прави идеален за работа в WSN [45].

Базира се на принципите на REST (Representational State Transfer) и предлага взаимодействия заявка/ответ. CoAP е особено подходящ, когато оперативната съвместимост с уеб услуги или приложения е изискване. Използва се в сценарии като интелигентни градове, индустриална автоматизация и мониторинг на здравеопазването.

#### **MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)**

MQTT е протокол, изискващ минимални изчислителни ресурси и ефективен за публикуване-абониране на съобщения [46]. Той се използва широко в IoT и WSN поради минималните си разходи и способността да се справя с мрежи с ниска честотна лента, висока латентност или ненадеждни мрежи.

MQTT поддържа различни нива на QoS (Quality of Service), което позволява на потребителите да контролират надеждността на доставката на съобщения. Този протокол е

подходящ за приложения, при които ниската консумация на енергия и предаването на данни в реално време са от съществено значение, като домашна автоматизация, мониторинг на околната среда и интелигентно земеделие.

### **AMQP (Advanced Message Queuing Protocol)**

AMQP е стабилен, мащабируем протокол за съобщения, широко използван в WSN, когато се изисква оптимално подреждане на съобщения в опашка [47]. Той поддържа както модели за публикуване-абониране, така и комуникационни модели от тип точка-точка, осигурявайки гъвкавост за нуждите на различни приложения.

AMQP е подходящ за WSN в индустриска автоматизация, логистика и широкомащабно наблюдение.

### **DDS (Data Distribution Service)**

DDS е базиран на данни междинен протокол, предназначен за разпределени системи, включително WSN [48]. Той предлага комуникационен модел за публикуване и абониране и се фокусира върху приложения в реално време и критични за мисията приложения. DDS обикновено се използва в сценарии като отбранителни, космически и промишлени системи за контрол.

### **Modbus**

Modbus е широко използвани протокол за индустриска автоматизация и системи за управление [49]. Той е надежден и елементарен като принцип на работа, което го прави подходящ за свързване на сензори и устройства в промишлени условия, като например производство, управление на енергията и контрол на процеси.

### **BACnet (Building Automation and Control Networks)**

BACnet е протокол на приложния слой, предназначен за автоматизация на сгради и системи за контрол [50]. Той позволява комуникация между сензори и контролни устройства в сградата. BACnet се използва за задачи като HVAC контрол, осветление и сигурност в интелигентни сгради.

### **SMP (Sensor Management Protocol)**

Този протокол на приложния слой се използва от системните администратори за взаимодействие със сензорните мрежи. Тъй като сензорните мрежи нямат глобална идентификация, те могат да бъдат достъпни чрез присвоени идентификатори, основани на атрибути, и адресиране на местоположение, които се използват за извършване на следните задачи:

- въвеждане на правила, свързани с агрегирането на данни, именуване, базирано на атрибути, и групиране в сензорните възли;
- обмен на данни, свързани с алгоритми за намиране на местоположение;
- обмен на данни при преместване на мобилни сензорни възли;
- времева синхронизация на сензорните възли;
- включване и изключване на сензорни възли;
- запитване за конфигурацията на сензорната мрежа и състоянието на възлите и преконфигуриране на сензорната мрежа;
- удостоверяване, разпространение на ключове и сигурност в комуникациите на данни и др.

### **SQDDP (Sensor Query and Data Dissemination Protocol)**

SQDDP предоставя на потребителските приложения интерфейси за генериране на заявки, отговаряне на заявки и съби-

ране на входящи отговори. Тези заявки обикновено не се изпращат към определени възли, а към част или цялата мрежа [51].

Всяка заявка, изпратена едновременно до множество възли (или част от мрежата), позволява пестене на енергия и обработка, което при WBAN (Wireless Body Area Networks) е важно, тъй като този тип мрежа обикновено предоставя ограничени ресурси.

## **5.6. Методи и алгоритми за компресиране на сензорни данни**

Първият етап преди стартиране на процеса на физическо предаване на данни е процедурата за компресиране на сензорни данни. При този процес излишната информация се компресира, за да намали обема на предаваните данни и в същото време да се запази част или цялото информационно съдържание.

Основните решения за компресия могат да бъдат класифицирани в две групи на база изискванията към целостта на предаваните данни – компресия без загуба и компресия със загуба на данни.

Компресирането без загуба намалява данните съдържание, т.е. размер на пакета, без да се възпрепятства целостта на информацията, това като правило ограничава степента на компресия до определени нива в зависимост от използваните алгоритми.

При решенията за компресиране със загуба на данни се постига по-добра компресия и многократно намаляване на обема на предаваните данни. По-високата ефективност при тези решения се постига със загуба на информация в различна степен в зависимост от обработката им в процеса на компресиране.

Поради по-високата сложност и енергоемкост на алгоритмите за компресиране със загуби при WSN се използват основно техники за компресиране без загуби.

### 5.6.1. Алгоритъм за компресиране LZW

Съществуват няколко алгоритъма за компресиране с общо предназначение, където основната цел е да се подобри степента на компресия.

За съжаление те са неприложими, тъй като са проектирани за устройства, разполагащи с големи изчислителни ресурси. Обемът на кода на съществуващите алгоритми е твърде голям, за да бъде имплементиран в сензорни модули с относително малък обем памет. Поради тази причина този тип алгоритми не са подходящи за WSN.

Възможна алтернатива е т.нар. S-LZW (Sensor LZW) алгоритъм за компресия [52]. Това е вариант на алгоритъма на компресия Lempel – Ziv – Welch (LZW), който е съобразен с ограниченията на ресурсите на безжичните сензорни възли.

LZW е метод, базиран на речник, който кодира низове от символи като знак в речник. Речникът частично се инициализира преди кодирането и се попълва въз основа на последователността от символи, срещани по време на кодиране.

Основното предизвикателство за използване на LZW алгоритъма за WSN са неблагоприятните ефекти от грешки в безжичните канали.

На практика LZW декодиране не може да се извърши, ако кодираният поток от данни не е получен в приемащата страна в пълния си обем. Това налага данните, които трябва да бъдат компресирани, да бъдат ограничени до малки блокове, така че повторното предаване да може да се извършва без големи загуби на данни и с минимални енергийни ресурси.

Друг проблем е ограничението в размера на речника поради относително малкия наличен обем памет в сензорните модули. Вариантът на алгоритъма S-LZW е оптимизиран за справяне с тези проблеми и използва речник с размер 512 записи, за да компресира данни в блокове от 528 байта (две флаш страници). Компресирането на измерените сензорни данни може да бъде подобрено чрез използване на техния цикличен характер.

Тъй като по принцип сензорните възли измерват физически параметри, данните, които се компресират, са силно свързани по време. Това означава, че във времето е възможно да има няколко повторения в данните, които ще бъдат компресирани. Това може да бъде адресирано чрез добавяне на структура на миникеш, която съхранява най-новите записи и представлява модернизиран вариант на S-LZW – т.нар. S-LZW-MC (S-LZW с мини кеш).

Чрез този подход съществено се подобрява съотношението на компресия в случаите, когато данните съдържат много повторения. В допълнение към разчитането на вътрешните взаимозависимости на данните, ефективността на компресията може да бъде допълнително подобрена чрез трансформиране на данните във форма с няколко модела преди компресиране.

Това е по принцип посочено като предварително условие и S-LZW алгоритъмът се оптимизира чрез имплементиране на два метода.

Първият метод за предварително условие е трансформацията на Burrows – Wheeler (BWT), за която обикновено се използва компресия на изображения, звук и текст. Вторият метод за предварително условие, използван при S-LZW, се основава на вътрешната структура на данните на мониторинг на данни.

По принцип при приложенията за мониторинг дължината

на данните и съдържанието са добре известни и фиксиран. Освен това, за набор от стойности на наблюдение, всички наблюдения или поне най-значещите битове са еднакви – т.е. има корелация в потока на последователно измерени сензорни данни. За тази цел се извършва структурирано транспониране (ST) за подобряване на компресията. По-конкретно, данните за всяко наблюдение се използват за запълване на редовете на матрица. След това матрицата се транспонира и данните се компресират с помощта на транспонирана матрица. Тъй като транспонираната матрица има няколко повторения, съотношението на компресия може да бъде допълнително подобрено. Тази версия на протокола е обозначена като S-LZW-MC-ST. S-LZW позволява оптимизиране на количеството енергия необходимо за предаване и приемане на сензорни данни.

Основното предимство на техниките за компресиране в WSN е намаляване на нивото на консумация на енергия при предаване на данните чрез намаляване на обема им.

В резултат на процесите на компресиране пакети с чувствително намален обем се маршрутизират в сензорната мрежа.

Въпреки енергоемкостта на процеса на компресиране на данни, общите икономии на енергия при предаването на сензорни данни от крайния сензорен модул до концентратора на данни са значителни.

### 5.6.2. Алгоритъм за компресиране DSC

Схемите за компресиране с възлови точки като S-LZW подобряват енергийната ефективност чрез намаляване на обема на данните локално във всеки сензорен възел. Същевременно някои типове приложения за мониторинг изискват измерване на физични величини през относително големи интервали от време, което води до висока времева корелация.

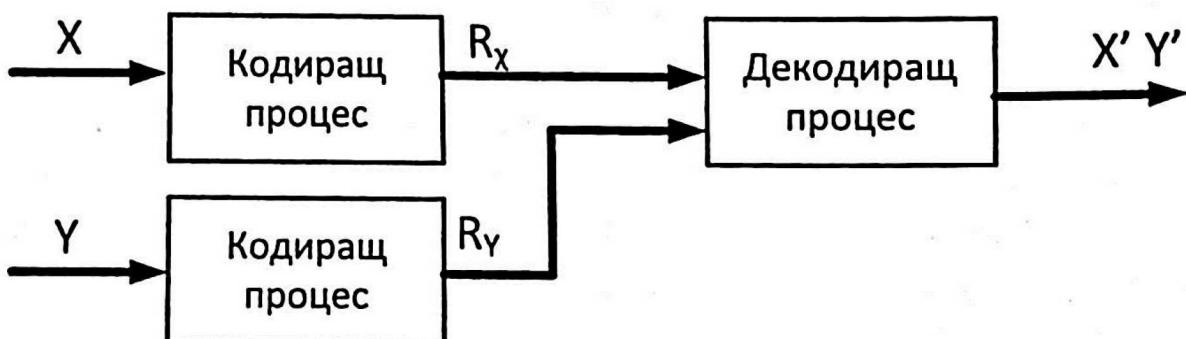
Допълнително при сензорни мрежи с висока плътност на разгръщане на сензорите, информационното съдържание, наблюдавано от близко разположени сензори, е силно свързано.

Тази корелация може да бъде използвана за значително намаляване на съдържанието на данни.

Алгоритъмът DSC (Distributed Source Coding), предложен от Slepian and Wolf [53] и Wyner и Ziv [54], е възможно решение за този тип приложения. При този алгоритъм, информацията в сензорния възел се компресира, като се предполага корелация с друг възел, без да се обменя информация.

Тази информация се изпраща до концентратора на данни и декодирането се извършва на ниво концентратор на данни, който получава данни, независимо компресирани от различни сензори.

Кодирането при DSC, известно още като Slepian – Wolf кодиране, се фокусира върху разпределеното кодиране на два корелиращи източника, X и Y, както е показано на фигура 20.



*Фиг. 20. Алгоритъм на DSC (Slepian – Wolf) кодиране*

Както е показано на фигурата, концепцията на DSC се състои от 2 независими енкодера и един общ декодер. Променливите X и Y илюстрират два дискретни независими източника на сензорни данни, а с  $R_X$  и  $R_Y$  са обозначени нивата на компресия.

Данните от всеки източник се кодират самостоятелно, без

никаква външна информация. Информационната теория гласи, че без информация от други източници дискретна произволна променлива  $X$  може да бъде кодирана от поне  $H(X)$  бита без загуба на информация, където  $H(X)$  е ентропията на  $X$ .

Съответно с отделни ентропийни енкодери и декодери могат да бъдат следните скорости постигнато:  $R_X \geq H(X)$  и  $R_Y \geq H(Y)$ , където  $H(X)$  и  $H(Y)$  са ентропии на  $X$  и  $Y$ , съответно.

Теоремата Slepian – Wolf декларира, че използвайки статистическите свойства на  $X$  и  $Y$  на всеки енкодер, може да се постигне съвместно кодиране на  $X$  и  $Y$ . С други думи,

$$R_X + R_Y \geq H(X, Y) \quad (3)$$

$$(R_X \geq H(X | Y), R_Y \geq H(Y | X)) \quad (4),$$

където

$H(X, Y)$  е съвместната ентропия на  $X$  и  $Y$  и  $H(X | Y)$  и  $H(Y | X)$  са условни ентропии.

## 5.7. Интегриране на данни от сензорни възли

WSN се състоят от много сензорни възли, които събират данни за физически събития.

Концентраторът на данни осигурява доставката на интересуващите данни до контролния център чрез изпращане на заявки до един или повече сензорни възли.

Отговорите на заявката могат да бъдат направени просто от изпращане на поисканите сирови данни незабавно в концентратора на данни. Чрез възможностите за локална обработка на данни в сензора се предоставят алтернативни начини за обработка на тези заявки с данни в самата мрежа, водещи до значително енергоспестяване.

Този процес се нарича обработка на заявките. WSN може да

се разглежда като разпределена база данни, където възлите непрекъснато доставят потоци от данни до концентратора на данни.

Въпреки, че съществуват много системи за управление на бази данни (СУБД), разработени за традиционните разпределени бази данни, специфичните характеристики на WSN правят тези решения неприложими.

### **5.7.1. Характеристика на сензорните данни в среда на WSN**

Специфичните характеристики на WSN могат да бъдат изброени, както следва:

#### **Поточни данни**

Сензорните възли произвеждат данни непрекъснато, обикновено на точно определени интервали от време, без изрично да са били поискани тези данни.

#### **Обработка в реално време**

Данните от сензора обикновено представляват събития в реално време. Предаването на тези сирови данни директно до концентратора с цел последваща обработка е енергоемък процес и се избягва в съвременните архитектури на сензорни мрежи. Складирането на тези сирови данни изисква и големи масиви от данни и допълнителни процесорни мощности.

С напредването на технологиите по миниатюризация на електронни компоненти и вграждане на енергоспестяващи алгоритми директно в интегралните схеми, в много случаи е по-ефективно сировите сензорните данни да се обработват директно в сензорния модул.

#### **Комуникационни грешки**

Тъй като сензорите в общия случай изпращат данни чрез мулти-хоп безжична комуникация, грешките в процеса на рет-

рансляция на данните в безжичната мрежа влияят върху надеждността на информацията, достигаща до концентратора на данни.

### **Несигурност**

Информацията, събрана от сензорите, съдържа определен процент шум и девиация на данните в зависимост от околната среда.

### **Ограничена памет за данни**

Поради малкия си размер и изискването за минимална консумация на енергия безжичните сензорни възли имат ограничена памет за данни. Поради тези причина има ограничения за времето на съхранение на данни локално в сензорния модул.

### **Локална обработка срещу комуникация на необработени сензорни данни**

В общия случай разходът на енергия за локална или групова обработка на сензорни данни в рамките на сензорен кълстер е по-малък от разхода на енергия при предаване на „суро-ви“ сензорни данни и последваща обработка. Следователно възможностите за локална обработка на данни в сензорните възли трябва да се използват при обработка на заявки.

Мощността на обработка, налична в сензорните възли, предоставя потенциални решения за предизвикателствата срещани при обработка на WSN заявки.

По принцип на запитванията, изпратени от концентратора на данни, може да се отговори като се изпратят сировите данни (raw data) на сензора към концентратора на данни. Този подход се обозначава като складиране, където обработката на сензорните заявки и достъпът до сензорната мрежа са разделени. В резултат на това може да бъде разработена централизирана СУБД (Система за Управление на Бази Данни), за да

осигури достъп до събраните данни чрез класически техники на управление на релационни бази данни. Подходът за складиране обаче води до прекомерно използване на комуникационните ресурси в WSN и натрупване на силно излишни данни в концентратора на данни.

Решенията за обработка на заявки предоставят необходимите инструменти за реализиране това взаимодействие между потребител и разпределен набор от сензорни възли.

Услугите, предоставяни от тези решения, могат да бъдат разделени на две: сървърни услуги и WSN-услуги.

Услугите от страна на WSN могат да бъдат разделени като цяло в два етапа:

- изпращане на заявка за данни;
- събиране на данни.

Изпращането на заявката за данни се извършва чрез предаване на заявките, които се генерират според интересите на потребителите, към всички или подмножество сензорни възли в мрежата.

Във втория етап сензорните възли отговарят на тези заявки, само ако типът на техните локално наблюдавани данни от сензора отговарят на спецификата на заявките.

В определен аспект WSN могат да се разглеждат като разпределени бази данни, където данните се генерират непрекъснато в зависимост от нуждите на потребителя. Съответно някои традиционни решения за база данни може да са приложими към такъв тип обработка на сензорни данни в рамките на WSN.

Според събраната информация концентраторът на данни може да извърши операции и на високо ниво, за да осигури глобален преглед и анализ на данните, които представляват интерес за потребителя.

Например ако потребителят се интересува от средната температура в определен район, температурата от всеки сензор в този район може да бъде локално обработена до определено ниво и да се изпрати до концентратора на данни.

Концентраторът на данни намира средната стойност на тези локално обработени стойности и предоставя отговор на потребителя.

Традиционните подходи за разпределена база данни обаче не отчитат цената на доставката на информацията до крайния потребител. В WSN доставките на информация са доминиращият разход поради съществуващия разход на електроенергия за предаване на данните и ретранслирането им до концентратора, както и загубите на данни по време на трансляция.

Според използваните алгоритми за управление на заявките за данни те се класифицират в три основни групи:

- **Push-базирана обработка на заявки** – това е иницииран от сензорния модул процес на изпращане на данни отговарящи на предварително дефинирани критерии;
- **Pull-базирана обработка на заявки** – в този случай концентраторът изпраща заявка за данни към група от сензорни модули в рамките на сензорната мрежа или до цялата мрежа, разпространява интересите на потребителя към набор от сензорни възли в мрежата. На база приета заявка за данни сензорните модули измерват, обработват и изпращат заявена-та информация;
- **Обработка на заявки „Push-pull“** – В този случай се използват и двата подхода, като както сензорите, така и концен-траторът на данни активно участват в обработката на заявките.

Типът на подхода за обработка на заявки диктува подходящата архитектура, която ще се използва. В допълнение към архитектура на високо ниво, която да се използва при обработката

на заявки, могат да се използват различни видове заявки.

Заявките за данни могат се класифицират въз основа на два различни критерия: времево и пространствено съдържание.

### **Времево съдържание**

Според времевото съдържание заявките се класифицират в три основни групи:

- **Непрекъснато запитване** – този тип заявки обикновено са свързани с мониторинг на приложения, където сензорите непрекъснато изпращат своите наблюдения с определена честота. Продължителността на заявката може да се посочи и в описанието на заявката;
- **Запитване за моментен статус** – този тип заявка се отнася до събиране на конкретен параметър в текущия момент или в някакъв конкретен момент от време. В случай на заявки, свързани с бъдещи случаи, запитвания за моментни снимки са свързани с поставяне на задачи;
- **Запитване за предходен период** – в допълнение към извършване на проучване на базата на непрекъснати или исторически заявки сензорът може също да съхранява информация, свързана с по-рано измерени данни. Този тип заявки са най-близки към традиционните подходи за разпределена база данни.

### **Пространствено съдържание**

В допълнение към тяхното времево съдържание запитванията се класифицират и според начина, по който адресират сензори в WSNs, т.е. пространственото съдържание.

В този случай заявката за данни може да адресира всички или част от сензори в мрежата, което обикновено е свързано със задачи на системно ниво.

Извън системните задачи, повечето заявки в сензорните мрежи се адресират до група от сензори, в рамките на сен-

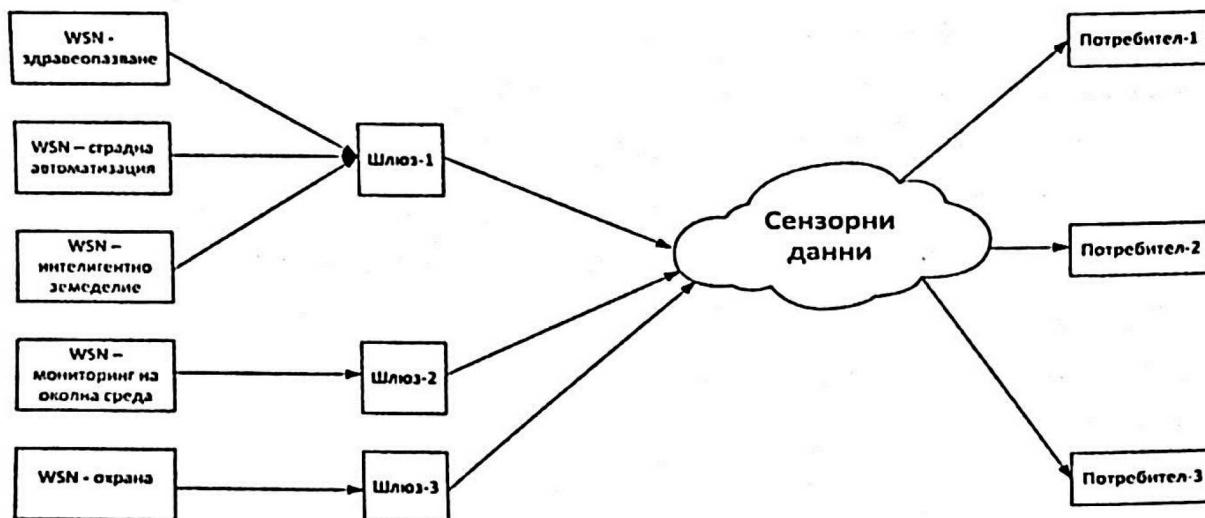
зорната мрежа. Според начина, по който тези сензори са адресирани, запитванията могат допълнително да бъдат класифицирани в следните групи:

- **Заявка, ориентирана към данни** – това е най-използваният тип заявки, където фокусът е върху технически параметри за конкретно събитие, което е дефинирано в заявката. Откриване на пожар според внезапно повишаване на околната температура над определена стойност е пример на заявка, ориентирана към данни. Заявката не адресира директно всички възли за изпращане на техните температурни показания Вместо това възлите отговарят на заявката само ако съдържанието на данните им съвпада с изисквания за запитване;
- **Географска заявка** – вместо да открие събитие, потребителят може да се интересува от наблюдение в определена област от мрежата. В този случай се използват географски заявки, които адресират сензорни възли според местоположението им;
- **Заявка за откриване в реално време** – при този тип сензорът отговаря на заявката само ако резултатите от измерваните данни отговарят на група от критерии. Например движение с определена скорост на обект, намиращ се на определена дистанция.

Видът на заявката също влияе върху маршрутите, създадени в мрежата за доставяне на съобщенията за заявка. Важно е да се отбележи, че броят сензори, които отговарят на заявка, невинаги отговаря на броят сензори, получили заявка. Например на всички сензори могат да бъдат доставени заявки, ориентирани към данни в мрежата, но реагират тези при които има събитие. От друга страна, за географско запитване съобщенията за заявка могат да бъдат специално изпращани до зоната на интерес. Следователно решението за маршрутизиране се вземат въз основа

на типа заявка, която се използва в мрежата.

Основната особеност на WSN трафика е, че данните от сензорите обикновено се изпращат до една точка, до т.нар. концентратор на данни. В абстрактен смисъл информационният поток може да се възприема като обратно дърво за множество предаване, както е показано на фигура 21, където концентраторът на данни изпраща заявки към сензорни възли за измерване на параметри на околната среда и получава резултатите от измерените параметри.



*Фиг. 21. Множествено предаване на данни*

Многообразният характер на информационния поток води до проблеми при възли, които са разположени по-близо до концентратора на данни, тъй като през тези възли преминава по-голям обем от трафик в сравнение с възлите, които са разположени далеч от концентратора на данни.

Това причинява задръствания и може да доведе до загуби на пакети. Освен това възлите, по-близо до концентратора на данни, консумират повече енергия, което може да доведе до ранно изчерпване на батерийното им захранване и до изолация на концентратора на данни от останалата част на мрежата.

Информацията, изпратена от различни сензорни модули

в рамките на една сензорна мрежа, е свързана в известна степен. За възлите, които са разположени много близо един до друг, корелацията е толкова висока, че тези възли могат да изпращат по същество еднакви сензорни данни. От друга страна, за отдалечени възли, въпреки че съдържанието на информация може да се различава значително, типът информация е един и същ, въпреки че варира в определени граници.

Като пример за заявка, свързана с температурата, всички сензорни възли изпращат данни за температурата в обсега на измерване. В резултат пакетите, които се изпращат, съдържат подобна информация дори ако отчетената стойност на температурата е различна.

Приликата, както в информационното съдържание, така и в пакетното съдържание в WSN, може да бъде използвана за минимизиране на потока от данни от няколко сензорни възли към концентратора на данни. Като пример за интеграция на сензорни възли, измерващи данни в един регион, вместо да се изпращат пакети от всеки възел, може данните да се интегрират в един пакет, съдържащ данни от всички възли в района на измерване. По подобен начин пакети от различни места на едно и също сензорно поле могат да бъдат обединени в един пакет, като се поддържа информацията за температурата във вид на массив от данни. В допълнение натоварването на трафика може допълнително да бъде намалено чрез извършване на вътрешна обработка въз основа на заявката, изпратена от потребителя.

Обобщаването на данни може да се възприема като набор от автоматизирани методи за комбиниране на идващите данни от много сензорни възли в набор от смислена информация.

Решенията за събиране на данни обикновено се състоят от три основни компонента: съхранение на данни, функция за интегриране и път за агрегиране.

Интеграцията на данни се извършва в точки на интегриране, комбиниращи данни от множество сензорни възли. Поради несинхронизирания характер на процесите на измерване и комуникацията, данните, които трябва да се интегрират, не пристигат едновременно в точките на събиране.

Тъй като паметта на сензорните модули е ограничена, сензорните данни е необходимо да се обработят до определено ниво на точност и компресират, за да могат да се съхраняват по ефективен за паметта начин.

Това не винаги е възможно поради динамичния характер на WSN комуникацията. Предоставянето на данни обикновено се основава на насочени към данни заявки. Следователно, броят на възлите, които отговарят на заявката, зависи от свойствата на физическото явление и може да варира в широки граници.

Аналогично пакетите, изпратени от определени възли, могат да се загубят, преди да достигнат точките за интегриране, поради грешки в безжичния канал. Наличието на тези възможни неопределености не позволява предварително да се определят количествата данни, които ще бъдат налични в точките за интегриране.

Локалната интеграция на данни преди изпращане до концентратора има съществени предимства в сравнение с директното изпращане на „сурови“ данни. Съществената асиметрия между консумацията на енергия за локална обработка и интегриране и тази за комуникация мотивира използването на локалната или груповата обработка в рамките на един или няколко сензорни модула, свързани в клъстер.

### **5.7.2. Модел на паралелна обработка на интегрирани сензорни данни**

Обработката на интегриране на паралелни сензорни данни в безжични сензорни мрежи (WSNs) е едно от възможните решения за намаляване на комуникацията на съседния сензорен възел и за пестене на енергия. В същото време процесът на интегриране на локален сензорен възел се нуждае от допълнителен процесор и енергийни ресурси. Следователно разработвато на реалистичен и надежден модел на процесите на интегриране на данни в WSN е критично в много аспекти.

В тази част от глава 5 се представя нов метод за моделиране и математически модел на паралелна обработка на интегрирани сензорни данни в WSN. Предложеният метод използва моделиране, базирано на подхода на обобщените мрежи (GN), който е усъвършенстван начин за паралелна обработка на данни и анализ на безжични сензорни системи (WSS). За инструмент за симулация и анализ се използва симулаторът WSNet. Предложеният базиран на GN модел покрива повечето от аспектите на паралелната интеграция на сензорни данни в WSN, базирани на протоколи 802.15.4.

#### **Паралелен процес на интегриране на сензорни данни в WSN с клъстерна топология**

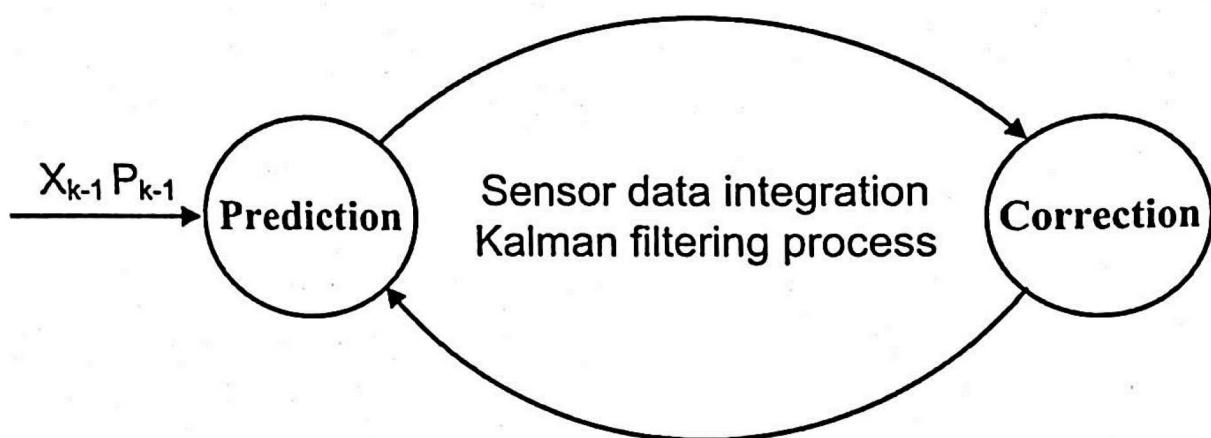
Предложеният процес публикуван в Alexandrov et al [55], е предназначен да дублира данните от различни сензори, които наблюдават една и съща среда, да подобри нивото на сигнал/шум и да генерира по-надеждна информация.

#### **Основни допускания**

Сензорите на WSN са групирани в клъстери. Всеки клъстер има собствен координатор CH(Cluster Head). Сензорите, които принадлежат към определен клъстер, интегрират свои-

те данни едновременно и изпращат интегрираните данни директно към своя СН.

Процесът на интегриране на локалните данни на сензора протича паралелно в сензорните възли и се основава на филтьра на Калман [56] и се извършва на два основни етапа – прогнозиране и корекция, както е показано на фиг. 22.

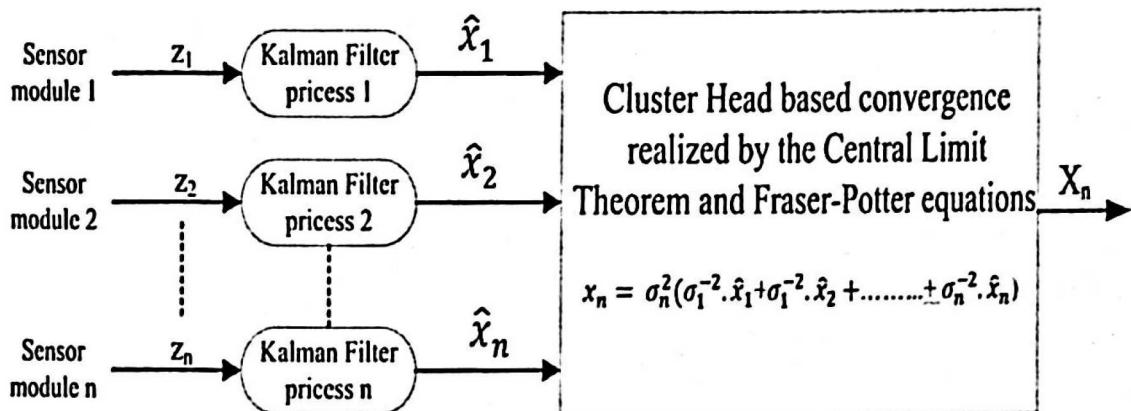


Фиг. 22. Процес на интегриране на сензорни данни с филтър на Калман

Всеки сензор на WSN по време на процеса на формиране на сензорната мрежа се присвоява на конкретен клъстер. Като част от групата сензори, организирани в клъстера, всеки сензорен възел събира данни от своята среда за определен период от време, интегрира локално събранныте данни, използвайки метода за филтриране на Калман и изпраща интегрираните данни към СН.

СН започва интеграция от второ ниво собствени критерии за вземане на решение и изпраща интегрираните данни до контролния център.

Процесът на интегриране на клъстерни сензорни данни се повтаря във фиксирани периоди от време, които зависят от конкретната WSN архитектура и вградените протоколи за маршрутизиране.



Фиг. 23. Процес на паралелно интегриране на сензорни данни

### Основни принципи при моделиране на база обобщени мрежи

Обобщените мрежи GN (Generalized Nets) [57],[58],[59],[60] се появяват като разширения на обикновените мрежи на Петри PN (Petri Nets) и всички техни модификации. По принцип GN се различават от начините за дефиниране на другите видове PN. Компонентите в типичната GN-дефиниция предоставят повече и по-добри възможности за моделиране и следователно определят GN сред отделните типове PN.

Подобно на PN, GN съдържат места, преходи и токени, но техните преходи имат много по-сложна структура.

В GNs всеки преход се описва от тройка:

$$Z = (L^I, L^{II}, r) \quad (5)$$

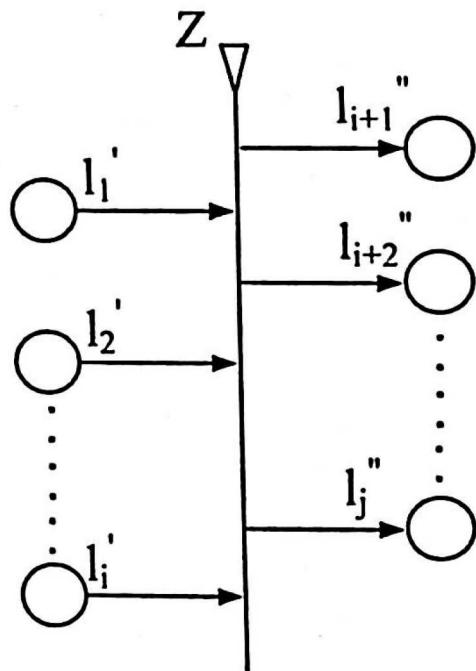
където  $L^I$  и  $L^{II}$  са непразни множества от места (съответно входните и изходните места на преходите);

За преход  $Z$  това са:  $L^I = \{l_1, l_2, \dots, l_I\}$  и  $L^{II} = \{l'', l'''\}$  г е условието за преход, определящо кои токени ще преминат (или прехвърлят) от преходните входове към неговите изходи; има формата на индексна матрица IM (Index Matrix).

GN-токените влизат в мрежата с първоначално зададени

параметри. След преместването на новото място GN-токените могат да променят параметрите си или да запазят първоначалните.

Най-голямата разлика между мрежите на Петри и предикатно-преходните мрежи е, че GN-токените могат да запазят всички свои собствени характеристики по време на процеса. По-късно те могат да бъдат използвани за оценка на предикатите на условията за преход. Втората голяма разлика спрямо останалите типове мрежи на Петри е, че GN съдържат глобална времева скала.



*Фиг. 24. Примерен преход при обобщена мрежа (GN)*

GN могат да имат повече от 20 консервативни разширения (т.е. разширения, чието функциониране и резултатите от тяхната работа могат да бъдат представени от обикновен GN). Някои от тях са:

GN с глобална памет; GNs с оптимизиращи компоненти;

GN със сложен тип преход;

GN с характерни функции на местата и дъгите.

В настоящия документ ще се фокусираме върху GN с глобална памет като най-подходящи за паралелната обработка на данни при големи WSN.

Въз основа на [1,2] подредения 4-кортеж

$$E^* = ((A), (K), (T), (X, \Phi, b)) \quad (6)$$

се нарича обобщена мрежа (GN) с глобална памет, където:

- А е множеството от преходи;
- К е множеството токени на GN;
- Т е моментът от време, когато GN започва да функционира;
- Х е множеството от всички първоначални характеристики, които токените могат да получат при влизане в мрежата;
- $\Phi$  е характеристичната функция, която присвоява нови характеристики на всеки токен, когато извършва прехвърляне от входно към изходно място на даден преход;
- $b$  е функция, която определя максималния брой характеристики на токена.

### **GN модел на процеси на паралелно интегриране на клъстериизирани сензорни данни.**

Нов GN модел на процеса на паралелно интегриране на сензорни данни е представен на фиг. 25.

Предложеният нов модел е свързан с клъстера топология на примерна WSN.

В модела входовете  $l_{11} l_{i1}$  представляват входните параметри на измерените данни, необходими за процеса на интегриране на клъстери, описан подробно в [55].

Токенът  $a$  влиза в GN на място  $l_{i1}$  с характеристика „ $C_i$  - измерени сензорни данни, където  $i \in N$ “.

$N$  е броят на сензорните възли в клъстера.

Токенът  $\beta$  влиза в GN на място  $l_{i2}$  с характеристика „ $S_{measure}$  – максимум брой измервания на сензорни данни“.

$$Z_{i1} = \langle \{l_{i1}, l_{i2}\}, \{l_{i2}, l_{i3}\}, r_{i,1} \rangle \quad i \in N \quad (7)$$

$$r_{i,1} = \frac{l_{i,2}}{l_{i,1}} \quad \begin{array}{l} l_{i,3} \\ true \end{array}, \quad \begin{array}{l} true \\ \wedge (l_{i1}, l_{i2}) \end{array} \quad (8),$$

$$l_{i,2} \quad true \quad W_{i2,i3},$$

където

$W_{i2,i3}$  е „завършен брой измервания  $P_i$ “.

Преходите  $Z_{11} - Z_{i1}$  на фиг. 25 представляват първоначалния процес на сензорни измервания и събиране на сензорни данни от сензорните възли в кълстера на WSN.

$$Z_2 = \langle \{l_{i3}, \dots, l_{i3} \mid i \in N\}, \{l_4, l_{i5}, l_{i6} \mid i \in N\}, r_2 \rangle \quad (9)$$

$$r_2 = \begin{array}{c|ccc} & l_4 & \dots & l_{i5} & l_{i5} \\ \hline l_{i3} & true & true & true & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ l_{i,3} & true & true & W_{4,i5} & \\ l_{10} & true & true & W_{4,10} & \end{array} \quad (10)$$

Къдото  $W_{i5,i6}$  е „завършен процес на измерване на данни“, а  $W_{4,10}$  представлява „цикъла на измерване на данни от сензора във фиксирани периоди от време“.

Преходът  $Z_2$  представлява завършения процес на измерване на сензорните данни, изпълнен в сензорни възли  $i, i \in N$

$$Z_3 = \langle \{l_{i5}, \dots, l_{i5}, l_6 \mid i \in N\}, \{l_6, l_7\}, r_3 \rangle \quad (11)$$

$$r_3 = \begin{array}{c} l_6 & l_7 \\ \hline l_{1,5} & \text{true} & \text{true} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ l_{j,5} & \text{true} & W_{6,7} \end{array} \quad (12),$$

където  $W_{6,7}$  е „изчислена оценка на филтъра на Калман“ Преходът  $Z_3$  представлява изпълнения етап от локалния (въз основа на филтриране на Калман) процес на интегриране на сензорни данни, изпълнен в сензорни възли  $i$ ,  $i \in N$ .

$$Z_4 = \langle \{l_7, l_9\}, \{l_9, l_{10}, l_{11}\}, r_4 \rangle \quad (13)$$

$$r_4 = \begin{array}{c} l_9 & \dots & l_{10} \\ \hline l_7 & \text{true} & l_{10} \\ l_9 & \text{true} & \text{true} \\ \cdot & \cdot & 1 \end{array} \quad (14)$$

Преходът  $Z_4$  представлява етапа на изпълнение на процеса на интегриране на данни от сензора на главата на кълстера въз основа на централната гранична теорема и уравнението на Фрейзър–Потър.

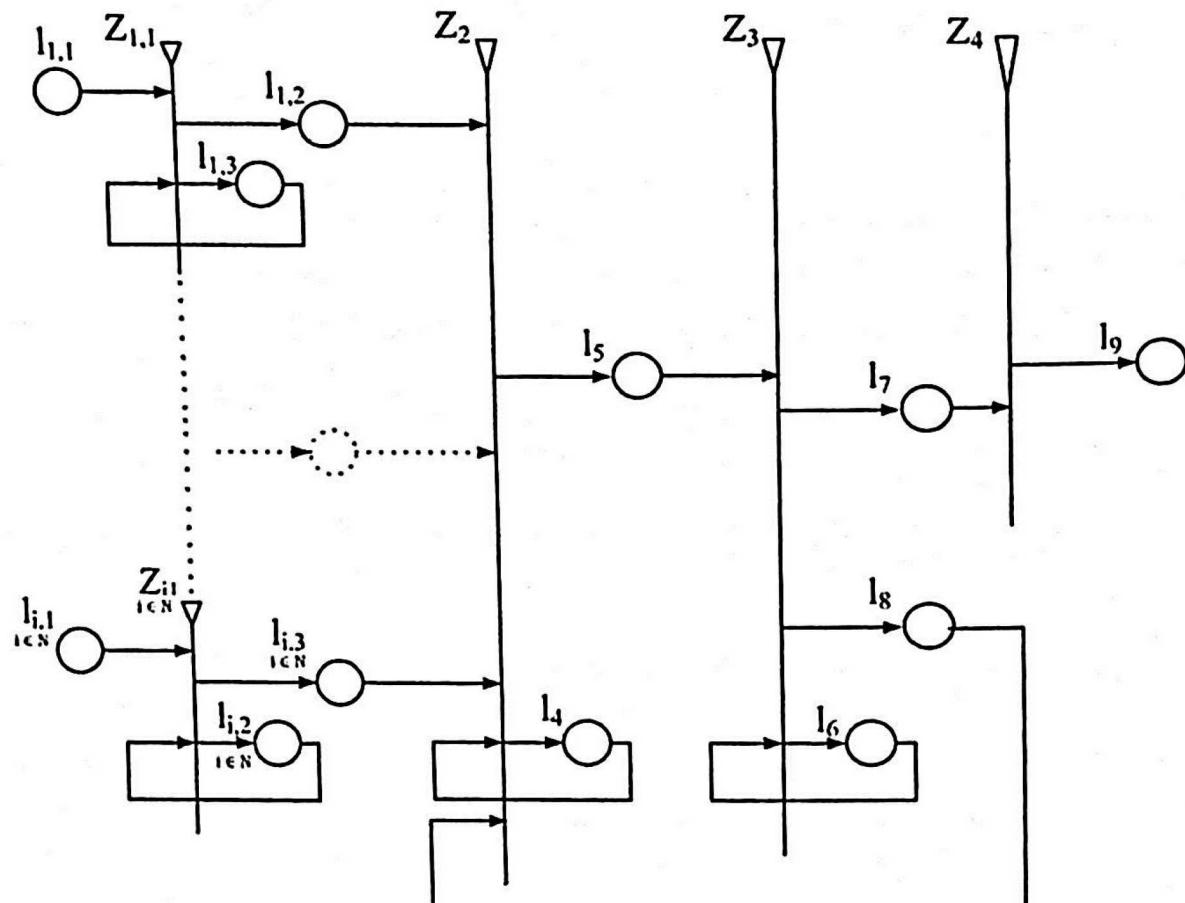
Както е показано на фиг. 25, преходът  $Z_5$  и изходът  $l_{12}$  представляват процеса на изпращане на интегрирани сензорни данни от СН към контролния център.

Представеният нов метод за моделиране, базиран на обобщени мрежи (GNs) и филтър на Калман е мощен подход за моделиране за създаване на надежден и гъвкав модел на паралелни процеси.

Както беше показано по-горе, основното предимство на GN е, че те са проектирани да се фокусират върху паралелна обработка. Предимствата на новия метод за моделиране на паралелно интегриране на сензорни данни са:

- предложението на GN модела е много добра опорна точка за анализ и симулация на процесите на интегриране на

паралелни данни на WSN и може значително да намали разходите за проектиране на системната архитектура на WSN;



*Фиг. 25. Модел на паралелно интегриране на сензорни данни в кълстерни WSN*

- информацията, събрана по време на избрания процес на генериране на модел (GNs с глобална памет), може да бъде съхранена и може да се използва за параметризация и адаптивна динамична промяна на ограничена по време симулация на процеса на паралелно интегриране на сензорни данни;
- внедреният в предложения метод филтър на Калман с комбинация от централната гранична теорема и уравненията на Фрейзър–Потър намалява шума и флуктуациите на данните, несвързани с основния процес.

Локалното паралелно интегриране на сензорни данни е

тичен пример, при който решенията за обработка помагат за намаляване за трафика в мрежата. В резултат на това може да се постигне съществено подобрение на енергийната ефективност на автономно захранвани сензорни режи и достигане на по-висока степен на мащабируемост.

Въпреки предимствата си, локалната обработка на данни изисква допълнителни изисквания за съхранение към сензорните възли.

Ето защо решенията за локална обработка трябва да бъдат проектирани така, че да минимизират въздействието върху необходимата процесорна мощ и размер локална памет, отделяни за основните функции на сензорния модул.

#### **Библиография към Глава пета:**

1. Linington, Peter F. (2003). Open system interconnection (OSI). Encyclopedia of Computer Science. John Wiley and Sons Ltd., GBR, 1288–1289.
2. Charles E. Young. (1983). A standard session protocol for open systems interconnection (OSI). In Proceedings of the May 16–19, 1983, national computer conference (AFIPS '83). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 617–622. <https://doi.org/10.1145/1500676.1500750>
3. Houldsworth, Jack, Mark Taylor, Keith Caves, Alan Flatman, Keith Crook. Chapter 2 – OSI – Open Systems Interconnection, Editor(s): Jack Houldsworth, Mark Taylor, Keith Caves, Alan Flatman, Keith Crook, Open System LANs and their Global Interconnection, Butterworth-Heinemann, 1991, pp. 2-1-2-14. ISBN 9780750610452, <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1045-2.50007-3>.
4. Alikhani, Shafagh, Thomas Kunz, Marc St-Hilaire, and Fei Richard Yu. (2010). A central-networked cross-layer design framework for wireless sensor networks. In Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC '10). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 301–

305. <https://doi.org/10.1145/1815396.1815466>

5. Parween, Sultana & Hussain, Syed. (2020). A Review on Cross-Layer Design Approach in WSN by Different Techniques. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 5. 741–754. doi: 10.25046/aj050488.

6. Wong, K. D. (2004). Physical layer considerations for wireless sensor networks. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Taipei, Taiwan, 2004, pp. 1201–1206, Vol. 2, doi: 10.1109/ICNSC.2004.1297118.

7. Pandey, K. K. (2014). Implementation of energy-efficient cooperative communication for multi-hop WSN. *International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES)*, Allahabad, India, 2014, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICPCES.2014.7062805.

8. Kumbhar, A. (2017). Overview of ISM Bands and Software-Defined Radio Experimentation. *Wireless Pers Commun* 97, 3743–3756, <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4696-z>

9. Priya Sharma, Ashutosh Kumar Singh, A survey on RF energy harvesting techniques for lifetime enhancement of wireless sensor networks, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, Volume 37, 2023, 100836, ISSN 2210-5379, <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100836>.

10. S. V. Dvornikov, S. D. Erokhin and S. S. Dvornikov. Frequency Selection for FHSS Mode, *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Russia, 2019, pp. 1–4, doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814233.

11. M. P. Lötter and L. P. Linde. DSSS system employing a class of modulatable complex spreading sequences. In: *Transactions of the South African Institute of Electrical Engineers*, vol. 87, no. 1, pp. 1–7, March 1996.

12. Y. Zhang, X. Jia, W. Zhu, J. Zhao and S. Kong. 2018. Chirp Interference Mitigation for FHSS Communication Based on Compressive Sensing. In: *27th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, Hangzhou, China, 2018, pp. 1–2, doi: 10.1109/ICCCN.2018.8487388.

13. Zielinska, E. and K. Szczypiorski. (2011). Direct Sequence Spread Spectrum Steganographic Scheme for IEEE 802.15.4. *Third International*

Conference on Multimedia Information Networking and Security, Shanghai, China, 2011, pp. 586–590, doi: 10.1109/MINES.2011.23.

14. Ngah, R. and Y. Zahedi. 2016. UWB communications: Present and future. IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE), Langkawi, Malaysia, pp. 373–378, doi: 10.1109/APACE.2016.7916463.

15. Yan, W., Z. Jing and Z. Nailong. (2015). The Designing of Indoor Localization System Based on Self-Organized WSN Using Pulson UWB Sensors. 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering, Shanghai, China, 2015, pp. 965–969, doi: 10.1109/ICISCE.2015.218.

16. Krukar, G., M. Wenzel, P. Karbownik, N. Franke and T. von der Grün. (2014). Proof-of-concept real time localization system based on the UWB and the WSN technologies. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Busan, Korea (South), pp. 756-757, doi: 10.1109/IPIN.2014.7275559.

17. Darif, A., D. Aboutajdine, T. Chanyour and R. Saadane. (2012). Exploring mobility of IR-UWB based WSN. IEEE International Conference on Complex Systems (ICCS), Agadir, Morocco, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICoCS.2012.6458580.

18. Musa, A., H. Han, G. D. Nugraha, D. Choi, S. Seo and J. Kim. (2018). A Design of Indoor RTLS by Use of the UWB-WSN based Two Reference Points. 2nd International Conference on Applied Electromagnetic Technology (AEMT), Lombok, Indonesia, pp. 29-33, doi: 10.1109/AEMT.2018.8572411.

19. Du, H. and G. Xu. Infrared indoor wireless MIMO communication system using 1.2GHz OOK modulation. In China Communications, vol. 16, no. 5, pp. 62–69, May 2019, doi: 10.23919/j.cc.2019.05.005.

20. Jouhari, M., K. Ibrahimi, H. Tembine and J. Ben-Othman. (2019). Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things. In: IEEE Access, vol. 7, pp. 96879–96899, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2928876.

21. Ian F. Akyildiz, Erich P. Stuntebeck. (2006). Wireless underground sensor networks: Research challenges, Ad Hoc Networks, Volume 4, Issue 6,

2006, pp. 669–686, ISSN 1570-8705, <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2006.04.003>.

22. Galiotto, Carlo, Nuno K. Pratas, Linda Doyle, Nicola Marchetti. (2017). Effect of LOS/NLOS propagation on 5G ultra-dense networks, Computer Networks, Volume 120, pp. 126-140, ISSN 1389-1286, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.04.012>.

23. Zhou, T. (2013). Signal-to-Noise Ratio. In: Dubitzky, W., Wolkenhauer, O., Cho, KH., Yokota, H. (eds) Encyclopedia of Systems Biology. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9863-7\\_514](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9863-7_514)

24. IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN. In: IEEE Std 802.11ax-2021 (Amendment to IEEE Std 802.11-2020), vol., no., pp. 1-767, 19 May 2021, doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9442429.

25. Enck, John. (1994). Ethernet/802.3 and Token Ring/802.5, Editor(s): Gary R. McClain, Handbook of Networking & Connectivity, Academic Press, pp. 265-295, ISBN 9780124820807, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-482080-7.50014-6>.

26. Sheng-Shih Wang, Chun-Chih Li, Hsieh-Wei Lin, Kuei-Ping Shih. (2015). A passive self-configuration MAC protocol for supporting network management in IEEE 802.11-based multi-hop mobile ad hoc networks, Journal of Network and Computer Applications, Volume 56, pp. 149-157, ISSN 1084-8045, <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2015.05.019>.

27. Achroufene, Achour, Mourad Chelik, Nassima Bouadem, Modified CSMA/CA protocol for real-time data fusion applications based on clustered WSN, Computer Networks, Volume 196, 2021, 108243, ISSN 1389-1286, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108243>.

28. Khan, G. Z., R. Gonzalez, E. -C. Park and X. -W. Wu, (2015). A reliable multicast MAC protocol for Wi-Fi Direct 802.11 networks. European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Paris, France, pp. 224–228, doi: 10.1109/EuCNC.2015.7194073.

29. Youssef, M. A., A. Vasan and R. E. Miller. (2002). Specification and analysis of the DCF and PCF protocols in the 802.11 standard using systems of communicating machines. In: 10th IEEE International Conference on Network Protocols, 2002. Proceedings, Paris, France, pp. 132–141, doi: 10.1109/ICNP.2002.1181394.
30. Farahani, Shahin. (2008). Chapter 2 – ZigBee/IEEE 802.15.4 Networking Examples, Editor(s): Shahin Farahani, ZigBee Wireless Networks and Transceivers, Newnes, 2008, pp. 25-32, ISBN 9780750683937, <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8393-7.00002-9>.
31. Fredriksson, Lars-Berno. (1994). Controller area networks and the protocol can for machine control systems, Mechatronics, Volume 4, Issue 2, pp. 159–172, ISSN 0957-4158, [https://doi.org/10.1016/0957-4158\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0957-4158(94)90041-8).
32. Thapar, Rakesh. (2002). Chapter 15 – Local Area Networks, Fiber Distributed Data Interface, Ethernet, and Token Ring, Editor(s): Casimer DeCusatis, Handbook of Fiber Optic Data Communication (Second Edition), Academic Press, pp. 564-600, ISBN 9780122078910, <https://doi.org/10.1016/B978-012207891-0/50016-8>.
33. Kandris, Dionisis. (2023). Emmanouil Andreas Evangelakos, Dimitrios Rountos, George Tselikis, Eleftherios Anastasiadis, LEACH-based hierarchical energy efficient routing in wireless sensor networks. AEU – International Journal of Electronics and Communications, Volume 169, 2023, 154758, ISSN 1434-8411, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154758>.
34. Yu, X., Li, F., Li, T. et al. (2022). Trust-based secure directed diffusion routing protocol in WSN. J Ambient Intell Human Comput 13, 1405–1417, <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02638-z>
35. Alwi M. Bamhdi. (2020). Efficient dynamic-power AODV routing protocol based on node density, Computer Standards & Interfaces, Volume 70, 103406, ISSN 0920-5489, <https://doi.org/10.1016/j.csi.2019.103406>.
36. Alsafi, Sahar, Samani A. Talab. (2020). Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network, International Journal of Academic Engineering Research (IJAER, ISSN: 2643-9085, Vol. 4, Issue 11, November – 2020, pp. 48–52, [www.ijeaais.org/ijaer](http://www.ijeaais.org/ijaer), 48 Protocol
37. Patel, Vidhi. (2014). SURVEY ON SENSOR PROTOCOL

FOR INFORMATION VIA NEGOTIATION (SPIN) PROTOCOL.  
International Journal of Research in Engineering and Technology. 03.  
208–211. 10.15623/ijret.2014.0303038.

38. Wan, Chieh-Yih et al. (2023). CODA: congestion detection and avoidance in sensor networks. ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems.

39. Iyer, Y. G., S. Gandham and S. Venkatesan. (2005). STCP: a generic transport layer protocol for wireless sensor networks. Proceedings. 14th International Conference on Computer Communications and Networks 2005. ICCCN 2005., San Diego, CA, USA, pp. 449–454, doi: 10.1109/ICCCN.2005.1523908.

40. Wan, Chieh-yih & Campbell, Andrew & Krishnamurthy, Lakshman. (2005). Pump-Slowly, Fetch-Quickly (PSFQ): A reliable transport protocol for sensor networks. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on. 23. 862–872. 10.1109/JSAC.2005.843554.

41. Stann, Fred & Heidemann, John. (2003). RMST: Reliable Data Transport in Sensor Networks. Proceedings of IEEE SNPA. 102–112. 10.1109/SNPA.2003.1203361.

42. Akan O. B. and I. F. Akyildiz. (2005). Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks. In: IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 13, no. 5, pp. 1003–1016, Oct. 2005, doi: 10.1109/TNET.2005.857076.

43. Seung-Jong Park, Ramanuja Vedantham, Raghupathy Sivakumar, and Ian F. Akyildiz. 2008. GARUDA: Achieving Effective Reliability for Downstream Communication in Wireless Sensor Networks. IEEE Transactions on Mobile Computing 7, 2 (February 2008), 214–230. <https://doi.org/10.1109/TMC.2007.70707>

44. Gungor, V. C., Ö. B. Akan and I. F. Akyildiz. 2008. A Real-Time and Reliable Transport (RT)2 Protocol for Wireless Sensor and Actor Networks. In: IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 16, no. 2, pp. 359–370, April 2008, doi: 10.1109/TNET.2007.900413.

45. Herrero, Rolando. 2020. Analysis of the constrained application protocol over quick UDP internet connection transport, Internet of Things, Volume 12, 100328, ISSN 2542-6605, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100328>.

46. Mazur, D. C., R. A. Entzminger, J. A. Kay and C. A. Peterson. 2021. Analysis and Overview of Message Queueing Telemetry Transport (MQTT) as Applied to Forest Products Applications, 2021 IEEE IAS Pulp and Paper Industry Conference (PPIC), Niagara Falls, ON, Canada, pp. 1–7, doi: 10.1109/PPIC47846.2021.9620403.
47. Vinoski, S. 2006. Advanced Message Queuing Protocol. In: IEEE Internet Computing, vol. 10, no. 6, pp. 87–89, Nov.-Dec. 2006, doi: 10.1109/MIC.2006.116.
48. Al-Jaroodi, Jameela, Nader Mohamed. 2012. Service-oriented middleware: A survey Journal of Network and Computer Applications, Volume 35, Issue 1, pp. 211–220, ISSN 1084-8045, <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2011.07.013>.
49. Buchanan, William. 2000. Computer Busses. Butterworth-Heinemann, pp. 301–312, ISBN 9780340740767, <https://doi.org/10.1016/B978-034074076-7/50018-3>.
50. Liao, F.-C & Zhou, Z.-D. (2009). Design of protocol converter based on BACnet and Modbus. 31. 89-91+117. 10.3963/j.issn.1671-4431.2009.23.021.
51. Su, Weilian & Cayirci, E. & Akan, Ozgur. (2004). Communication Protocols for Sensor Networks. 10.1007/978-1-4020-7884-2\_2.
52. Nassra, Ihab, Juan V. Capella. 2023. Data compression techniques in IoT-enabled wireless body sensor networks: A systematic literature review and research trends for QoS improvement, Internet of Things, Volume 23, 2023, 100806. ISSN 2542-6605, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100806>.
53. Coleman, T. P., A. H. Lee, M. Medard and M. Effros. 2006. Low-Complexity Approaches to Slepian–Wolf Near-Lossless Distributed Data Compression. In: IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 8, pp. 3546–3561, Aug. 2006, doi: 10.1109/TIT.2006.878215.
54. Mayekar, P., S. Jha, A. T. Suresh and H. Tyagi. Wyner-Ziv Estimators for Distributed Mean Estimation with Side Information and Optimization. In: IEEE Transactions on Information Theory, doi: 10.1109/TIT.2023.3315719.
55. Alexandrov, A., V. Monov, T. Tashev. 2020. Generalized Nets

Model of Data Parallel Processing in Large Scale Wireless Sensor Networks. Lecture Notes in Computer Science, 11958, Springer, 2020, ISBN:978-3-030-41031-5, ISSN:03029743, DOI:DOI 10.1007/978-3-030-41032-2, 475–483.

56. Alsadik, Bashar. 2019. Chapter 10 – Kalman Filter, Editor(s): Bashar Alsadik, In Computational Geophysics, Adjustment Models in 3D Geomatics and Computational Geophysics, Elsevier, Volume 4, 2019, pp. 299–326, ISBN 978-012-817-588-0, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817588-0.00010-6>.

57. Atanassov, K. 1991. Generalized Nets, World Scientific, Singapore.

58. Sotirov, S., K. Atanasov. 2011. Generalized Nets and supervised neural networks. Sofia: Academic Publishing House Prof. Marin Drinov, ISBN: 978-954-322-623-8.

59. S. Fidanova, S., K. Atanasov, P. Marinov. 2011. Generalized Nets and Ant colony optimization. Sofia: Academic Publishing House Prof. Marin Drinov ISBN: 978-954-322-473-9.

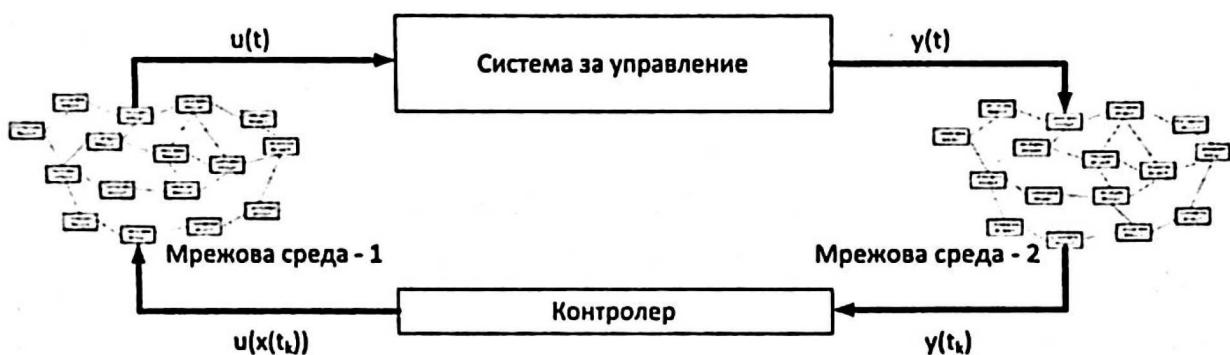
# **ГЛАВА ШЕСТА.**

## **УПРАВЛЕНИЕ И КОНТРОЛ НА БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ ВЪЗЛИ И МРЕЖИ**

### **6.1. Контролни системи на безжични сензорни мрежи**

Изборът на концепция за контрол в WSN е от голямо значение. WSN предоставят огромно количество информация от околната среда чрез редица сензорни механизми. Това доведе разработването на контролни системи за безжични сензорни мрежи WSN-CS (Wireless Sensor Network – Control System), които са в състояние да наблюдават околната среда, да обработват данните, да вземат решения въз основа на наблюденията на сензора и да извършват подходящи действия [1].

Под контролна система за управление на безжични мрежи (WSN-CS) имаме предвид пространствено разпределена система за контрол с обратна връзка, в която сензорните възли на WSN се използват както за събиране на информация от околната среда, така и като комуникационна среда за обмен на сигнали за управление на процеси. Специфичното на една WSN-CS система е, че тя се управлява от микроконтролери, които работят в дискретен режим, тоест могат да получават и изпращат информация само в дискретни моменти от време. Следователно непрекъснатият изходен сигнал от WSN-CS трябва да бъде семплиран, преди да бъде из pratен до контролера. След това контролерът преобразува дискретния (цифров) сигнал в непрекъснат (аналогов) сигнал, преди да го подаде обратно към изпълнителните модули (т. нар. actuators) [2].



*Фиг. 26. Блокова схема на контролна система за управление на WSN( WSN-CS)*

Системата за контрол WSN-CS има статус  $x(t) \in \mathbb{R}^n$ , входен сигнал  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  и изходен сигнал  $y(t) \in \mathbb{R}^p$ .

Тя се управлява от следните уравнения:

$$\frac{dx}{dt}(t) := \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (15)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (16),$$

където A,B,C и D се приемат за известни матрици с подходящи размери.

Означаваме моментите на семплиране, т.е. моментите, когато изходният сигнал  $y(t)$  се измерва, с  $t_k$  и периодът на дискретизация  $h(k)$  се определя от израза  $h(k) = t_{fc} + i - t_k$ .

По този начин, когато параметърът  $y(t_k)$  от изхода на системата пристигне в контролера, контролерът изчислява стойността  $x(t_k)$  и генерира контролен сигнал  $u(x(t_k))$ , който се използва като вход за инсталацията.

Ако приемем, че методът за реконструкция на сигнала е от нулев ред то следователно

$$u(t) = u(t_k), t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (17)$$

### **Предизвикателства за стабилността на системата**

Може да се каже, че WSN-CS е стабилен, ако системното уравнение за извадката е стабилно. При системи тип WSN-CS наличието на безжична комуникация генерира предизвикателства относно стабилността. Съществуват три категории такива предизвикателства и именно:

Закъснение в мрежата, породено от времето необходимо данните да се обменят между устройствата;

Загуби на пакети по време на предаване/приемане поради ненадеждността на предавателния канал;

Необходимост от групово предаване на множество пакети поради малкия размер на пакета.

#### **Предаване на множество пакети**

Поради ограничения на честотната лента и размера на пакета данните с голям обем, подлежащи на изпращане, се разделят на пакети и се изпращат последователно до концентратора на данни. В такива случаи е възможно някои от пакетите да не достигнат до концентратора навреме поради забавяне или загуба на пакети.

##### **6.1.1. Мениджмънт на топологията**

В безжична мрежа с голяма плътност на топологията един възел има много съседни възли, с които директната комуникация би била възможна при използване на достатъчно голяма мощност на предаване.

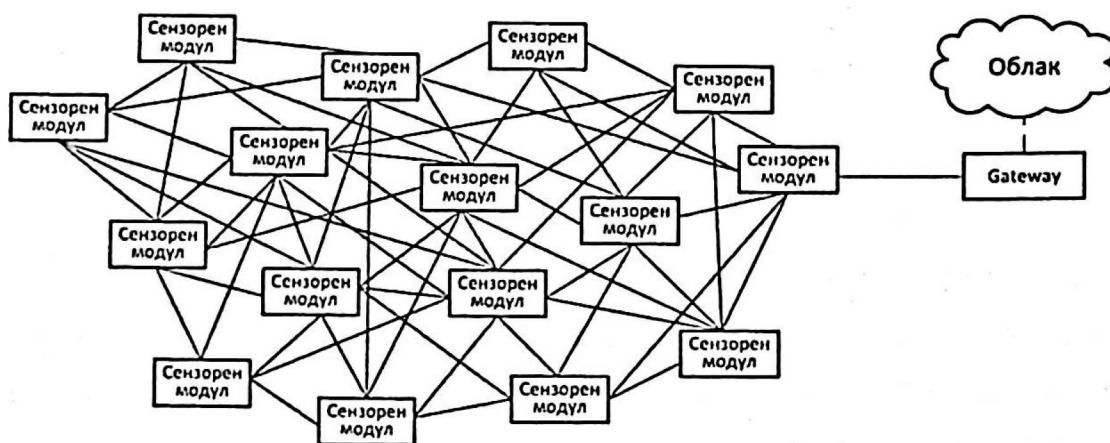
В същото време високата мощност на предаване изисква много енергия, а големият брой комуникиращи помежду си съседни възли усложнява MAC протокола. Допълнителен елемент на нестабилност генерираят протоколите за маршрутизиране на сензорни възли, когато възлите се движат и често образуват или прекъсват много връзки.

За преодоляване на тези проблеми може да се приложи топологичен контрол. Идеята е съзнателно да се ограничи наборът от възли, които се считат за съседи на даден възел. Това може да стане чрез контролиране на мощността на предаване, чрез въвеждане на юерархии в мрежата и оторизация на възли да поемат определени задачи за координация, или чрез просто изключване на някои възли за определено време.

Една може би типична характеристика на безжичните сензорни мрежи е възможността за разгръщане на много възли в малка област, например за да се осигури достатъчно покритие на зона или да има излишък, присъстващ в мрежата, за да се компенсираят възможните повреди на възли.

Въпреки предимствата на разгръщането на плътна мрежа с цел повишаване на надеждността, такъв подход има и недостатъци.

В относително пренаселена сензорна мрежа (фиг. 27) някои параметри се влошават от големия брой съседи: много възли, ползвавщи общ комуникационен канал си пречат един на друг, има много възможни маршрути, възлите може неизвестно да използват голяма мощност на предаване, за да говорят с отдалечени възли директно, и др.



*Фиг. 27. Топология на сензорна мрежа с висока степен на свързаност между възлите*

Някои от тези проблеми могат да бъдат преодолени чрез техники за управление на топологията.

Вместо да се използва свързаността на мрежата в нейната максимална възможна степен, се прави умислен избор за ограничаване на топологията. Топологията на една мрежа се определя от подмножеството от активни възли и набора от активни връзки, по които може да се осъществява директна комуникация.

### **Опции за управление на топологията**

За да се изчисли модификацията на мрежата на база оригинално свързаната сензорна мрежа, алгоритъмът за управление на топологията има няколко опции:

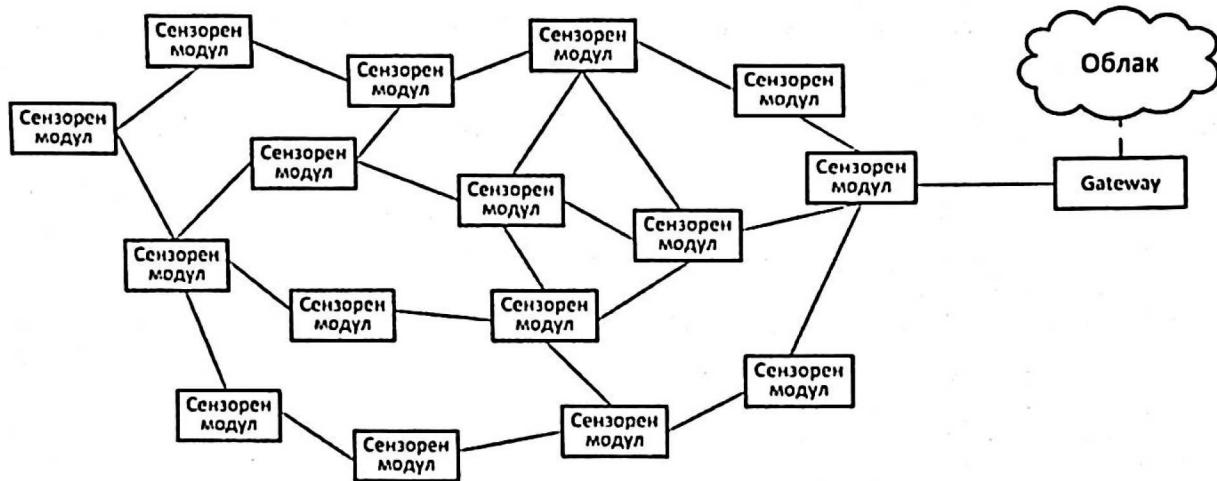
Наборът от активни възли може да бъде намален, например чрез периодично изключване на възли с ниски енергийни резерви и активиране на други възли вместо тях;

Наборът от активни връзки/наборът от съседи за възел може да се контролира, т.е. вместо да се използват всички връзки в мрежата, някои връзки могат да бъдат пренебрегнати и комуникацията да се ограничи до важни връзки.

Когато се проектира плоска мрежова топология (всички възли се считат за равни), наборът от съседи на възел може да бъде намален, като просто не се комуникира с някои съседи. Има няколко възможни подхода за избор на съседи, но един, който е широко използван при WSN, е ограничаване на обхвата на предаванията на възел чрез контрол на мощността и оптимизация на енергийната ефективност чрез комуникация само с близките съседи.

Фигура 28 илюстрира как плътната топология от фиг. 27 може да бъде намалена чрез прилагане на контрол на мощността на база описаният по-горе алгоритъм за управление на топологията.

По същество контролът на мощността се опитва да оптимизира компромиса между по-високата вероятност за намиране на (полезен) приемник при по-високи стойности на мощността, от една страна, и увеличения шанс за сблъсъци/смущения/намалена пространствена повторна употреба, от друга страна.



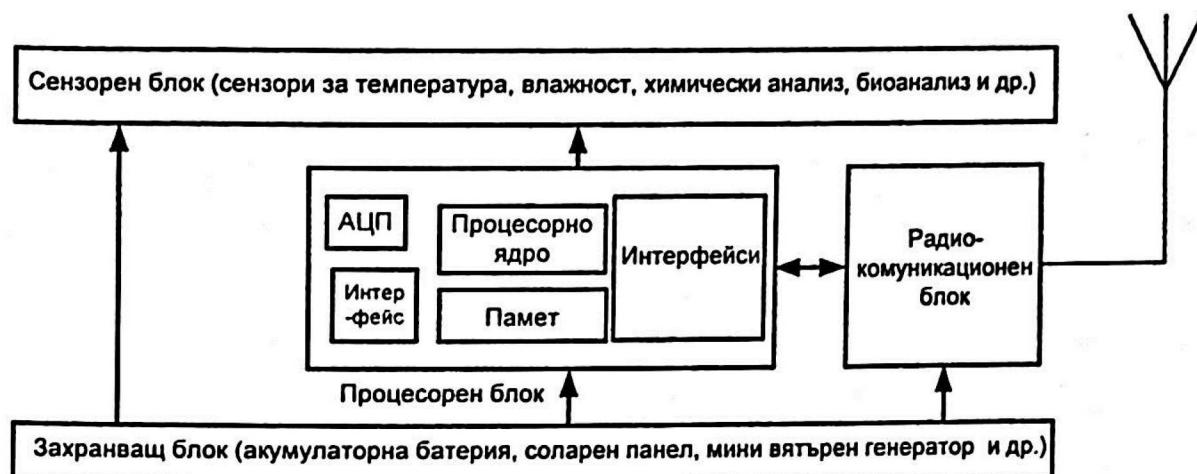
*Фиг. 28. Топология на мрежата след редуциране на изльчваната мощност*

Активните връзки/съседи могат също да бъдат пренаредени в йерархична мрежова топология, където някои възли поемат специални роли, например на опорна мрежа.

Друг вариант е да се раздели мрежата на клъстери. Най-типичната формулировка на проблема е да се формират клъстери с глави на клъстери – представител на клъстер, такъв, че всеки възел да е на дистанция само на един хоп от неговата глава на клъстера.

### 6.1.2. Структура на сензорен възел

Основните функционални блокове на един безжичен сензорен модул се състоят от микроконтролер (състоящ се от процесорен блок с памет и интерфейси за комуникация), сензорен блок, захранващ блок и радиокомуникационен блок.



*Фиг. 29. Блокова схема на безжичен сензорен модул*

### 6.1.3. Структура на кълстер

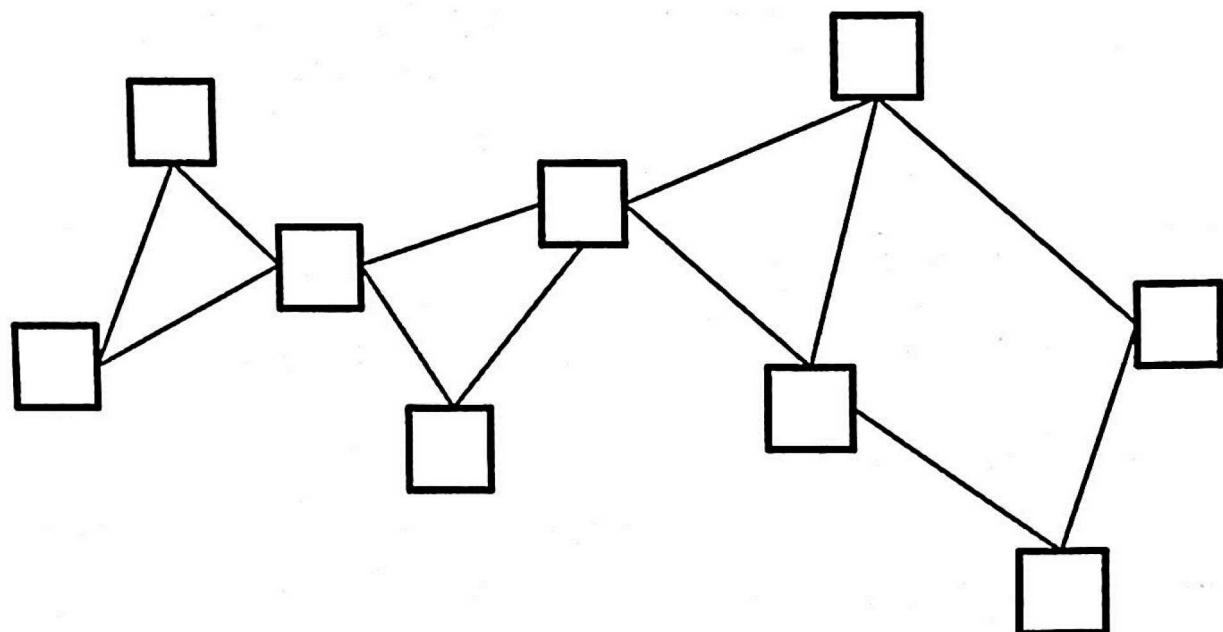
Очакваните предимства на процеса на кълстерилизация са подобни на тези на опорната мрежа, но с допълнителен акцент върху арбитража на местните ресурси (например в MAC протоколите), заставайки по-високите слоеве на динамика в мрежата (това прави таблиците за маршрутизиране по-стабилни, тъй като целият трафик се маршрутизира над главите на кълстерите) и да направи протоколите от по-висок слой по-мащабирани (тъй като размерът и сложността на мрежата, както се вижда от по-високите слоеве, в известен смисъл се намаляват чрез кълстериране).

В допълнение, кълстерите са естествени места за агрегиране и компресиране на трафика, който се събира от много сензори към една станция.

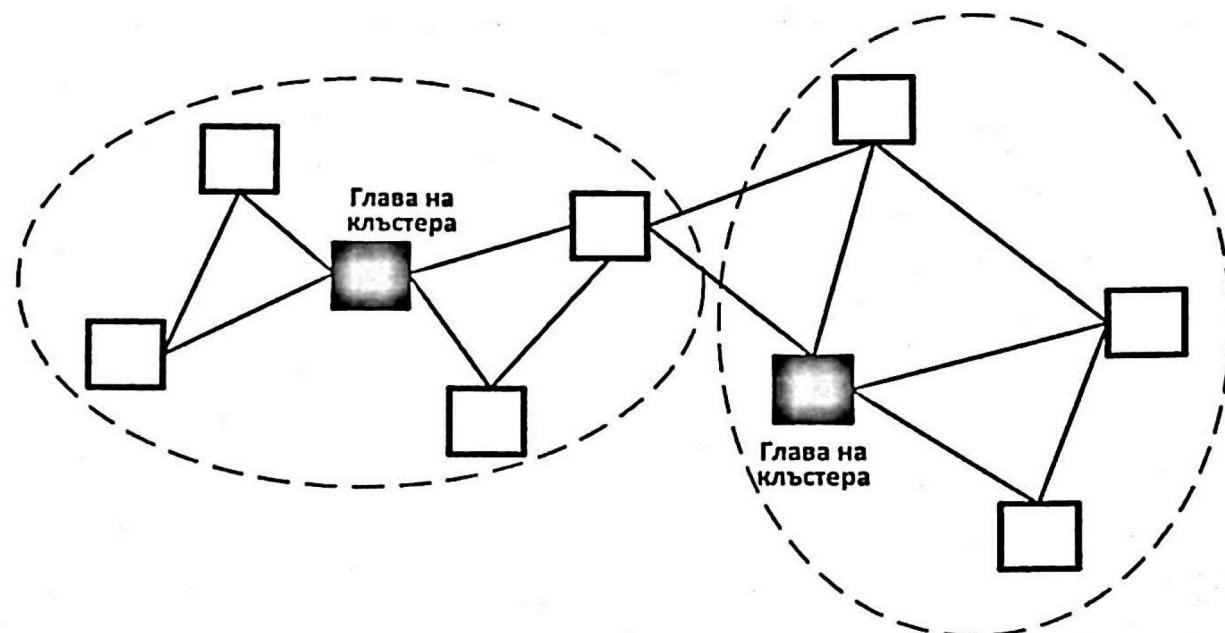
Формално, ако мрежата се представи във вид на граф  $G = (V, E)$ , кълстерирането е просто идентификация на набор от подмножества от възли  $V_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , така че  $\cup J_i = 1, \dots, nV_i = V$ .

Разделянето на групата сензорни модули  $V$  на няколко кълстера не изисква нищо относно вътрешната структура на кълстера – по принцип всички възли могат да бъдат равни.

Обикновено обаче за всеки набор  $V_i$  има уникален възел  $c_i$ , глава на кълстера, който представлява набора и може да поеме различни задачи.



Фиг. 30. Примерен граф с максимално независими връзки



Фиг. 31. Конфигурация на сензорна мрежа след етап на кълстериизация

Приемливо е две глави на кълстера (от два различни

кълстера) да бъдат преки съседи. Често обаче е за предпочтение главите на кълстерите да са разделени.

Независимо дали кълстерите се припокриват или не, възел, който е в непосредствена близост до две глави на кълстера, може естествено да подпомогне комуникацията между два кълстера – той образува шлюз (gateway).

Идеята е, че вътрешнокълстерната комуникация може да бъде маршрутизирана чрез главите на кълстера, които след това използват шлюзовете за всяка междукълстерна комуникация.

Възможно е обаче да има случаи, когато две глави на кълстера са разделени от два възела и нито един възел не може да изпълни задълженията на шлюз.

### **Йерархия на кълстерите**

Сензорните модули иницииращи процеса на кълстерирация се наричат координатори на кълстера (Cluster Head). Тяхната роля е да организират съседните сензорни модули в група и да създадат йерархия от сензорни модули като част от сензорната мрежа. Обикновено йерархия на две нива се счита за достатъчна. Въпреки това е възможно обобщено разглеждане на кълстерите като следващо ниво възли в рамките на една сензорна мрежа.

## **6.2. Протоколи и алгоритми за кълстерирация на сензорни мрежи**

Координаторът на кълстера (Cluster Head) поема допълнителни задачи: организиране на достъп до членовете на кълстера, дефиниране пътя за маршрутизиране, и др. изискващи допълнителна консумация на енергия. Това води до намаляване на капацитета на батерийното захранване на модула.

В една добре структурирана сензорна мрежа всички въз-

ли имат приблизително еднакъв капацитет на батерията във всеки един момент.

Поради тази причина е препоръчително допълнителните задачи да се разпределят между другите възли, членове на кълстера.

Такова споделяне е важна опция, тъй като като цяло процесът оптимизиращ разхода на енергия в сензорната мрежа в общия случай е цикличен. За да може да се осъществи цикълът на преразпределение на ролите на сензорните модули, участващи в кълстер, алгоритъмът за кълстеризация трябва да се изпълнява многократно.

Този цикличен процес може да се осъществява през фиксиран интервал от време или да се инициира при смяна на топологията на сензорната мрежа, което е характерно при мобилните и т.н. *ad-hoc* сензорни мрежи.

Правилният избор на периодите и начина на иницииране на този процес е важен проблем за оптимизацията и е в зависимост от средната скорост на предаване на данни на възела, скоростта на изтощаване на батерията и т.н.

### **6.2.1. Протокол за адаптивна йерархия на кълстерите LEACH**

Пример за цикличен избор на Head Clusters е протоколът за адаптивна йерархия на кълстерите с ниска енергия LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy).

При него целевият сценарий е сензорна мрежа с известен брой възли и дефинирана топология, с концентратор на данни, към който трябва да се изпращат всички данни [3], [4].

Тъй като данните могат да бъдат интегрирани (например чрез осредняване), въвеждането на кълстери е подходяща алтернатива. Тези модули трябва да събират данните от члено-

вете на своя кълстър, да ги обработят и да ги предават директно, с висока мощност на предаване, към приемника на данни в един хоп.

Това е енергоемка операция и за да се защитят Head Clusters с автономно захранване от преждевременно изтощаване на батерията, циклично тази роля се поема от различни сензорни модули, които са членове на кълстъра.

Това е сравнително олекотен протокол за избор и ротация на Head Clusters, като идеята тук е да се използва прост произволен избор на Head Clusters, като се изоставят всички допълнителни разходи за определяне на оптимални Head Clusters, тъй като тяхната роля така или иначе е временна.

Възлите независимо решават да действат като глави на кълстъри и съобщават това на съседните си възли. След това тези възли се присъединяват към тази глава на кълстъра в тяхната близост с минимални разходи за комуникация (ако има повече от един).

Възлите, които не са приели заявка от определен Head Cluster, трябва да комуникират директно с концентратора на данни.

### **6.2.2. Тегловен алгоритъм за кълстъризация WCA**

Алгоритъмът за кълстъризация WCA (Weighted Clustering Algorithm) е един от основните алгоритми за кълстъризация при безжичните сензорни мрежи. Най-широко е разпространението му при т. нар. ad-hoc мобилни сензорни мрежи поради ниските изисквания за изчислителна обработка и добрата производителност.

При него основен критерий за избор на т. нар. глава на кълстъра CH (Cluster Head) е методиката за изчисляване на тегловни коефициенти или рангове.

В общия случай, тегловните коефициенти на модула (или ранговете) са функция на разстоянията между съседни модули изчислени на база сила на изпратения или приет сигнал. Освен това може да има ограничения, наложени от други системни слоеве върху избора на топология; например Bluetooth позволява главата на кълстера (Cluster Head) да организира кълстери от най-много седем члена. При някои архитектури на кълстерирана сензорни мрежи се предвижда дефиниране на максималния брой подчинени модули в рамките на един кълстер.

В ранните версии на този алгоритъм Chatterjee et al. [5] са дефинирани следните ограничения при изчисляване на теглата на сензорните възли:

- един кълстер не трябва да надвишава дефинирания максимален брой възли  $S$ ;
- дефиниран минимален капацитет на батерията (да си глава на кълстер означава повишен разход на енергия, който трябва да бъде балансиран между всички членове на кълстера);
- степен на мобилност (за предпочитане са стационарни или относително слабоподвижни възли);
- максимално разстояние между съседни възли (предпочитат се кълстери с минимални разстояния между членовете).

Формално теглото на възел  $v$  се изразява като

$$W_v = w_1 |d_v - \delta| + w_2^n \left( \sum_{u \in N(v)} dist(v, u) \right) + w_3 S(v) + w_4 T(v) \quad (18),$$

където

$w_i$  са неотрицателни коефициенти на тежест  $i = 1 \dots n$ ,

$N(v)$  са съседите на  $v$  (при максимална мощност),

$S(v)$  е средната скорост на възела  $v$ ,

$T(v)$  е времето, в което възелът  $v$  вече е служил като

Cluster Head (от стартирането на системата).

При този алгоритъм настройката на коефициентите на тежест е определяща за начина на структуриране на даден кълстер.

Интересен аспект на този алгоритъм е, че той при равни други условия, генерира относително бърз цикъл на избор на роля на Head Cluster между няколко възела, и сравнително оптимално споделя натоварването между няколко възела.

### **6.2.3. Адаптивен алгоритъм за кълстеризиация при ad-hoc сензорни мрежи**

Както бе споменато в предходната точка, оригиналният WCA е разработен по идеи, предложени от M.Chatterjee et al. [5], M. Brust et al. [6].

Модификация на този метод е предложена от Alexandrov et al. [7] и включва нова функционалност за кълстеризиране на сензорни възли с приоритет на качеството на връзката (LQ – Link Quality). Предложеният алгоритъм намалява чувствително риска от срив на WSN кълстер-координаторите и помага за енергийно оптимизиране на вградените протоколи за маршрутизиране.

В тази разработка оригиналната версия на WCA е променена и надстроена чрез добавяне на нови параметри и свързани уравнения, отнасящи се до качеството на връзката между сензорните възли.

Предложеният нов подход позволява чувствително по-бърз и енергийно ефективен процес на кълстеризиране на ad hoc сензорни възли.

Методът се основава на следните предварителни допускания:

- всички сензорни възли комуникират само в един радио-канал по време на процеса на кълстериране в режим ad-hock;
- всеки сензорен възел предварително е определил своите координати;
- всеки сензорен възел знае своето енергийно ниво;
- по време на процеса на кълстериране съществува само една глава на кълстера (CH – Cluster Head);
- по време на избора на CH (Cluster Head) всеки сензорен възел може да комуникира директно със съседните си сензорни възли.

Описаните метод и алгоритъм позволяват по-ефективно генериране и управление на кълстери от безжични сензорни ad-hock възли. Основните предимства на този алгоритъм са, че се генерираят кълстери от сензорни възли с приоритет качество на връзките между сензорните възли, а не разстоянието между сензорните възли. Този подход намалява чувствително риска от мрежови сривове, генериирани от случаини пикове от повищено ниво на радиошум.

В конкретния подход за разлика от оригиналния WCA алгоритъм, CH е възелът с най-голям коефициент на тежест. Този подход генерира напълно различна топология на сензорната мрежа – относително малък брой CH глави на кълстера в комбинация с по-голям брой членове на кълстера. В резултат се генерира сензорна мрежа с голяма степен на мащабируемост и повищена надеждност.

### **6.3. Протоколи за синхронизация при безжичните сензорни мрежи**

Енергийната ефективност е критичен проблем в много системи за обмен на данни, особено в автономните системи

за безжичен обмен на информация независимо от естеството им (сензорни мрежи, системи за автоматично управление, актуатори и др.).

Точната и енергийно оптимизирана синхронизация на вградения в сензорния възел таймер е критична за комуникацията при безжичните сензорни мрежи (WSN).

Повечето сензорни възли в WSN са автономни и захранвани от батерии. Поради тази причина те имат ограничен енергиен капацитет и е неефективно постигането на синхронизация между вградените таймери на сензорните модули чрез непрекъснато предаване/приемане и рутиране на синхронизиращи пакети между сензорни възли в рамките на сензорната мрежа. Една от основните причини за отказ на сензорните възли е разреждането или неизправността на батериите.

В същото време периодичната енергийноефективна синхронизация на времето между сензорните модули е проблем, който се нуждае от специално внимание.

Поради измененията на външната среда, в която работят сензорните модули (температура, вибрации, повишена влажност и др.), честотата на кварцовия кристал на вградените в чипсетите на сензорните модули таймери се променя и се нуждае от редовна настройка. Стареенето на кварцовия кристал също оказва влияние върху точността на вградения таймер.

Отклонението на тактовата честота може да причини загуба на синхронизация по време на изпращането на пакети и понякога може да доведе до срив на комуникациите в цялата сензорна мрежа.

### 6.3.1. Стохастични протоколи за синхронизация

Повечето съществуващи протоколи за синхронизация на таймери като LTS (Lightweight Time Synchronization Protocol),

TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Networks), L-SYNC, CHTS (Cluster based Hierarchical Time Synchronization Protocol), PCTS (Passive Cluster Based Clock Synchronization), SLTP (Scalable Lightweight Time Synchronization Protocol) и др., използват стохастични методи, описващи постоянни модели, използвайки фиксирани интервали на синхронизация, и работещи в относително постоянна среда.

Тези протоколи работят много добре за компенсиране на типичния бял радиошум и бавни промени във външната среда. В същото време реалните условия на работа много често включват скокообразно променяща се изключително висока или ниска температура на околната среда, което причинява чувствително отклонение на тактовата честота.

### **Синхронизиращ протокол LTS**

Синхронизиращият протокол LTS (Lightweight Time Synchronization Protocol) използва алгоритъм за обхождане на бинарно дърво за синхронизация по двойки за всеки един от двета възела на клон на дървото [8]. Референтният възел започва процеса на синхронизиране на времето и продължава, докато всички възли не бъдат обходени и синхронизирани. LTS използва алгоритъм BFS (Breadth-First-Search) [9], който има някои проблеми с внедряването в разпределените системи и мрежи.

### **Синхронизиращ протокол TPSN**

Протоколът TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Networks) [10] има две фази. На първата фаза (фаза на откриване на ниво) се създава дърво. Във втората фаза (фазата на синхронизиране) всеки възел се синхронизира с възела в ( $i-1$ ) ниво чрез използване на алгоритъм за синхронизация по двойки по аналогия с LTS.

### **Синхронизиращ протокол L-SYNC**

Протоколът L-SYNC [11] е протокол за синхронизация за безжични сензорни мрежи, който е базиран на кълстериране, осигуряващо ефективност при хомогенни топологии. В L-SYNC се използва алгоритъм за маршрутизиране с цел повишаване на прецизността синхронизиране на два отдалечени възела. Групирането в L-SYNC се извършва на база алгоритми, намаляващи припокриването на кълстери, което води до генериране на маршрут, изискващ по-малко скокове за преминаване от един кълстер към друг отдалечен кълстер.

Въпреки, че L-SYNC предлага по-висока точност в сравнение с други алгоритми и използва техника за прогнозиране, базирана на алгоритъма Convex-Hull, той не поддържа хетерогенни топологии на сензорни мрежи.

### **Синхронизиращ протокол CHTS**

Протоколът CHTS (Cluster based Hierarchical Time Synchronization Protocol) [12] също използва техника за кълстериране, но за разлика от L-SYNC, сензорните възли са в състояние да променят мощността си на излъчване и оттам – радиообхватата.

Мрежата не е задължително да е хомогенна. Някои сензорни възли могат да имат високопроизводителни възможности, а други може да са стандартни сензорни модули с ограничени изчислителни възможности и памет.

В процеса на кълстеризация главите на кълстера се избират само от високопроизводителни възли с достатъчен обем памет.

CHTS има три основни алгоритма – избор на глава на кълстер и генериране на дърво, асоцииране на членове на кълстера към избраното дърво и алгоритъм за синхронизиране на времето. CHTS прави относително голям обем изчисле-

ния, за да избере глави на кълстера и членове на кълстера.

Един от проблемите при реализацията на алгоритъма е, че ако броят на възлите се увеличи след определена граница, броят на конфликтите нараства лавинообразно.

### **Синхронизиращ протокол PCTS**

Протоколът PCTS (Passive Cluster Based Clock Synchronization) [13] използва пасивно групиране и подслушване във фазата на синхронизация във времето. Има две фази. В първата фаза главите на кълстери събират информация за таймера от членовете на своите кълстери. След това се изчислява средната стойност на данните за таймера и изпращат новото изчислено време до таймерите на членовете на техните кълстери за синхронизация.

Някои възли, които са членове на повече от един кълстер, трябва да изчислят средно време на база вградени таймери на всички глави на кълстери, към които принадлежат. Този алгоритъм постоянно изпраща заявки за данни до локалните таймери на възлите в кълстера, което води до енергийна неефективност.

Освен това, по време на своята работа, алгоритъмът изпраща много пакети за синхронизация на времето, което е възможно да генерира колизии, по време на фазата на синхронизация на сензорната мрежа.

### **6.3.2. Адаптивни протоколи за синхронизация**

#### **Синхронизиращ протокол SLTP**

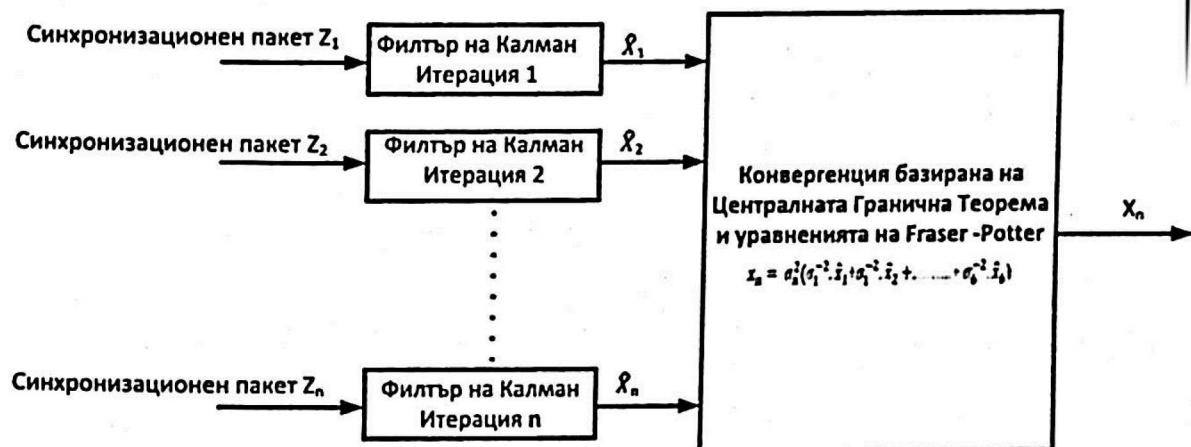
Протоколът SLTP (Scalable Lightweight Time Synchronization Protocol) [14] използва пасивно кълстериране и линейна регресия. Алгоритъмът, внедрен в протокола SLTP, е в състояние да сведе до минимум консумацията на енергия на мрежовите възли, както и да намали разходите за създаване и поддържане на кълстери.

Алгоритъмът на протокола изчислява разликата между

времето на съседните таймери и времевата девиация между таймера на възела и таймера на главата на кълстера, към който принадлежи, за да оцени локалното време на отдалечените възли. По този начин е възможно да се постигнат значителни подобрения в консумацията на енергия на възела, точност и мащабируемост в сравнение с подобни протоколи.

### Адаптивен SLTP

В Alexandrov et al. [15] се предлага подобрен метод, базиран на SLTP, и нов алгоритъм за динамична промяна на интервалите за синхронизация на таймера между възли в хетерогенни WSN, базиран на двустепенна грешка на прогнозиране и оценка, изчислена на база филтър на Калман[9], Централна гранична теорема CLT (Central Limit Theorem) [10] и уравнения на Fraser–Potter [11]. Схемата на метода е показана на фиг. 32.



*Фиг. 32. Имплементация на филтъра на Калман в комбинация с оптимизация базирана на уравненията на Fraser–Potter*

Като цяло уравненията на филтъра на Калман попадат в две категории: уравнения за актуализиране на времето и уравнения за актуализиране на измерването.

Уравненията за актуализиране на времето са отговорни

за прогнозиране (във времето) на текущото състояние и оценките на грешката, за да се получат априорните оценки за следващата времева стъпка.

Фазата на прогнозиране започва с първоначална оценка на  $X_{k-1}$  ковариационен вектор  $P_{k-1}$  и продължава с

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k + Cw_k \quad (19)$$

$$z_k = H_k x_k + D_k v_k \quad (20),$$

където

$\hat{x}_k$  е прогнозната стойност,

$A$  е матрица на преходно състояние на процеса,

$B$  е входна матрица,

$C$  е преходна матрица на състоянието на шума,

$u_k$  е известната входна стойност,

$w_k$  е шумът,

$z_k$  е векторът за наблюдение,

$v_k$  е променлива, описваща шум от наблюдението,

$H_k$  е матрица на наблюдаваната стойност

$D_k$  е матрица, описваща приноса на шума към наблюдението.

Методът използва за основа SLTP (Scalable Lightweight Time-synchronization Protocol) и реализира подобрения, свързани с намаляване на трафика и оптимизиране на консумацията на енергия на сензорния възел.

Основната идея е да се замени съществуващият метод на линейна регресия, използван в SLTP, с метод, базиран на филтъра на Калман, комбиниран с изглаждащ екстремните стойности алгоритъм, използваш уравненията на Fraser–Potter.

Втората голяма разлика е прилагането на алгоритъм за динамична промяна на интервалите на сесиите за синхрони-

зация на таймера в зависимост от външната среда, която генерира отклонения на локалния таймер на възел.

В предложението метод, синхронизацията се извършва само между членовете на кълстера и главата на кълстера и генерира т.нар. кълстерно местно време.

Синхронизацията не се влияе от факта, че възлите могат да се различават по изчислителна способност и радио домейн.

Предложението метод не променя таймерното време на възлите. Всяка девиация на таймера на сензорния възел се адаптира и синхронизира на база таймера на главата на кълстера CH (Cluster Head). Девиацията на таймера на всеки сензорен модул, член на кълстера, ще бъде изчислена по отношение на таймера на главата на кълстера.

За разлика от стандартния SLTP протокол, предложението метод протича в три фази: конфигурация, синхронизация и прогнозиране на следващия период на синхронизация.

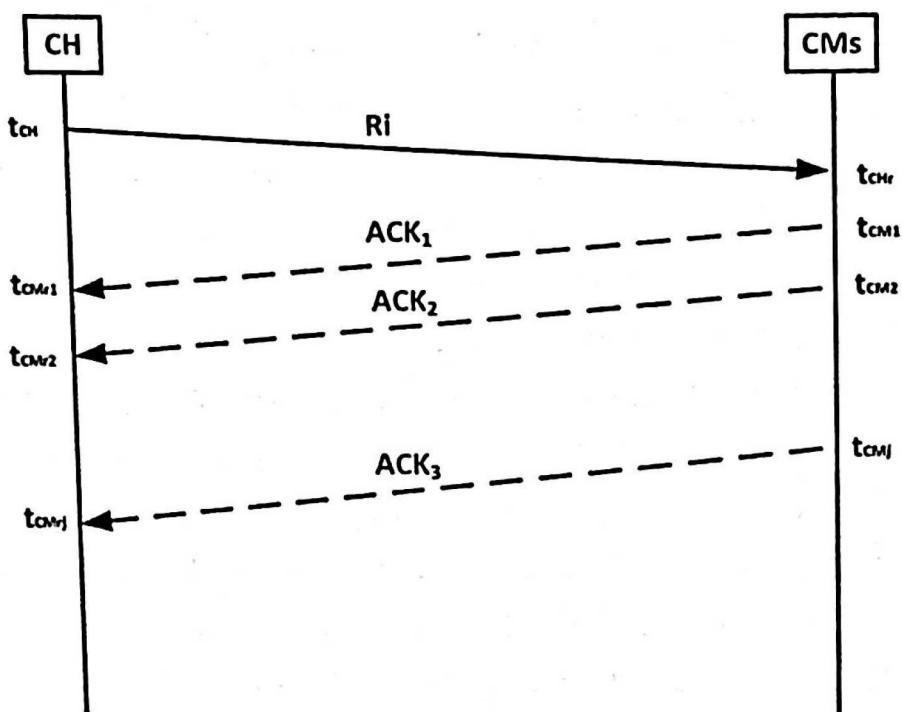
#### **A. Фаза на конфигуриране**

В първата фаза главите на кълстера (CHs) събират информация от членовете на кълстера CM (Cluster Member) в кълстера за локалните настройки на таймерите им.

#### **Б. Фаза на синхронизация на таймера**

Във фазата на синхронизация, базирана на уравненията на филтъра на Калман/Фрейзър–Потър, главите на кълстера изчисляват стойността на оценката и грешката и изпращат пакети за синхронизация обратно към възлите с отклонения извън програмираната граница.

Подробната функция на фазата на синхронизация е описана по-долу.



Фиг. 33. Фаза на синхронизация на таймера

В тази фаза всяка глава на кълъстера започва да излъчва запитване  $t_{CH}$  чрез заявка  $R_i$ .

Главата на кълъстера (CH – Cluster Head) изпраща заявка  $R_i$  и изчаква да получи всички съобщения за локално време на ACK възел от членове на кълъстера (CM – Cluster Members), както е показано на фиг. 33.

Ако член на кълъстера отговори незабавно на главата на кълъстера,  $t_{CH_r}$  ще бъде равен на  $t_{CM1-j}$ .

Член на кълъстера може да отлага неопределено дълго отговора си за сметка на прецизността, която намалява при увеличаване на интервала между  $t_{CH_r}$  и  $t_{CM1-j}$ .

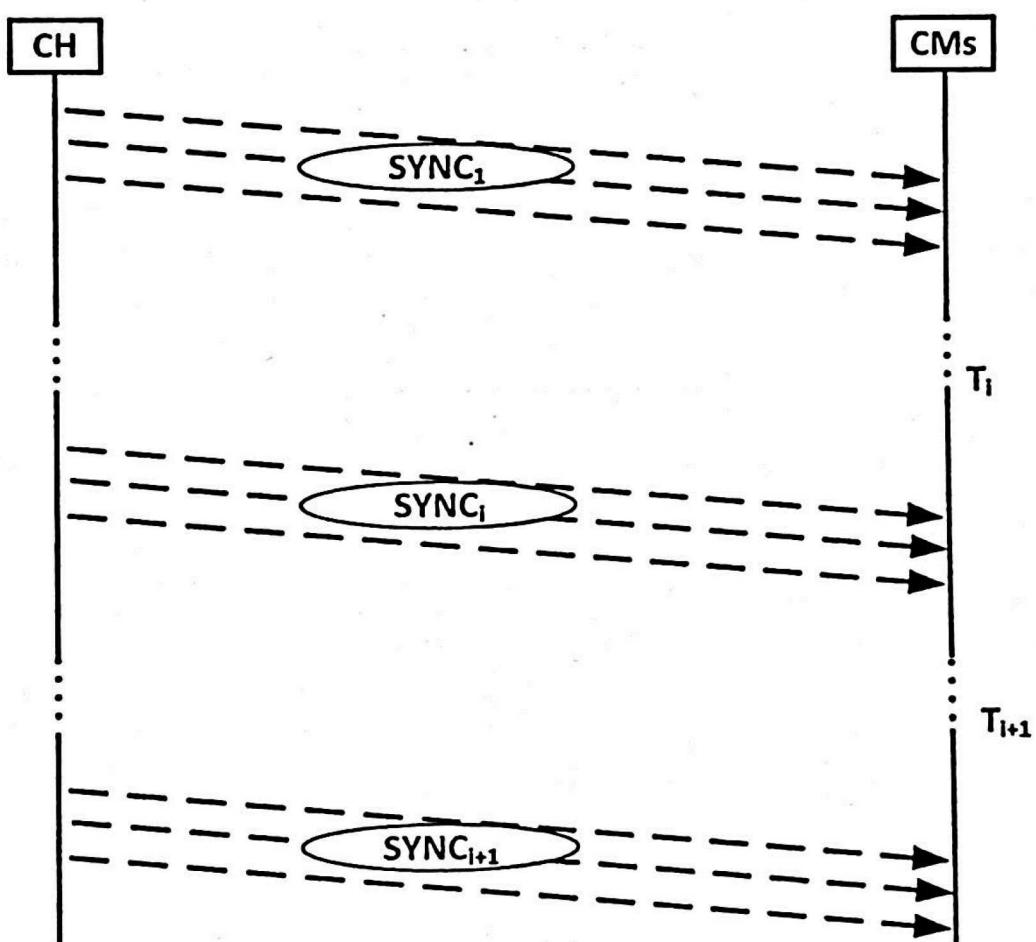
За да се определи  $t_{CH_r}$ , е достатъчно да има минимално забавяне между  $t_{CH_r}$  и  $t_{CM1-j}$ . Минималното закъснение може да бъде оценено от главата на кълъстера (CH) за всеки член на кълъстера (CM) в края на излъчването въз основа на историята на поведението на всеки член на кълъстера.

Главата на кълъстера CH изпраща синхронизационен па-

кет SYNC<sub>j</sub> само до членовете на кълстера (CM), чието отклонение е извън границите.

### С. Фаза на изчисляване на периода на синхронизация

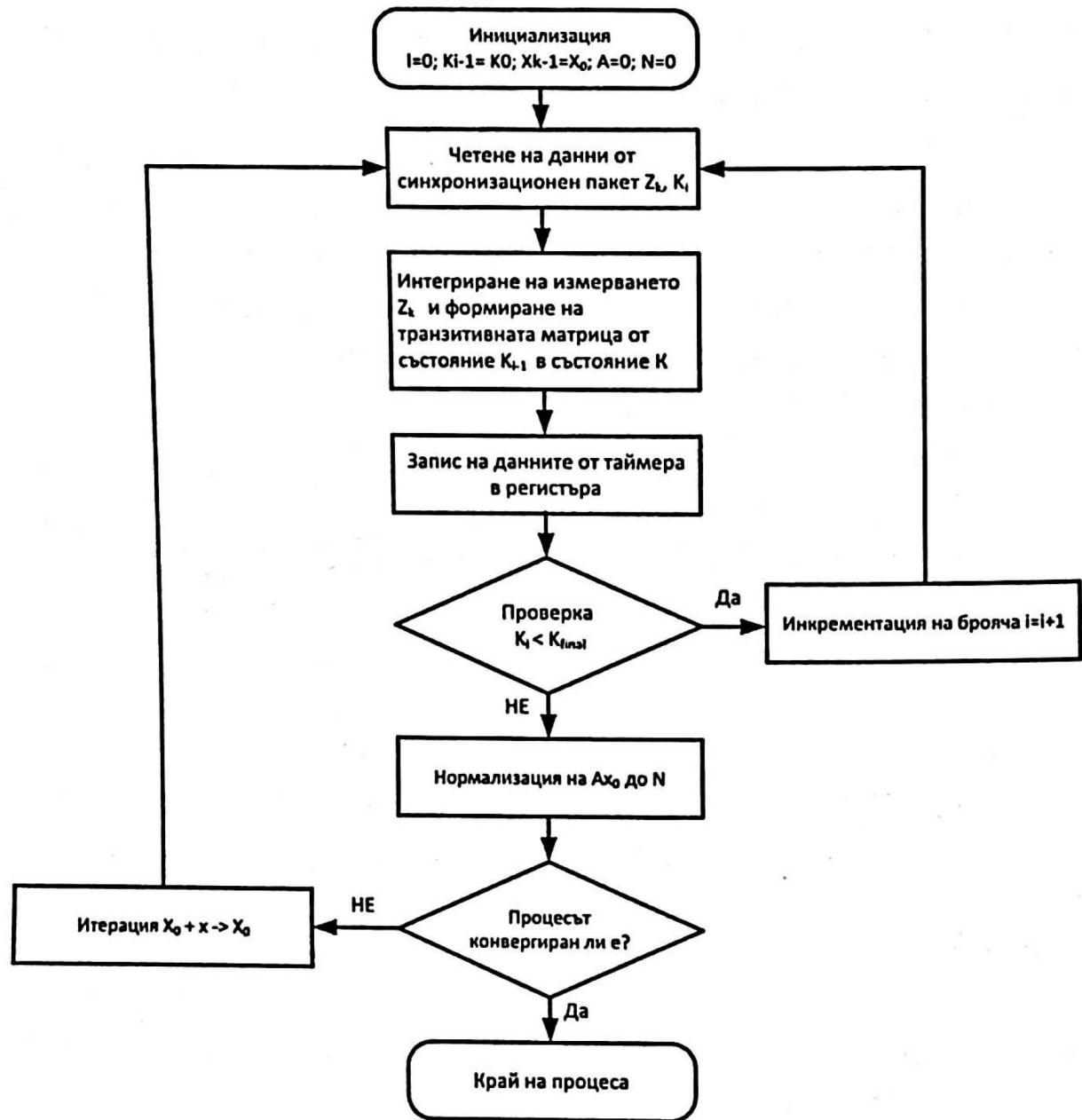
След сесията на синхронизация CH, въз основа на получените в предишната сесия локални времена от членовете на кълстера и измереното ниво на времева девиация, изчислява периода  $T_i$  на следващата фаза на синхронизация.



Фиг. 34. Фаза на изчисляване на периода на синхронизация

### Имплементация на метода

Блок схемата на итерация на база алгоритъма на Калман е показана на фиг. 35.



*Фиг. 35. Блок диаграма на процеса на итерация базиран на филтъра на Калман*

Функционалността на предложния метод е илюстрирана от алгоритъма на фиг. 36, написан в псевдокод.

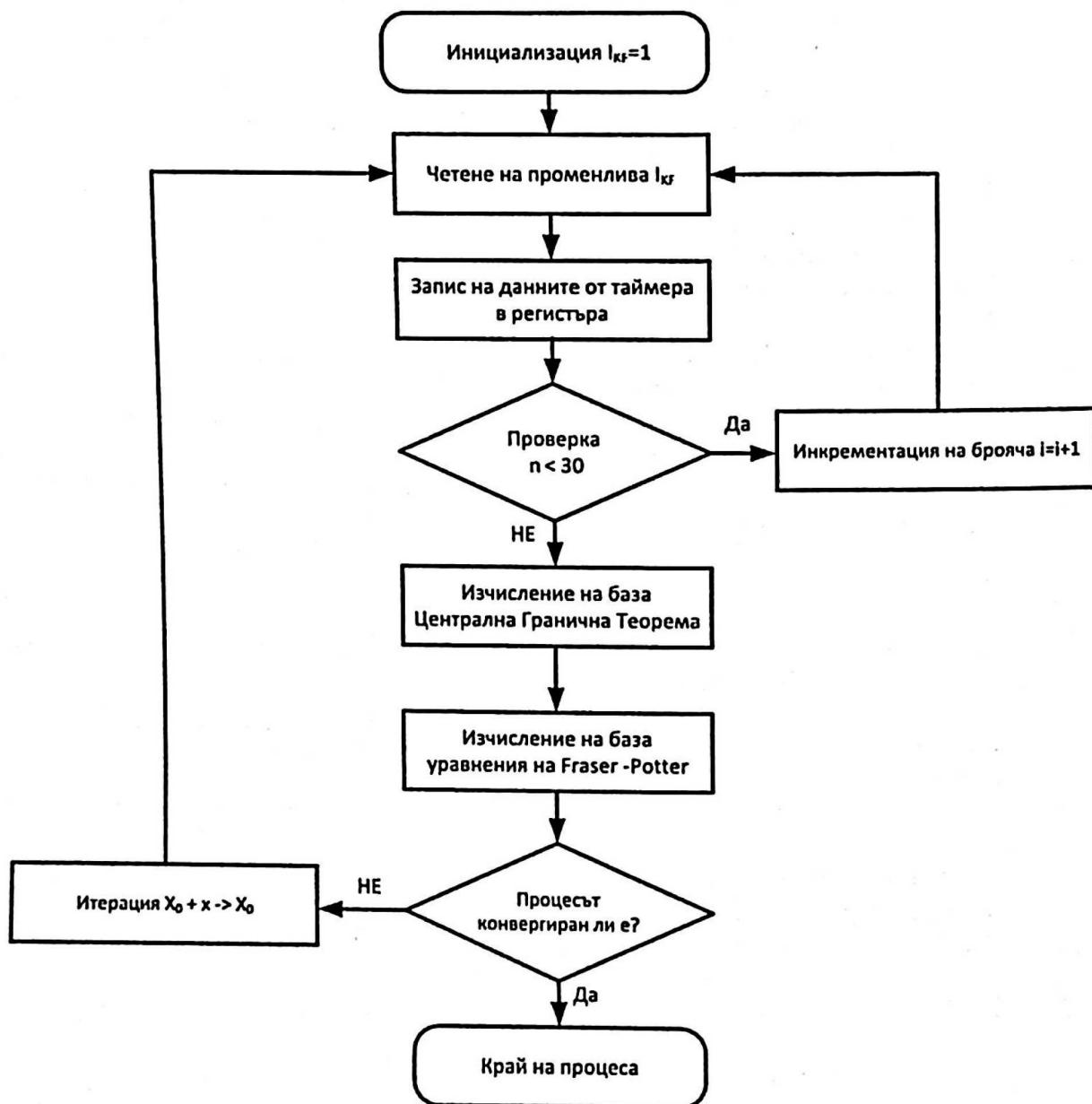
```

Algorithm KF
BEGIN
//Фаза на конфигуриране
if (Topology = heterogenous)then
    { CH           Send Ri packages to the CM nodes;
    }
else
    {Create homogenous sensor node network;
    //Send broadcasting Ri packages to all nodes in the network
    Broadcast (CH_request_time);
    }
while (t1){
// CH receive the nodes local time packages
Collect local time information from CM nodes
}
// изчисляване на KF prediction и estimation стойности за всеки възел;
// Изчисляване на observation vector z(k)
// Изчисляване на estimated value x(k)
// j – брой на възлите в къстера
while (j>0){
    kalmanFilter(j,x,v,u,w);
j--;
end while
}
//Изчисляване на конвергенцията базирана на CLT и Fraser Potter;
// n – брой на CM в къстера
while (n){
fraserPotter(j,x);
end while
}
while (t2){
//Период на фаза за синхронизация = Ti
if (Node_type = CH)then
    //Изпращане на синхронизационни пакети SYNC1-j към CM
{
while(j>0){
    send(CH_local_time);
    send (clock_offset);
    j--;
    end while
}
}
//Изчисляване на нов синхронизационен период за CH
{calculate_Ti(v,w)
}
END

```

Фиг. 36. Имплементация на метода

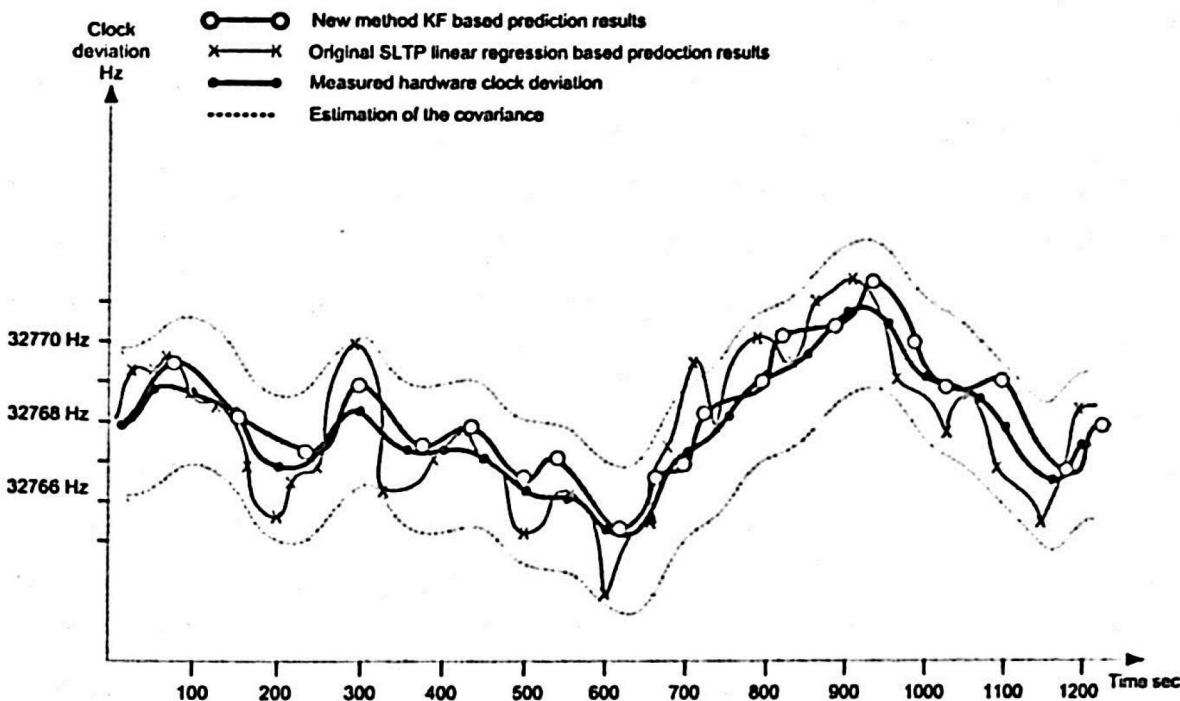
Вторият итерационен алгоритъм, използващ Централна гранична теорема (ЦГТ) и уравнение на Фрейзър–Потър, е представен на фиг. 37.



*Фиг. 37. Итерация на база Централна гранична теорема (ЦГТ) и уравнение на Fraser–Potter*

Резултатите от изследвания в лабораторни условия показват, че предложението от Alexandrov et al.) [8] метод и алгоритъм осигурява по-добри оценки и по-адекватно прогнозиране на

промените в хардуерния таймер, причинени от промените в температурата на околната среда и нивото на шума, в сравнение с линейната регресия, използвана в SLTP протокола.



*Фиг. 38. Резултати от изследвания в лабораторни условия на KF базирания SLTP алгоритъм*

Освен това, в случай на линейна градация на промените в средата или в случаи на колебания на ниско ниво, предлаганият метод и алгоритъм изразходва значително по-ниско количество енергия в сравнение със SLTP.

Съществена новост при този метод и алгоритъм е, че динамично се променя периодът на интервалите за синхронизация на слотовете, които зависят от нивото на отклонението на таймера на WSN кълстерните възли.

Методът значително намалява комуникационния трафик за синхронизация на таймера в хетерогенните WSN и по този начин увеличава срока на работа на включени в WSN сензорни устройства, захранвани от батерии.

## 6.4. Локализация при безжичните сензорни мрежи

### 6.4.1. Локализация и позициониране на сензорни възли

В много случаи е необходимо безжичен сензорен модул като част от сензорна мрежа да има информация за географските си координати и като опция координатите на съседните му сензорни модули, с които комуникира. Алгоритмите и методите за проследяване и/или откриване на събития са полезни, ако WSN не може да предостави информация за координатите на дадено събитие.

По разбираеми причини, ръчното въвеждане на информация за координатите на всеки сензорен модул изисква неоправдано много усилия и време. В същото време, вграждането на приемник на глобална система за позициониране (GPS – Global Positioning System), като част от хардуера на сензорния модул в редица случаи е неефективно поради редица ограничения на техническото решение – GPS системите не работят ефективно зад екраниращи метални прегради, в сгради с железобетонна конструкция и под земята.

Решаването на проблема с намирането на точните координати на всеки сензорен модул като част от безжична сензорна мрежа в режим реално време има редица аспекти, които трябва да бъдат класифицирани, за да се дефинират критериите и опциите за процедурата за местоположение.

Най-важните критерии, които трябва да се разгледат, са:

#### **Физическа позиция**

Възможните опции относно формата на данните за местоположение са:

– местоположение базирано на числови координатни системи (типове WGS, GPS, UTM, UPS и др.);

– местоположение, базирано на репери с известни координати (символно местоположение), като примерно стая 505 на блок 2.

Двете опции са свързани, тъй като е възможно съпоставянето (привързването) физическото местоположение на сензорния модул с един или няколко репера и допълнителна математическа обработка (например по метода на триангуляцията).

### **Абсолютни спрямо относителни координати**

Абсолютната координатна система е валидна за всички обекти и е вградена в някаква обща референтна система. Например формата на местоположението в референтна система Mercator (UTM) позволява еднозначно определяне на местоположението на всяка точка на земната повърхност.

Относителните координати, от друга страна, могат да се различават за всеки разположен обект или набор от обекти – в WSN сензорните модули могат да имат координати, базирани на местоположението на съседни възли. Тези координати определят еднозначно положението на даден сензорен модул спрямо неговите съседи, но нямат връзка с абсолютните координати.

За осигуряване на абсолютни координати са необходими няколко репера (минимум три, ако се използва методът на триангуляцията при х-у базирана координатна двумерна система).

Такива репери могат да бъдат сензорни модули, за които се знаят географските координати, т.е. имат точни координати на база едновременно относителна и абсолютна координатни системи. Чрез използването на реперите като референтни точки е възможно относителната координатна система чрез транслиране да се мащабира към абсолютна координатна система. Този тип репери се срещат в литературата като радиомаяци или „beacons“.

## Локална срещу централизирана обработка на данните

Възможните опции са:

- локална обработка на данните в сензорния модул;
- централизирана обработка на данните от сензорните модули в обособен изчислителен център;
- хибридна обработка на данните.

При локалната обработка на сензорните данни, всички необходими изчисления за местоположението и позицията (ориентацията) на сензорния модул се извършват от микроконтролера на модула.

Предимствата на този вид обработка са автономността на обработката (т.е. координатите на модула могат да се изчислят независимо дали има комуникация с управляващия и контролните центрове на мрежата, повишеното ниво на поверителност – координатите на модула остават конфиденциални поради липсата на комуникация и възможност за подслушване на комуникационните канали.

Недостатъци са нуждата от вграждане на микроконтролер с по-големи изчислителни ресурси и оперативна памет, по-високата цена на модула като хардуер и повишения разход на енергия.

При централизираната обработка на информацията, всички данни се изпращат до обособен изчислителен център – част от сензорната мрежа в който се извършва цялостната обработка на получените данни. След завършване на процеса, готовият резултат се изпраща обратно до сензорния модул. Предимствата на този подход са малките хардуерни изисквания към микроконтролера на сензорния модул, относително по-ниската му цена и консумация на енергия, както и по-прецизното определяне на координатите.

Като недостатъци могат да се посочат, необходимостта от добра двупосочна комуникация, изискването за надеждно рутиране на потока от данни в реално време между сензорния модул и изчислителния център, допълнителното натоварване на комуникационните канали на мрежата.

При хибридната обработка на данните за местоположението на сензорния модул част от обработката се извършва локално в модула, а крайната обработка – в изчислителния център на мрежата. Възможни са различни варианти на разпределената обработка на данните в зависимост от архитектурата, топологията и предназначението на сензорната мрежа.

### **Точност и прецизност**

Двата най-важни показателя за една система за локализация са нейната точност и прецизност.

Точността на позициониране е най-голямото разстояние между изчислената и истинската позиция на обект (високата точност показва малко несъответствие).

Прецизността е съотношението, с което се постига дадена точност, усреднено за много повтарящи се опити за определяне на позиция. Например една система може да претендира, че осигурява 15-санитметрова точност с най-малко 97% прецизност. Очевидно стойностите на точността и прецизността имат смисъл само когато се разглеждат заедно, формирайки характеристиката на точност/прецизност на системата.

### **Мащабируемост**

Мащабируемостта на една сензорна мрежа характеризира нейната способност да се адаптира без съществени промени в хардуер и софтуер при различни изисквания за големина (брой елементи) и площ. Мрежата може да бъде предназначена за различни мащаби, например при разгръщане на закрито в сграда (група от свързани сгради) или при разгръщане в от-

крити площи, паркинг, населено място, държава и др.

Двата основни критерия в този случай са площта, която мрежата може да покрие на единица инфраструктура и броят на локализираните обекти на единица инфраструктура за интервал от време.

### Ограничения

При сензорните мрежи определящ параметър е възможността им за точна локализация на сензорните модули. Този критерий е ключов в процеса на изграждане на архитектурата и топологията на мрежата конфигурируема в режим реално време (ad-hoc). За някои техники за позициониране съществуват присъщи ограничения на внедряването – GPS, например, не работи на закрито и под земята, други системи имат ограничение в режимите на работа и обхватите, в които могат да работят.

#### 6.4.2. Основни подходи при локализация

Най-простата техника е да се ограничи обхватът на безжична комуникация между сензорните модули с цел ограничаване на обсега на обмен на радиосигнали. На тази база може да се определи позицията на сензорен модул въз основа броя на реперите (радиомаяците), намиращи се в неговия обхват.

Въпреки, че този подход предоставя само ориентировъчна информация за местоположението на сензорния модул, в редица случаи това може да бъде напълно достатъчно. Системите, базирани на близост, могат да бъдат доста сложни и дори могат да се използват техники за подобряване на точността, когато сензорен възел може да анализира информация за близостта на няколко припокриващи се по обхват референтни точки.

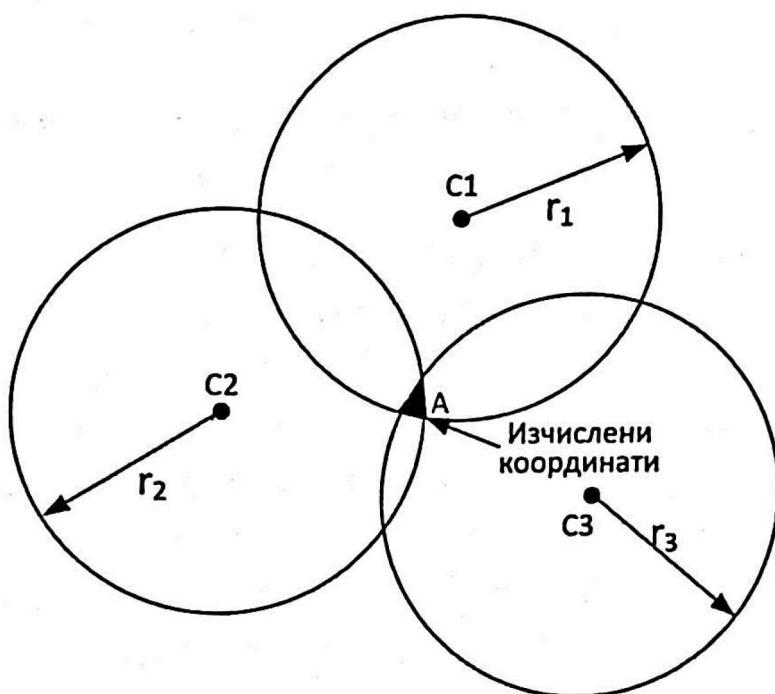
Този вид системи за локализация са стабилни и дават относително коректни резултати решаването дали даден възел е в близост до друг възел е равносилно на вземане на решение за

свързаност, което може да се случи в относително дълъг времеви мащаб, като се усредняват краткосрочните колебания.

### **Локализация чрез трилатерация, мултилатерация или триангулация**

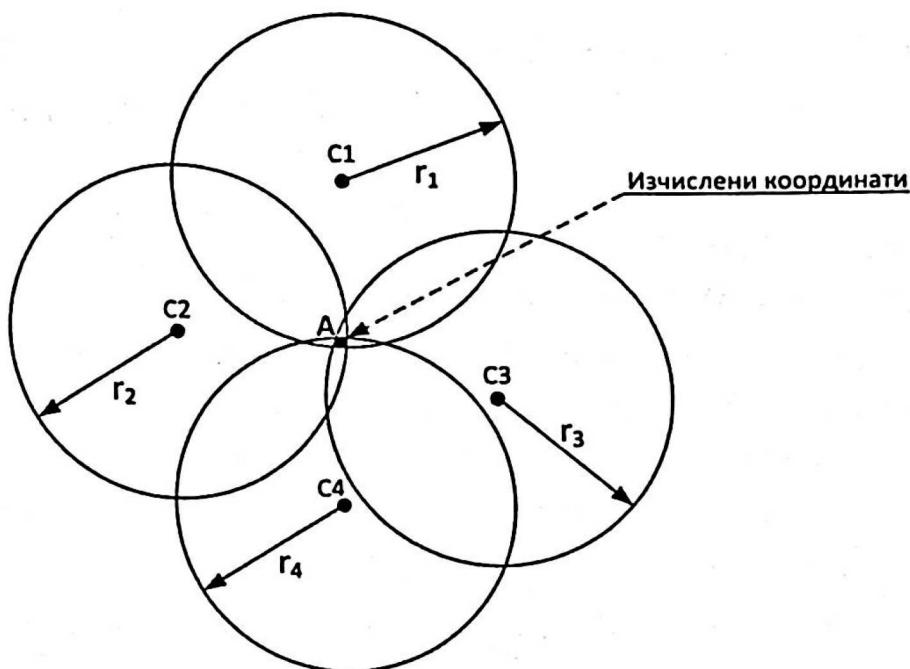
Трилатерацията използва предварително известна позиция на три реперни точки и разстоянието до всяка от тях (принципа на припокриващите се окръжности) [19].

Позицията на т.А спрямо координатите на предварително известни точки C1, C2 и C3 се изчислява на база разстоянията  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  между тези точки и т.А.



*Фиг. 39. Принцип на трилатерацията*

**Мултилатерацията** е разширение на трилатерацията и е метод за подобряване на точността на изчисленото местоположение на база множество (повече от три) реперни точки и разстоянието до всяка от тях (принцип на припокриващите се окръжности).



*Фиг. 40. Принцип на мултилатерацията  
(пример с 4 реперни точки)*

За латерация в равнина елементарният случай е сензорен възел да разполага с данни за разстоянията до три точки с известни координати.

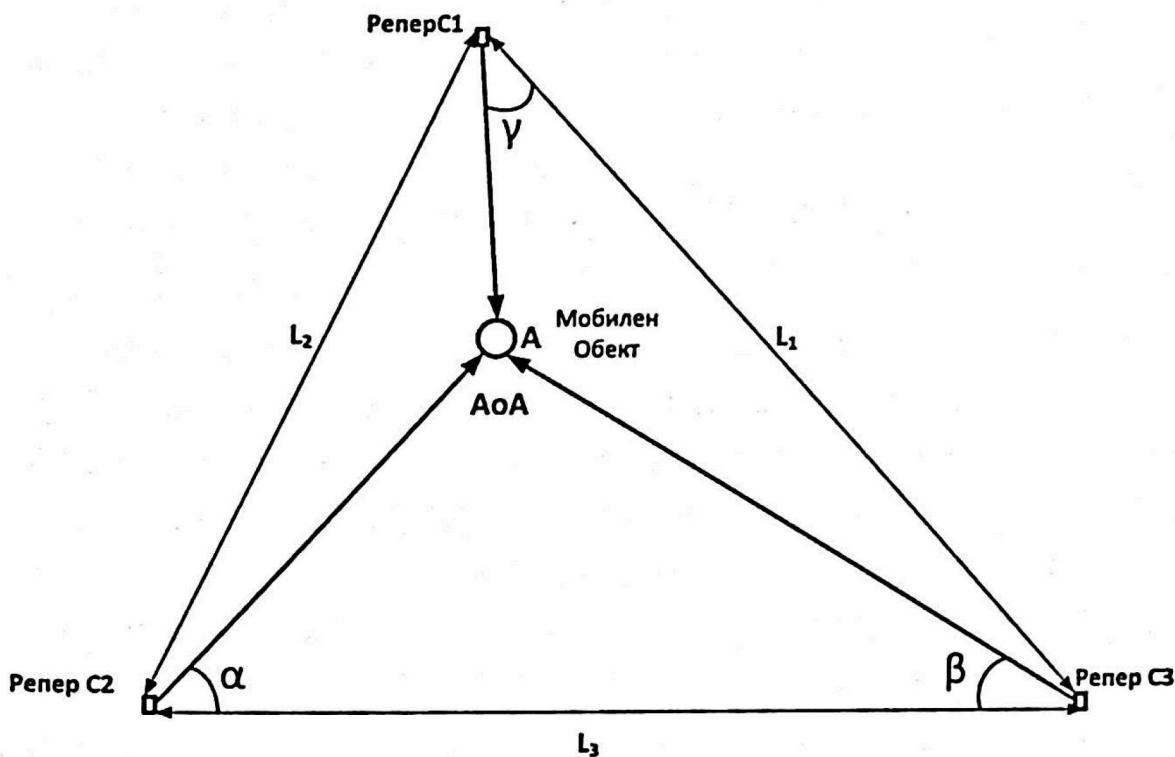
Проблемът тук е, че в действителност измерванията на разстоянието до реперите никога не са абсолютно точни и тези три окръжности е малко вероятно да се пресекат в една точка. За да се преодолеят тези несъвършенства, се измерва разстоянието до повече от три репера с цел повишаване на точността – т.е. прибягваме до мултилатерация.

### Триангулация

Този метод използва базовия принцип в тригонометрията за изчисляване на местоположение на обект въз основа на разстояние  $L$  между две реперни точки и ъгъла между тях [20].

В допълнение, в рамките на процеса на комуникация между два възела е възможно да се извлече информация за тяхната геометрична връзка. Чрез принципите на геометрия-

та, тази информация може да се използва за извличане на информация за позициите на възлите. Когато се използват разстояния между обектите, подходът се нарича латерация (трилатерация или мултилатерация). Когато изчисляването на местоположението е на база измерени ъгли при предварително известни разстояния  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  между реперите  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ , говорим за триангулация.



Фиг. 41. Метод на триангулацията

При използване на метода на триангулация проблемът с неточните измервания възниква и тук и се решава чрез многократни измервания за намаляване на девиацията.

В процеса на безжичната комуникация между сензорни модули е възможно да се изчислят ориентировъчно разстоянието на база измерване на времето между изпратения и приемния радиосигнал.

В съвременните сензорни модули са вградени редица

хардуерни функционалности на базата на които се улесняват изчисленията свързани с местоположението. Най-важните функционалности са индикаторът за сила на получния сигнал (RSSI – Received Signal Strength Indicator), време на пристигане (ToA – Time of Arrival) и времева разлика на пристигане (TDoA – Time Difference Of Arrival).

Освен описаните по-горе базови техники за локализация на сензорни възли на открito в последно време особено внимание се отделя на методите и алгоритмите за локализация в подземни и надземни закрити пространства.

#### **6.4.3. Нови методи за локализация на сензорни възли на закрито**

Позиционирането на закрито се превръща в гореща тема на обществени места, които се използват от голям брой хора. Намирането на хора и активи в сградите стана по-трудно поради сложността и мащаба на съвременното строителство на закрити обществени пространства.

Позиционирането и локализирането на активи в закрити пространства е важно да се прави по няколко причини:

- загубата и/или кражбата на оборудване и активи може да причини сериозни финансови разходи;
- когато е възможно да се изчислява позиция на устройство в закрито пространство в реално време, може да се разработи система, която локализира активите в публичната закрита зона;
- точното определяне на позицията на мобилно устройство (и неговия притежател) в търговски центрове и зони за отдих позволява разработката на нови маркетингови стратегии за увеличаване на продажбите.

Мобилните устройства са чудесна платформа за локализа-

ция на закрито. По различни причини вътрешната локализация с помощта на мобилни устройства все още не е напълно развита поради липса на надеждна технология за позициониране.

Проблемът с локализацията е важен за много инженерни области и се разработва от много години с различен успех.

Много от системите за локализация на открито разчитат в голяма степен на инфраструктура. През 1996 г. Федералната комисия по комуникациите на САЩ (FCC) изисква всички доставчици на безжични услуги да могат да предоставят информация за местоположението на службите за спешна помощ 911.

Клетъчните базови станции вече се използват за определяне на позицията на потребителите. През 1993 г. е разгърната глобалната система за позициониране, базирана на 24 спътника NAVSTAR. Оттогава това се превърна в стандартен начин за локализация, когато може да се използва GPS приемник. За съжаление тази технология е трудно приложима в сгради и закрити пространства.

Поради тази причина интересът към системите за локализация на закрито се увеличава. Системата RADAR може да проследява местоположението на потребителите в сградата и се основава на измервания на база силата (RSS) и посоката на радиочестотния сигнал.

Системата за местоположение Cricket също е проектирана за локализация на закрито, но вместо това използва ултразвук.

На закрито стените значително намаляват прецизността на измерванията на сигнала и практически точни резултати могат да бъдат получени само чрез използването на някаква форма на калибриране.

В областта на разполагане и конфигуриране на ad hoc базирани сензорни мрежи са предложени и внедрени редица системи за локализация.

В [21] се разглеждат правоъгълна мрежа от референтни станции с цел локализация на база RF свързаност. Представеният метод и алгоритъм работят добре, когато има голям процент референтни станции.

### **Метод за локализация на мобилни обекти в закрити обществени зони на база RSS, AoA и филтри на Калман**

Мобилните устройства са широко използвани средства за локализация на закрито. По различни причини локализирането на мобилни устройства в затворени зони все още не е напълно развито поради липсата на надеждна технология за позициониране. Позиционирането на закрито е предизвикателство в обществени зони, които се използват от голям брой хора. Проблемът с локализирането на мобилни устройства в затворени зони и сгради се затруднява поради голямата сложност и мащаб на общественото пространство. В днешно време има много изследвания в областта на внедряването на еволюционни алгоритми и AI невронни мрежи в процеса на локализация [22]. Позиционирането и локализирането на активи в закрити пространства е полезно по няколко причини. Загубата и кражбата на оборудване са големи разходи за бюджета. Когато е възможно да се разполага с реални координати на устройство в реално време, може да се разработи система, която локализира активите през публичната зона.

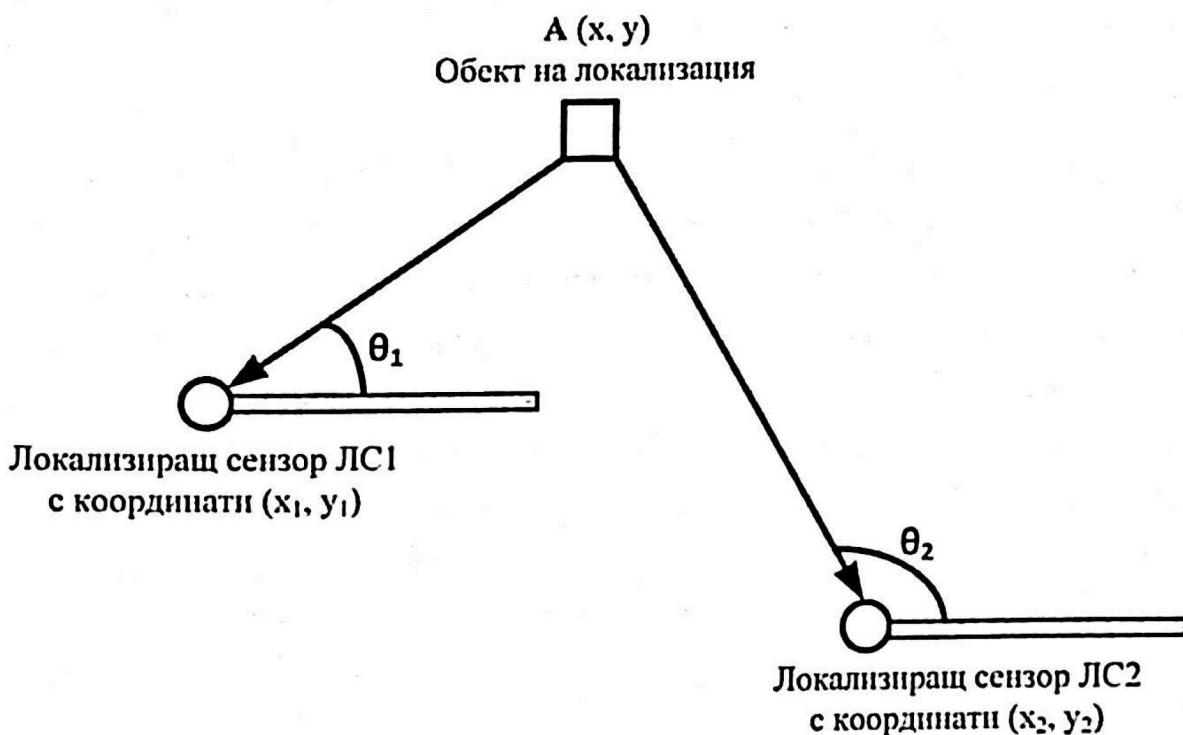
### **Съществуващи решения**

Голям брой решения за локализация като AOA (Angle of Arrival), RSS (Received Signal Strength), ToA (Time of Arrival), TDOA (Time Difference of Arrival) и др. са предложени за постигане на локализация на мобилни устройства чрез измерване на получения радиосигнал между мобилното устройство и сензорния възел за локализиране.

В техниките, базирани на AoA [23], [24], [25], сензорите за локализиране, използващи насочени антени, ориентирани в различни посоки, имат способността да локализират ъгъла на пристигане на радиочестотен (RF) сигнал.

Методът AoA може да фиксира 2-D координатата на мобилно устройство MD (Mobile Device) с две ъглови стойности, измерени от два сензора за локализация LS (Localization Sensor) към MD.

Както е показано на фиг. 42, LC1 и LC2 представляват два локализиращи сензора, чиито координати вече са известни, обект A е мобилното устройство обект на локализация,  $\Theta_1$  е измереният ъгъл между LC1 и обект A, а  $\Theta_2$  е съответно ъгълът между LC2 и обект A.



*Фиг. 42. Локализиране на обект,  
базирано на AoA (Angle of Arrival)*

В този случай имаме:

$$\begin{bmatrix} \tan \theta_1 \\ \tan \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (y - y_1)/(x - x_1) \\ (y - y_2)/(x - x_2) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Решението на горната система уравнения ни дава координатите на обект A:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_2 - y_1 + x_1 \tan \theta_1 - x_2 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \\ \frac{y_2 / \tan \theta_2 - y_1 \tan \theta_1 + x_1 - x_2}{1 / \tan \theta_2 - 1 / \tan \theta_1} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Тъгълът на измерване има девиации, причинени от измерващото оборудване и радиошума в околната среда.

Поради тази причина се прилага многократно измерване на тези параметри и в общия случай се изчислява средната стойност на тези координати.

### RSS метод

Базираните на RSS (Received Signal Strength) техники използват измерване на разстояние на база на затихването на радиосигнала по време на разпространението му от обекта на локализация до приемащата антена на локализиращия сензор [26].

В [27] се предлага емпиричен математически модел за изчисляване на разстоянието според разпространение на сигнала:

$$p(R) = p(R_0) - 10n \log \frac{R}{R_0} - \begin{cases} nW \times WAF & (nW < C) \\ C \times WAF & (nW \geq C) \end{cases} \quad (23),$$

където:

R е разстоянието между локализирания обект A и локализиращия сензор ЛС;

$R_0$  е вече известно разстояние, действащо като референтно;

$p(R)$  и  $p(R_0)$  представляват силата на сигнал, получен съответно при R и  $R_0$ ;

$nW$  е броят на препятствия между обект А и локализиращия сензор ЛС;

WAF е средният коефициент на затихване на стената;

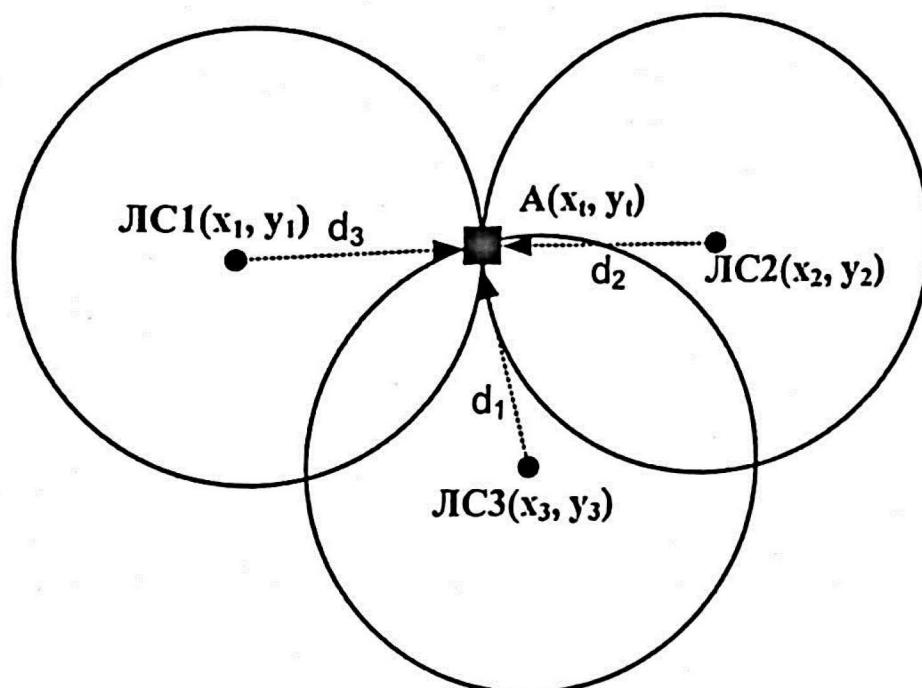
$C$  е максималният брой бариери за затихване между обект А и ЛС;

$\eta$  е коефициентът на затихване на маршрута, който може да бъде емпирично определен.

Въз основа на представената RSS технология са създадени няколко метода за предсказване на координатите на локализирания обект.

### Метод на ТоA

Алгоритъмът за локализиране на ТоA, както е показано на фиг. 43, се основава на уравнението на обиколката на ТоA, чрез различната комбинация от пресичащи се линии между съответните кръгове и генерира различни уравнения за позициониране [28].



Фиг. 43. Метод за локализация ToA (Time of Arrival)

Геометричният модел илюстрира предаването на сигнала от локализирания обект A до локализиращите сензори LC1, LC2 и LC3. Измереното разстояние е  $d_i$ :

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_t)^2 + (y_i - y_t)^2}, i = 1, 2, 3 \quad (24).$$

където:

- ( $x_i, y_i$ ) са координатите на локализиращия сензор LC;
- ( $x_t, y_t$ ) са координатите на локализирания обект A.

В този случай координатите на локализирания обект A могат да се изчислят, чрез пресичане на окръжности с радиус  $d_i$  и центрове координатите на локализиращите сензори.

При наличие на три двойки предварително известни координати на локализиращи сензори (LC1, LC2 и LC3) уравнението за изчисляване на координатите на обект A е от вида:

$$(x_2 - x_1)x_t + (y_2 - y_1)y_t = \frac{1}{2} [(x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2) + (d_1^2 - d_2^2)] \quad (25)$$

$$(x_3 - x_2)x_t + (y_3 - y_2)y_t = \frac{1}{2} [(x_3^2 + y_3^2) - (x_2^2 + y_2^2) + (d_2^2 - d_3^2)] \quad (26)$$

$$x_t = \frac{(y_2 - y_1)D_3 - (y_3 - y_2)D_1}{[(x_3 - x_2)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_3 - y_2)]} \quad (27)$$

$$y_t = \frac{(x_2 - x_1)D_3 - (x_3 - x_2)D_1}{[(y_3 - y_2)(x_2 - x_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_2)]} \quad (28),$$

където:

$$D_1 = \frac{1}{2} [(x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2) + (d_1^2 - d_2^2)] \quad (29)$$

$$D_3 = \frac{1}{2} [(x_3^2 + y_3^2) - (x_2^2 + y_2^2) + (d_2^2 - d_3^2)] \quad (30)$$

### **Разлика във времето на пристигане (TDoA)**

Тази технология [29] използва два различни вида RF сигнали – единият се предава от ЛС и друг от референтна базова станция. Обичайна практика е да се използва еднаква RF честота и сигнали с различна поляризация. Отместването във времето между получените два радиосигнала се използва за изчисляване на позицията на MD. Изчислението се основава на следното уравнение:

$$\frac{R_1}{c_1} - \frac{R_2}{c_2} = t_1 - t_2 \quad (31),$$

където скоростите на разпространение във вакуум са  $c_1 = c_2 = c$ . Скоростта на RF сигналите може да варира в зависимост от средата.

Във формула (31)  $c_1$  представлява скоростта на първия RF сигнал,  $c_2$  е скоростта на втори RF сигнал,  $t_1$  и  $t_2$  са времето за тези два сигнала, пътуващи от локализирания обект A до ЛС и аналогично от обект A до референтната станция,  $R_1$  е разстоянието между обекта A и ЛС и  $R_2$  е разстоянието между обект A и референтната станция.

### **Хибриден метод за локализация на закрито, базиран на RSS и AoA**

Предложеният метод за локализация, публикуван в Alexandrov et al. [30], разчита основно на техниките RSS и AoA като едни от надеждните и нискобюджетни методи за локализация в закрити пространства. В този контекст се използват геометрични подходи за изчисляване на позицията на обекта (мобилно устройство) като пресечна точка на линии, получени от координатите, свързани с позицията.

Тъй като измерванията на радиочестотния сигнал, бази-

рани на RSSI, в реални системи имат отклонение, особено в закрити помещения, се използват техники за подобряване на точността на позиционирането на закрито.

Основните фактори, които намаляват точността на позициониране на мобилното устройство, са:

- разстоянието между сензора за локализация и мобилното устройство на целта;
- нивото на радиочестотния шум и сигналите, отразени от вътрешни стени и метал повърхности на оборудването.

Вторият влияещ фактор може да бъде чувствително намален чрез използване на Bayesian филтриране като филтър на Калман и свързани статистически методи като изглаждане на Фрейзър–Потър.

За внедряването на AoA е използван комплекс от насочени антени тип MIMO (multiple input, multiple output), ориентирани по азимут на различни ъгли с фиксирана височина.

Вместо използването на два различни сензора за локализиране, разположени на различни места за измерване на ъгъла на пристигане, както е показано на фиг. 46, се използва само един сензор за локализация.

Ъгълът на излъчване на получения сигнал може да бъде изчислен, тъй като геометрията и ориентацията в пространството на MIMO антенната решетка е дефинирана. Предложеният принцип на AoA не се нуждае от времева синхронизация между локализиращите сензори.

Ако има нужда от 2D локализация, наличието на само един сензор за локализация е достатъчно, за да се намерят целевите координати. Случаят на 3D локализация се нуждае минимум от два възела за локализиране на сензори за изчисляване на мобилното устройство x, y и z координати.

В настоящото изследване фокусът е само върху 2D локализацията на закрито, както е показано на фиг. 45 и фиг. 46.

### **Описание на метода и базирания на него алгоритъм**

Система за локализация, по дефиниция е система, която може да определи позицията на нещо или някого във физическо пространство непрекъснато и в реално време.

Изчисляването на позицията на закрито е по-сложна задача в сравнение с локализацията на открито (например с помощта на GPS). GPS сигналът има голямо затихване в железобетонни сгради поради силно изразения ефект на затихване и многократно отражение.

Основното предизвикателство за позициониране във вътрешна среда е идентифицирането на основната посока на сигнала поради приемане на отразени сигнали в комбинация с основния сигнал.

Това явление може да повлияе отрицателно на процеса на локализация на сигнала, изпратен от източника към локатора и по този начин на точността на позицията, която се изчислява за този обект. Покритието на RF сигнала на безжичната система не е оптимално във всяка част на сградите поради спецификите на използваните строителни материали (железобетон, метални колони, метални стени и др.).

В основата на предлагания подход е допускането, че всеки човек, подлежащ на локализация, разполага с мобилно комуникационно устройство, излъчващо радиосигнал (мобилен телефон, смартфон, таблет, лаптоп, смарт часовник, радиостанция и др.).

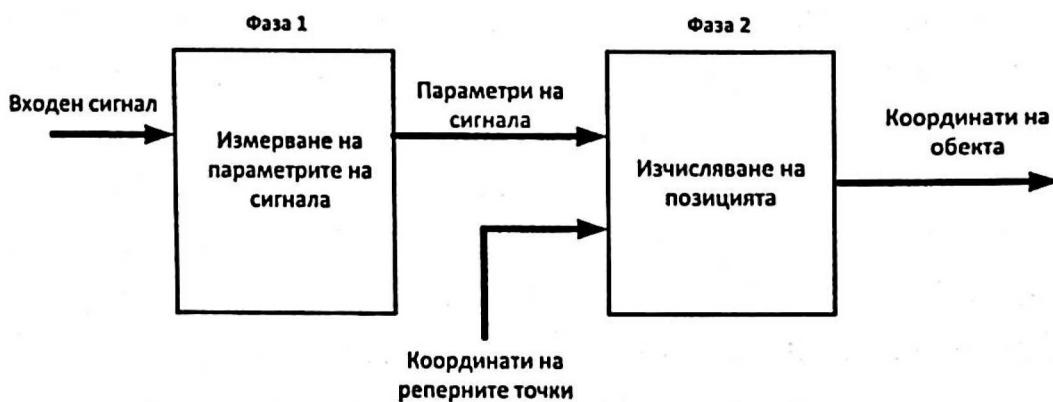
Процедурата за локализация в реално време на закрито се извършва на наколко етапа.

Първо, всеки референтен сензорен възел (с предварително изчислена позиция) изпраща заявка за обхват към съвместими мобилни устройства (с активизирана GSM, Bluetooth, или WiFi комуникация), прикрепени към обекта (т.е. към хората, които трябва да бъдат локализирани). Това устройство може да бъде например GSM телефон или smart устройство,

ползыващо мобилен интернет. На база на тази заявка, базирана на стандарта GSM и комуникационния протокол SS7, мобилното устройство приема сигналите за заявка и изпраща отговор, попадащ в обхвата на референтния сензор.

На следващ етап референтният сензор изчислява времето за предаване между сензора и мобилното устройство. След това сензорът препраща изчисленото време към изчислителен център. Обикновено изчислителният център може да бъде под форма на локална базова станция (BS Base station) или мощна високопроизводителна изчислителна система.

Изчислителният център обработва получените данни, използвайки специализиран алгоритъм за позициониране, за да получи позицията на обекта.



*Фиг. 44. Блокова схема на процеса на RSS/AoA базирана локализация на обект*

За да се получи физическата позиция на обекта, обикновено са необходими два етапа:

- при стартиране на процеса всички свързани с позицията параметри на сигнала, съответстващи на безжичните комуникации между целта и сензора се измерват и калибрират;

- при втория етап се изчислява физическото местоположение на обекта въз основа на тези обработени и изчислени параметри на сигнала.

Както е показано на фиг. 44, целият процес на локализация във втория етап може най-общо да бъде разделен на две основни фази: измерване на сигнала и изчисляване на позицията.

В първата фаза радиосигналите се предават между мобилното устройство (свързано с обекта на локализация) и редица референтни (сензорни) възли намиращи се в неговия обхват. По време на този процес полученият сигнал се анализира, като се изчисляват параметри като сила на получния радиосигнал RSS (Received Signal Strange) и ъгъл на приемане на сигнала AoA (Angle of Arrival).

Във втората фаза физическата позиция на целевия възел се определя въз основа на допълнително обработени и филтрирани параметри на сигнала, получени в първата фаза.

Най-често използваните техники са базирани на цикличен процес на триангулация или мултилатерация, тъй като измерванията на сигнала са в реални условия (наличие на радиошум и индустриални смущение) и точността на локализация е ограничена.

За подобряване на точността се налага допълнителна обработка, базирана на статистически техники за филтриране на шума в процеса на измерване, както и оптимизационни методи за подобряване на точността на резултата.

### **Измерване на параметрите на сигнала**

По отношение на използване на базираните на AoA (Angle of Arrival) техники за ъгъл на пристигане, референтните възли или сензорния модул трябва да имат способността да измерват ъгъла на пристигане въз основа на специализиран хардуер.

Обикновено определянето на посоката може да се осъществи или с насочени антени, или с набор от стандартни антени разположени под различен ъгъл във вид на решетка. Основният принцип зад измерването на AoA чрез антенни решетки се със-

тои в това, че разликите във времената на пристигане на входящия сигнал при различните елементи на антената включват информацията за ъгъла, като се има предвид, че геометрията на масива от антени е известна. Предимството при AoA е, че не се изисква синхронизация на времето между сензорите.

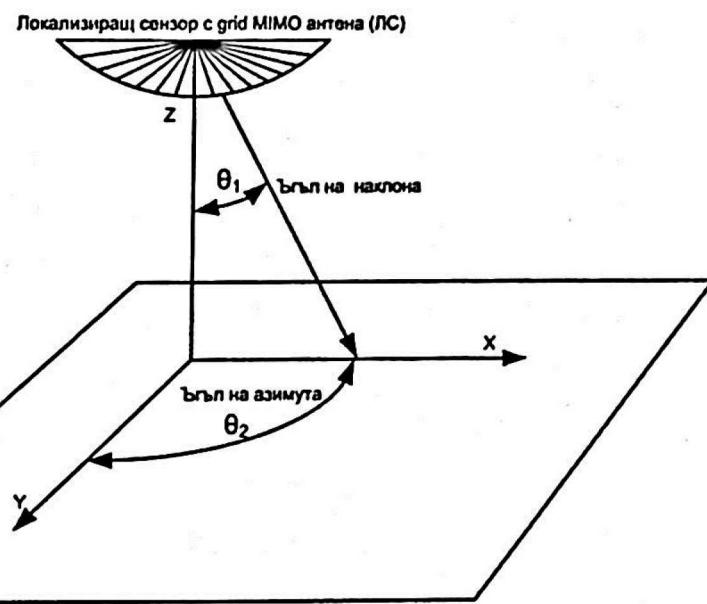
Базираните на AoA техники имат своите ограничения. Тъй като методите, базирани на AoA, са силно чувствителни към отразени сигнали и NLOS, в определени случаи не показват добри резултати при локализация на закрито. С увеличаване на разстоянието между сензорния модул и обекта точността на този тип локализация намалява в геометрична прогресия.

Координатите на позицията, определени чрез използване на AoA метод, базиран на посоката на падане ( $\phi, \theta$ ), могат да бъдат получени чрез използването на комбинация от силно насочени антени и антеннни филтри.

Локаторите тип Quirra например съдържат насочена антена, която е с форма на конус. Ако измерванията се извършват от поне два локатора, позицията може да се определи с достатъчна точност чрез намиране на пресечната точка на приетите от двета локатора сигнали.

В този случай 3D позицията, т.е. x, y и z координати, може да бъде извлечена от измерванията. При режим 2D локализация един локатор, монтиран на определена предварително измерена височина, измерващ посоката на сигнала е достатъчен за относително точно измерване на позицията. Базираната на AoA точност на позициониране се влошава с увеличаване на разстоянието между източника на сигнала и локатора поради нарастващата линейна промяна за всяка разлика в градусите на ъгъла при локатора.

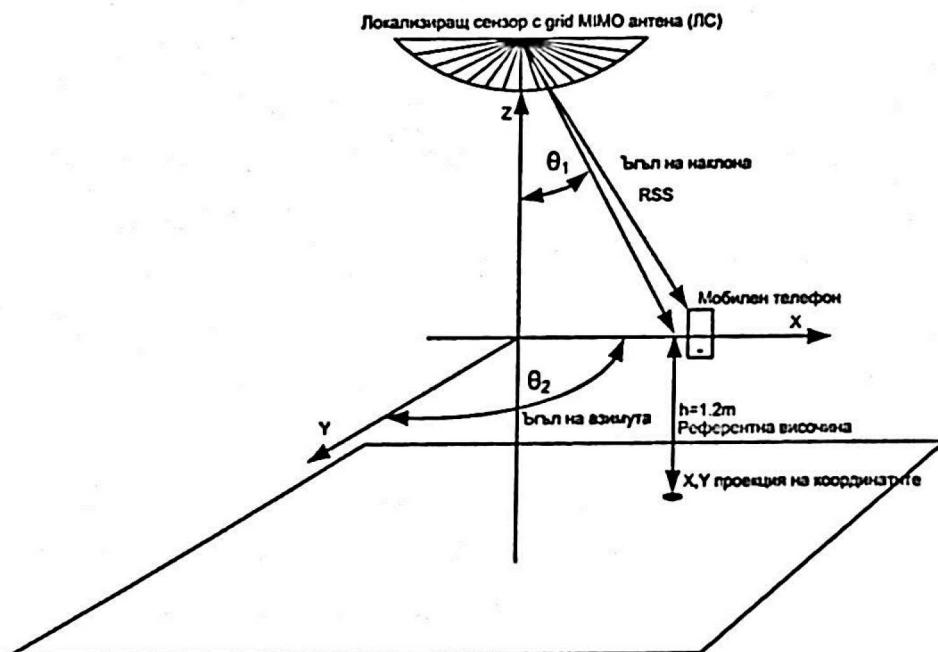
На фигура 45 са показани ъгловите параметри за измерване на позициите.



*Фиг. 45. Изчисляване на позицията по ъглови параметри*

### Изчисляване на позицията в 2D равнина

В процеса на 2D локализация, равнината на проследяване на позициониран обект, е предварително зададена равнина с височина  $H$  за локализация на обекта, който системата е конфигурирана да проследява, както е показано на фиг. 46.



*Фиг. 46. Изчисляване на позиция в 2D равнина*

Когато сензор за локализация открие мобилно устройство, системата може да върне x,y координатите на целта. В конкретната разработка, компонентът на височината ( $h = 1:2m$ ) е фиксиран за всички измервания и за всеки източник се получават x,y координатите и изчисленията се извършват на база фиксираната като параметър височина.

За измерване на позиция в 3D системата се нуждае от поне 2 локатора. За да се оптимизира точността на изчислението на сигнала, не трябва да има препятствия в радиус от поне един метър от локатора. Наличието на препятствие в рамките на това разстояние може да доведе до поява на мъртва зона.

Представеният подход разчита на прецизно определяне на обхвата, използвайки комбинация на насочени решетъчни антени тип MIMO, RSS и техники за измерване на ъгъла на пристигане на сигнала от обекта.

Измерените данни преминават процес на оптимизация, базиран на разширен филтърен подход на Калман и уравнението на Фрейзър–Потър. В този случай всеки референтен сензорен възел (с известна позиция) изпраща заявка за обхват до BLE, WiFi GSM мобилни устройства в района. След това мобилното устройство отговаря на заявката на сензора, което се приема от мрежата от насочени антени, специфични за всеки честотен банд.

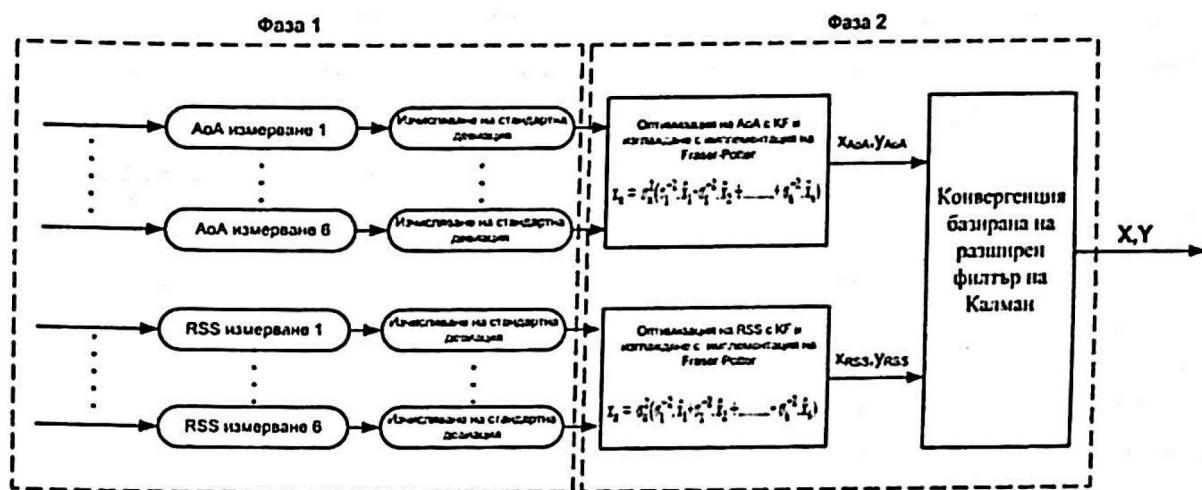
Въз основа на диаграмата на насочване на антената и вграден в приемника RSSI (индикатор за силата на получения сигнал) може да се изчисли азимутът, оценката и силата на получения RF сигнал. След това се изчислява стандартното отклонение на измерените данни и стартира процеса на локална оптимизация, базиран на филтъра на Калман, за последните няколко измервания.

В лабораторни условия е използвана система за локали-

зация с интегриран алгоритъм за обединяване на групи данни с обем, зависещ от капацитета на паметта на процесора. В конкретния случай са програмирани шест последователни измервания с период от 100 ms.

Внедреният алгоритъм на възела обединява резултатите с помощта на филтриране на Калман.

Въз основа на критерий за вземане на решение, показан на фиг. 47 възелът изпраща интегрирани данни от локализационното измерване към контролния център.



*Фиг. 47. Диаграма на метода за хибридна AoA/RSS локализация*

Както е показано на фиг. 47, предложеният процес за локализиране на закрито може да бъде разделен на две основни фази.

Във фаза 1 се извършва измерването на радиочестотния сигнал и изчисляването на позицията на целта. Процесът на измерване започва едновременно чрез два независими канала – AoA и RSS. По време на първата фаза някои от заявките за радиочестотен сигнал се изпращат до мобилното устройство и радиочестотният отговор се получава от един или повече локализационни сензори (LS) с фиксирани координати.

Във фаза 2 процесът на оптимизация на измерените дан-

ни започва с двустепенна оптимизация на филтъра на Калман KF (Kallman Filter). В първо ниво KF-базиран оптимизационен процес се изпълнява поотделно за всеки измервателен канал AoA и RS, съответно. Процесът на локална оптимизация се комбинира с процедура на изглаждане, базирана на уравнения на Фрейзър–Потър (Fraser–Potter)

$$x_n = \sigma_n^2 (\sigma_1^{-2} \hat{x}_1 + \sigma_2^{-2} \hat{x}_2 + \dots + \sigma_6^{-2} \hat{x}_6) \quad (32),$$

където  $\sigma_n^2 = \sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2} + \dots + \sigma_6^{-2}$  е дисперсията на комбинираната оценка а  $x_n$  представлява комбинираното измерване.

В следваща стъпка изчислените и оптимизирани данни от всеки измервателен канал се обединяват и оптимизират на второ ниво от разширен филтър на Калман.

Експерименталните резултати и сравнението между различен брой сензори за локализация, показват, че когато броят на локализиращите сензори се увеличи от 1 на 4, кривата на прецизността на позициониране е стръмна и точността се подобрява съществено.

Последващото увеличаване на броя на локализиращи сензори над тази граница влияе сравнително по-слабо на точността, т.е. наблюдава се плато на кривата.

Въведените в алгоритъма нови елементи – т.нар. филтър за силата на сигнала, филтър за местоположение на потребителя и механизъм за проследяване на пътя, подобряват чувствително точността на позициониране на системата и гарантират добра повторяемост на крайния резултат.

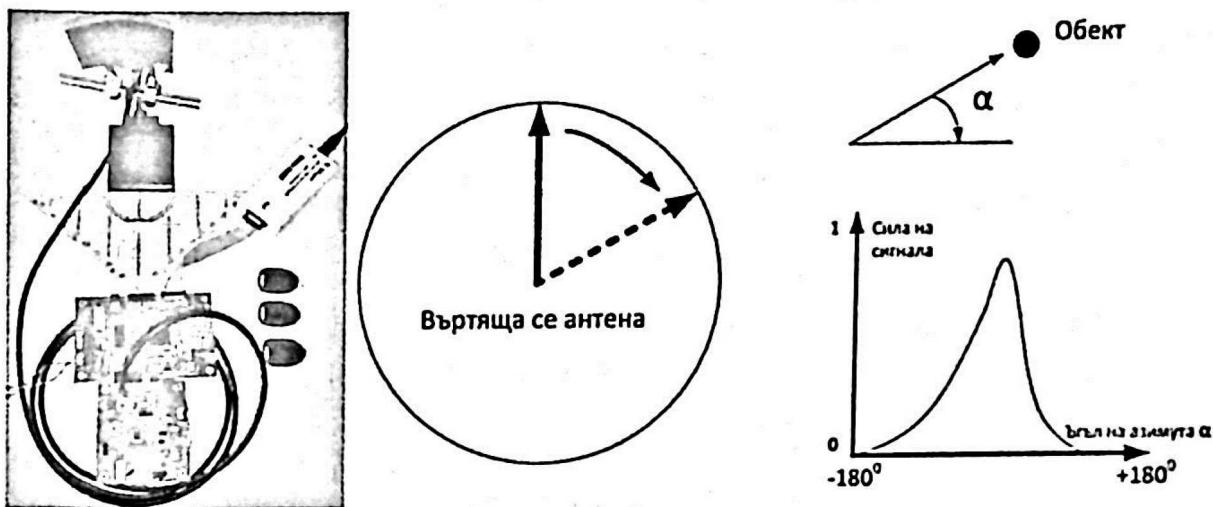
Предлаганата от автора система за вътрешно позициониране, изградена на база предложените по-горе принципи и алгоритми има подобрена прецизност, ниска цена и лесна мащабируемост в сравнение с техниките на AoA публикувани в

[23], [24], [25] придружени с експериментални резултати.

Ключови предимства на този подход са добавеният двуетапен оптимизационен метод за позициониране на закрито, използващ филтър на Калман комбиниран с техниките за централна гранична теорема/уравнение на Фрейзър–Потър, и имплементация на разширен филтър на Калман за втория етап.

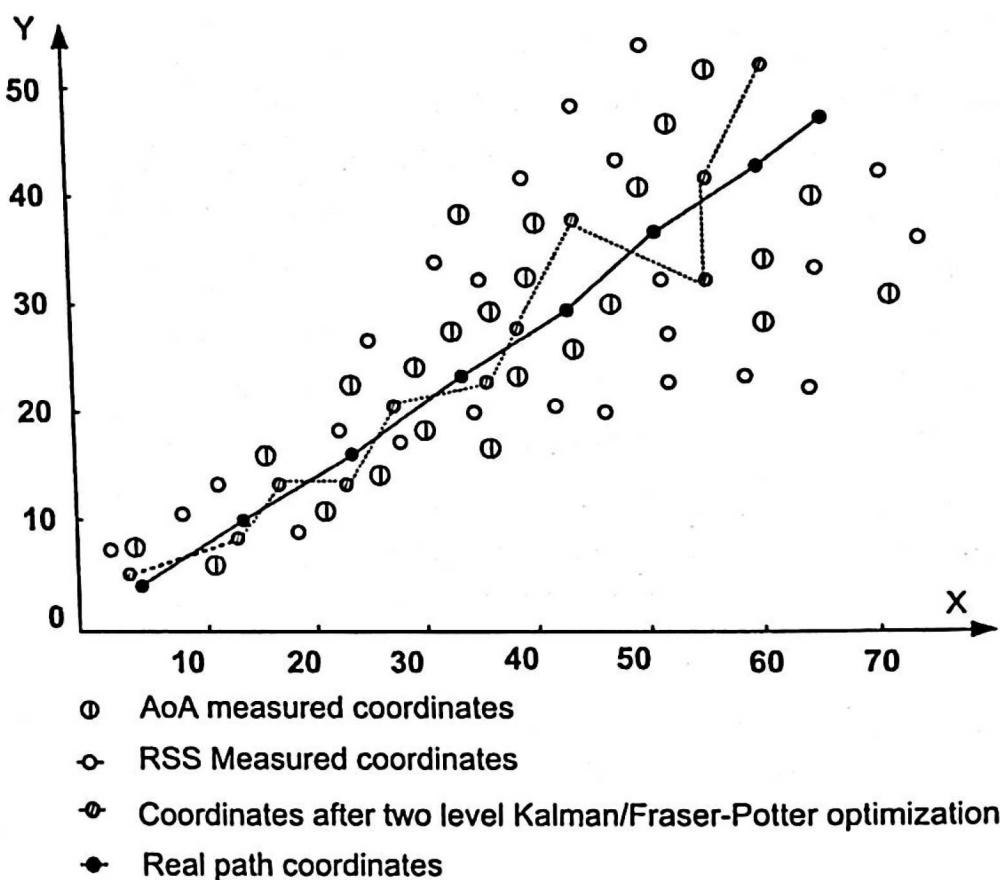
Ефективността на предложния метод е тествана в лабораторни условия чрез експериментална система за локализиране на закрито. Представеният метод позволява да се комбинира информацията от фиксиран брой измервания интегрирани в реално време.

Експериментална локализираща система, използваща въртяща се антена, Qualcomm BLE тагове и мобилен телефон е показана на фиг. 48.



*Фиг. 48. Експериментална система за изследване на алгоритъм RSS/AoA*

Резултатите от теста на експериментална BLE локализация на закрито, показани на диаграмата на фиг. 49, потвърждават, че точността на системата се увеличава чувствително, при двуетапна оптимизация с разширен филтър на Калман.



## 6.5. Оперативна съвместимост при WSN

### Комуникационна оперативна съвместимост (interoperability).

Терминът „оперативна съвместимост“ се дефинира като способността на различни комуникационни системи, мрежи и устройства да работят заедно, да споделят информация и да функционират по координиран начин.

Тази концепция е от решаващо значение в различни сектори, включително реагиране при извънредни ситуации, отбрана, телекомуникации, мониторинг на околната среда и др.

### **6.5.1. Оперативна съвместимост при безжичните сензорни мрежи**

Едно от големите предизвикателства при обмен на данни между безжични сензорни мрежи е тяхната оперативна съвместимост (т.нар. interoperability). Процесът на проектиране на интелигентен сензорен модул, притежаващ високо ниво на оперативна съвместимост в контекста на WSN, може да се моделира на база на стандарти за техническо съответствие или набор от протоколи и глобални стандарти, като стандарт IEEE 1451 (NIST).

Оперативната съвместимост в WSN е насочена към повишаване на ефективността на работа чрез използване на стандартизириани интерфейси, които се конфигурират за специфични комуникационни условия и по този начин WSN е по-оперативно съвместима в зависимост от техническите, синтактични и семантични нива на съответствие за различни сензорни устройства [31],

Особено голямо значение има оперативната съвместимост при хетерогенни сензорни мрежи за изграждане на общ синтаксис и семантика, за да им се позволи да обменят информация точно и сигурно. За да се справят с тези изисквания се създават стандарти за всички слоеве на комуникация при WSN.

### **6.5.2. Нива на оперативна съвместимост при WSN**

Оперативната съвместимост е разделена на три нива за обработка на информация с цел споделяне на метаданни: техническо, синтактично и семантично ниво.

#### **Техническо ниво**

На техническо ниво оперативната съвместимост се фокусира върху прозрачна мрежова свързаност между сензорни

възли, включително установяване на комуникации на ниво физически слой (PHY) и на ниво за контрол на достъпа до средата (MAC). При имплементацията на безжични сензорни мрежи (WSN) един от най-използваните стандарти е IEEE 802.15.4, допускащ използването на различни протоколи за обмен на данни и честотни ленти.

Други стандарти, които могат да се използват за поддръжка на техническа оперативна съвместимост с WSN, включват IEEE 802.15.1 (Bluetooth) и IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.15.4-TG6 (BAN) [32].

В общия случай безжичните сензорни възли използват специфичен PHY и MAC слой за управление на радиопредаванията, за да се поддържа добра производителност при голяма гъстота на разпределение на сензорите в даден район.

При имплементация на WSN, които са ориентирани към споделяне на данни през Интернет, използването на интернет протокол (Internet Protocol – IP) в мрежовия слой е алтернатива за широко разпространените (Personal Area Network – PAN) мрежи. Тези WSN са ориентирани към глобална връзка чрез използване на интернет протокол версия 6 (IPv6), наречен 6LoWPAN, и е ориентиран към малки вградени устройства за работа в Интернет на нещата IoT (Internet of Things).

### **Синтактично ниво**

Синтактичната оперативна съвместимост включва стандартизири формати за съобщения и команди за управление чрез използване на глобални стандарти в мрежовия и приложния слой. В този случай е задължителна обща структура за обмен на съобщения между сензорни възли с главния възел и в двете посоки.

На това ниво оперативната съвместимост може да бъде подобрена чрез т.нар. отворена стандартизация. Отворената

стандартизация е базирана на отворени и публично достъпни стандарти за всички общности, с недискриминационни, без лицензионни такси права на достъп, неутрални от доставчика и съгласувани на база консенсус.

Пример за синтактична оперативна съвместимост е стандартът IEEE1451 [34] относно интелигентни сензори в кабелни или безжични сензорни мрежи.

Стандартизацията на IEEE 1451 включва някои предимства, например включването на общ синтаксис за изпращане и получаване на съобщения с помощта на стандартни команди IEEE 1451.0.

В стандарта IEEE1451 всяка команда е вградена в пакета данни. Стандартът е ориентиран към кабелни или безжични сензорни мрежи с интелигентни сензори и задвижващи механизми.

Някои безжични интерфейси са съвместими със семейството от стандарти IEEE1451 като IEEE 802.15.4 (ZigBee и 6LoWPAN), IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.1 (Bluetooth), (IEEE 1451.5 std1, IEEE 1451.5 std1, IEEE 1451.5 std1, или 2010). Допълнителните предимства на синтактичната отворена оперативна съвместимост са свързани с интегрирането на метаданни чрез избягване на собствени формати на синтактични данни във всяко съобщение.

В някои случаи общият синтаксис в пакета с данни позволява откриване на грешки в превода на метаданни с други сензорни мрежови системи, но в други случаи тази способност не е достатъчна, за да се предаде коректно информацията между хетерогенни системи, които използват различни синтаксиси. В този случай оперативната съвместимост може да бъде ограничена.

За справяне с тези ограничения се използва метод за увеличаване на оперативната съвместимост на WSN чрез импле-

ментиране на семантично ниво, базирано на уеб услуги и обща онтология.

### **Семантично ниво**

Следващият етап на оперативна съвместимост е семантичното ниво, което е отговорно да даде смисъл на информациите, вградена във всяка синтактична структура. Семантичната информация позволява прозрачна комуникация между различни обекти, например сензорни възли, координаторни възли и външни мрежи.

На това ниво управлението на сензорната мрежа следва комуникационна схема за обмен на метаданни, използвайки предварително дефиниран синтаксис и контролирани речници [35].

На практика има компромис между съкратен и общ синтаксис за изпълнение на заявки за метаданни, които транслират информация през множество сензорни мрежи.

Типичните технологии, които се използват за постигане на тази цел, се основават на логически спецификации чрез разработване на общи онтологии за описание на архитектурата на сензорната мрежа и околната среда.

Включването на онтология в семантично ниво позволява да се дефинира и представи сензорната мрежа в специфичен контекст, например с дефиницията на обща онтология, свързана с метеорологичен WSN.

В реалните приложения, онтологиите не са статични и обикновено се развиват от обща база, за да се използват или разширяват от потребителски общности, които преследват обща цел.

### **6.5.3. Оперативна съвместимост между WSN базирани протоколи**

Като правило повечето сензорни мрежи се изграждат на база предварително дефинирани изисквания на приложениета с които ще работят.

Въпреки това независимо от приложението им сензорните възли и сензорните мрежи като цяло се проектират и изграждат на база на определени общи изисквания към комуникационните протоколи.

Оперативната съвместимост е един от водещите фактори при избор на комуникационен протокол. При комуникациите под оперативна съвместимост се разбира свойството на различни комуникационни устройства и системи да работят без проблемно съвместно и да могат лесно да обменят данни помежду си на ниво мрежа и на ниво възел от мрежа.

#### **Оперативна съвместимост при ZigBee протокола**

ZigBee протоколът е основан на комуникацията между възли базирани на стандарта 802.15.4 (т.нар. Layer2 при IP), и дефинира нови слоеве, надграждащи физическия и media access слоеве на 802.15.4.

Това означава, че ZigBee устройствата могат да комуникират само с други ZigBee устройства, и то в случай, че те работят с един и същ профил (подобно на Bluetooth протокола). Обменът на данни между ZigBee базирани мрежи и мрежи, базирани на други протоколи, изисква сравнително сложни устройства (bridge) за конвертиране на формата на данни и нови механизми за маршрутизация. С цел повишаване на оперативната съвместимост се разработва вариант на протокола, наречен ZigBee IP.

### **Оперативна съвместимост при протокола 6LoWPAN**

6LoWPAN осигурява оперативна съвместимост както с устройства, базирани на стандарта 802.15.4, така и с устройства от други IP базирани мрежи (Ethernet или WiFi 802.11). Основното изискване при обмен на данни за IPv6 е MTU (maximum transmit unit) на пакета е да бъде минимум 1280 бита (RFC2460). В същото време при 802.15.4 стандартният пакет е с размер 127 октета (1016 бита), което налага при обмен на данни между сензорни мрежи, използващи други IP протоколи, използване на допълнителен адаптиращ слой, позволяващ предаване на 6LoWPAN дейтаграми в IPv6 и IPv4 базирани мрежи.

### **Оперативна съвместимост при протокола ISA100.11a**

Протоколът ISA100.11a е проектиран да бъде гъвкав и поддържа широка гама индустриални приложения и устройства. Поради стремежа си за гъвкавост и универсалност протоколът има относително сложни механизми за комуникация и управление на пакети.

ISA100.11a допуска създаване на мрежи със специфичен дизайн, които в редица случаи не са съвместими с други мрежи от устройства, работещи под същия протокол, т.е., в редица случаи няма оперативна съвместимост при обмен на данни дори между сензорни мрежи, използващи един и същ базов протокол. Липсват ясно дефинирани правила за комуникационен обмен:

- няма специфицирани временни слотове за обмен на пакети;
- няма координиращ механизъм за ACK потвърждения;
- рутиращите устройства не притежават механизъм за реасемблиране на пакети и др.

SA100.11a не е проектиран и няма предвидени механизми за обмен на данни с други мрежи, работещи под различни комуникационни протоколи на ниво възел или крайно устройство.

### **Оперативна съвместимост при протокола WirelessHART**

Протоколът WirelessHART е базиран на индустриалния протокол HART и е предназначен основно за процесна автоматизация. Протоколът предлага опростени механизми за комуникация и маршрутизация, дефинира относително затворена екосистема и няма предвидени механизми за обмен на данни с устройства от други сензорни мрежи, използващи същата комуникационна среда.

Поради индустриалната си насоченост, изискаща повишена шумоустойчивост и надеждност, протоколът не е предвиден да споделя радиочестотния банд, на който работи с други устройства, и да обменя данни с тях.

### **Оперативна съвместимост при протокола MiWi**

Протоколът MiWi включващ MiWiP2P и MiWi PRO, е частен протокол, разработен от Microchip Corporation, и се поддържа само от хардуерни устройства, базирани на Microchip PIC и dsPIC контролери. Протоколът не предвижда механизми за оперативна съвместимост и разработеният от Microchip ZigBee съвместим transmitter MRF24J40 постепенно губи популярност въпреки редица свои предимства като ниска цена за изграждане на мрежа, опростени механизми за обработка на пакети и маршрутизация и др.

На база на направения анализ може да се направи извода, че на настоящия етап на развитие на 802.15.4 базираните комуникационни протоколи, използвани в интелигентните безжични сензорни мрежи, протоколът 6LoWPAN е един от протоколите, отговарящи в най-голяма степен на изискванията за оперативна съвместимост.

Протоколът ZigBee въпреки широкото си разпространение изиска относително сложни механизми и устройства

(bridges) за конвертиране на пакетите от данни. Този недостатък е минимизиран в усъвършенстваната модификация на този протокол, наречена ZigBee IP.

Протоколите ISA 100.11a, WirelessHART и MiWi имат редица ограничения и могат да се използват основно в сензорни мрежи, където няма изискване за оперативна съвместимост.

### Библиография към Глава шеста:

1. Yury Millan & Vargas, Francisco & Molano Ortiz, Fernando & Mojica-Nava, Eduardo. (2011) A Wireless Networked Control Systems review. 1–6. 10.1109/LARC.2011.6086837.
2. Holger, Karl, Andreas Willig. (2005) Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks, Wiley Telecom, ISBN:9780470095102, DOI:10.1002/0470095121
3. Agarwal, K., K. Agarwal and K. Muruganandam. (2018) Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) Protocol: Simulation and Analysis using MATLAB, 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Greater Noida, India, 2018, pp. 60–64, doi: 10.1109/GUCON.2018.8674988.
4. Handy, M. J., M. Haase and D. Timmermann. (2002) Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network. Stockholm, Sweden, pp. 368–372, doi: 10.1109/MWCN.2002.1045790.
5. Chatterjee, Mainak & Das, Sajal & Turgut, Damla. (2002) WCA: A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks. J. Cluster Comput. 5. 10.1023/A:1013941929408.
6. Brust, M. R., A. Andronache and S. Rothkugel. (2007) WACA: A Hierarchical Weighted Clustering Algorithm Optimized for Mobile Hybrid Networks. Third International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'07), Guadeloupe, French Caribbean, pp. 23–23, doi: 10.1109/ICWMC.2007.93.
7. Alexandrov, A., Monov, V. (2018) Method for Adaptive Node clustering in AD HOC Wireless Sensor Networks. Communications in

Computer and Information Science, 1, Springer, 2018, ISBN: 978-3-319-99446-8, ISSN: 1865-0929, DOI:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-99447-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99447-5_22), pp. 257–263

8. Jana van Greunen and Jan Rabaey. (2003) Lightweight time synchronization for sensor networks. In: Proceedings of the 2nd ACM international conference on Wireless sensor networks and applications (WSNA '03). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 11–19. <https://doi.org/10.1145/941350.941353>

9. Iyanda, Joseph. (2023). Title: A Comparative Analysis of Breadth First Search (BFS) and Depth First Search (DFS) Algorithms.

10. Kulakli A. B. and K. Erciyes. (2008) Time synchronization algorithms based on Timing-sync Protocol in Wireless Sensor Networks. In: 23rd International Symposium on Computer and Information Sciences, Istanbul, Turkey, 2008, pp. 1–5, doi: 10.1109/ISCIS.2008.4717888..M. Jabbarifar, A. Sendi, A. Sadighian, N. Jivan and M. Dagenais, A Reliable and Efficient Time Synchronization Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Network, Wireless Sensor Network, Vol. 2 No. 12, 2010, pp. 910–918. doi: 10.4236/wsn.2010.212109.

11. Jabbarifar, M., A. Sendi, A. Sadighian, N. Jivan and M. Dagenais. (2010) A Reliable and Efficient Time Synchronization Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Network, Wireless Sensor Network, Vol. 2 No. 12, pp. 910–918. doi: 10.4236/wsn.2010.212109.

12. Kim, Hyunhak & Kim, Daeyoung & Yoo, Seong-eun. (2006). Cluster-based hierarchical time synchronization for multi-hop wireless sensor networks. 2. 10.1109/AINA.2006.125.

13. Mamun-Or-Rashid, M., Choong Seon Hong and Chi-Hyung. (2005) In Passive cluster based clock synchronization in sensor network, Advanced Industrial Conference on Telecommunications/Service Assurance with Partial and Intermittent Resources Conference/E-Learning on Telecommunications Workshop (AICT/SAPIR/ELETE'05), Lisbon, Portugal, pp. 340–345, doi: 10.1109/AICT.2005.68.

14. Gelyan, Sepideh & Nasiri Eghbali, Arash & Roustapoor, Laleh & Yahyavi, Amir. (2007) SLTP: Scalable Lightweight Time Synchronization Protocol for Wireless Sensor Network. 4864. 536–547. [10.1007/978-3-540-77024-4\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77024-4_49).

15. Alexandrov, A., Monov, V. (2017) Method for WSN clock synchronization based on optimized SLTP protocol. Proceedings of IEEE 25 Telecommunications Forum “TELFOR 2017”, IEEE Catalog Number: CFP1798P-CDR. ISBN:978-1-5386-3072-3, DOI:10.1109/TELFOR.2017.8249306, 139–142
16. Kapetanovic, Azra, Second-Order Kalman Filtering Application to Fading Channels Supported by Real Data, Department of Electrical and Computer Engineering, Oakland University, Rochester, MI, USA.DOI: 10.4236/jsip.2016.72008
17. Heim, Bernhard & Neuhauser, Markus. (2023) Variations of central limit theorems and Stirling numbers of the first kind. Discrete Mathematics Letters. 12. 54–61. 10.47443/dml.2022.183.
18. Chapter 8 Optimal smoothing,Editor(s): Peter S. Maybeck, Mathematics in Science and Engineering, Elsevier, Volume 141, Part 2, 1982, pp. 1–22, ISSN 0076-5392, ISBN 9780124807020, [https://doi.org/10.1016/S0076-5392\(08\)63221-X](https://doi.org/10.1016/S0076-5392(08)63221-X).
19. Sturgess, B. N., Carey, F. T. (1987). Trilateration. In: Brinker, R.C., Minnick, R. (eds) The Surveying Handbook. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1188-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1188-2_11)
20. Youssef, M. (2017). Indoor Localization. In: Shekhar, S., Xiong, H., Zhou, X. (eds) Encyclopedia of GIS. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17885-1\\_622](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17885-1_622)
21. Davidson, P., & Piché, R. (2016). A survey of selected indoor positioning methods for smart-phones. IEEE Communications Surveys & Tutorials 19(2), 1347–1370.
22. Chen, Z., M. I. AlHajri, M. Wu, N. T. Ali and R. M. Shubair. (2020) A Novel Real-Time Deep Learning Approach for Indoor Localization Based on RF Environment Identification. In: IEEE Sensors Letters, vol. 4, no. 6, pp. 1–4, June 2020, Art no. 7002504, doi: 10.1109/LSENS.2020.2991145.
23. Shao, H., Zhang, X., & Wang, Z. (2014). Efficient Closed-Form algorithms for AOA based Self-Localization of sensor nodes using auxiliary variables. IEEE Transactions on Signal Processing, 62(10), 2580–2594. <https://doi.org/10.1109/tsp.2014.2314064>

24. Tomic, S., Beko, M., & Dinis, R. (2022). RSS-AoA-based Target Localization and Tracking in Wireless Sensor Networks. CRC Press.
25. Chuang, S., Wu, W., & Liu, Y. (2015). High-Resolution AOA estimation for hybrid antenna arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(7), 2955–2968. <https://doi.org/10.1109/tap.2015.2426795>
26. Tomic, S., Beko, M., & Dinis, R. (2015). RSS-Based localization in wireless sensor networks using Convex relaxation: noncooperative and cooperative schemes. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(5), 2037–2050. <https://doi.org/10.1109/tvt.2014.2334397>
27. L. Wang and M. Zawodniok. (2012). RSSI-based localization in cellular networks. *37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks – Workshops*, Clearwater, FL, USA, pp. 820–826, doi: 10.1109/LCNW.2012.6424069.
28. Shen, J., A. F. Molisch, and J. Salmi, Accurate passive location estimation using TOA measurements. (2012). *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 2182–2192.
29. Huang, B., Xie, L., & Yang, Z. (2015). TDOA-Based Source Localization with Distance-Dependent Noises. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(1), 468–480. <https://doi.org/10.1109/twc.2014.2351798>
30. Alexandrov, A., Monov, V. (2019). Method for Indoor Localization of Mobile Devices Based on AoA and Kalman Filtering. In: Georgiev, K., Todorov, M., Georgiev, I. (eds) *Advanced Computing in Industrial Mathematics. BGSIAM 2017. Studies in Computational Intelligence*, vol 793. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-97277-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97277-0_1)
31. Ghosh, R. K. (2017). Data Centric Routing, Interoperability and Fusion in WSN. In: *Wireless Networking and Mobile Data Management*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-3941-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3941-6_9)
32. Higuera, Jorge & Polo, Jose. (2012). Interoperability in Wireless Sensor Networks Based on IEEE 1451 Standard. [10.4018/978-1-4666-0101-7.ch004](https://doi.org/10.4018/978-1-4666-0101-7.ch004).
33. Song, E.Y., Lee, K. B. (2010). IEEE 1451.5 Standard-Based Wireless Sensor Networks. In: Mukhopadhyay, S. C., Leung, H. (eds)

Advances in Wireless Sensors and Sensor Networks. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 64. Springer, Berlin, Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-12707-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12707-6_11)

34. Lee, Kang. (2000). IEEE 1451: A standard in support of smart transducer networking. Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [Cat. No. 00CH37066], Baltimore, MD, USA, vol. 2, pp. 525–528, doi: 10.1109/IMTC.2000.848791.

35. Rezaei, Reza, Thiam Kian Chiew, Sai Peck Lee, Zeinab Shams Aliee. (2014). Interoperability evaluation models: A systematic review, Computers in Industry, Volume 65, Issue 1, pp. 1–23, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.09.001>.

## **РЕЦЕНЗИЯ**

**на монография „Безжични сензорни мрежи и системи:  
Архитектура и комуникационни протоколи“  
с автор д-р инж. Александър Александров**

Представеният за рецензиране труд е в обем от 190 стандартни машинописни страници и включва 49 фигури, 32 формули и 222 библиографски източника. Работата представя задълбочени научни изследвания, съсредоточени изцяло върху проблеми от теорията и практиката на безжичните сензорни мрежи и системи. Съдържа оригинални авторски приноси и като тематична насоченост, обем и качество на проведените изследвания и получени резултати представлява завършен монографичен труд.

В структурно отношение монографията е оформена в Увод и шест глави, свързани в логическа последователност, съответстваща на процеса на цялостно изграждане на безжичните сензорни мрежи и системи. В края на всяка глава са посочени използваните литературни източници. Основните разглеждани теми, техният анализ и предлаганите решения са подробно представени в самостоятелни отделни параграфи, групирани в съответните глави на книгата.

В Глава първа е направено подробно описание на основните принципи и технологии, използвани при разработката и производството на физични, оптични, химични и биоелектрични сензори. Извършен е детайлен анализ на свойствата на всеки един от типовете сензори, областите на приложение, както и перспективите за разработване на нови типове сензори с изпол-

зването на съвременни технологии, включително микроелектромеханични системи (MEMS), квантови технологии, наноструктури и нанотехнологии, плазмонични материали и пр.

На база на знанията за сензорните технологии в Глава втора са представени и анализирани методите и подходите за събиране, съхранение и безжично предаване на данни между сензорни модули и конфигурирането им в свързани групи от сензори под формата на безжични сензорни мрежи (WSN). Специално внимание е обърнато на възможностите за надграждане на мрежата с използване на нови софтуерни технологии и интегриране на IoT устройства и AI до развитието на интелигентни сензорни мрежи (ISN).

Глава трета разглежда и анализира различните мрежови архитектури и топологии, използвани при изграждането на безжичните сензорни мрежи. Подчертано е значението на избора на мрежова архитектура от гледна точка на спецификация на физическите компоненти на мрежата, тяхната функционална организация и конфигурация, нейните оперативни принципи и процедури, както и използваните комуникационни протоколи. В тази част са описани и основните цели на мрежовия дизайн и предизвикателствата при реализацията на безжични сензорни мрежи.

В Глава четвърта авторът е направил задълбочен сравнителен анализ на комуникационните протоколи по стандарта IEEE 802.15.4., които са в основата на безжичните сензорни мрежи. Специално внимание е обърнато на протоколите за каналния, мрежовия и приложния слоеве. Подробно са разгледани въпросите относно тяхната имплементация, предимства и недостатъци. Материалът в тази част на монографията е едно продължение и развитие на предходни авторски резултати, които се съдържат в отделна научна публикация.

В Глава пета са разгледани методи и алгоритми за компресиране на сензорни данни и интегриране на данни от сензорни възли. Процесът на компресиране цели да се намали обемът на предаваните данни, като се запази част или цялото информационно съдържание, докато интегрирането на данни позволява да се намали комуникационният поток и се повиши енергийната ефективност на мрежата. Основен акцент в главата е представеният оригинален авторски метод за симулационно моделиране и математически модел на паралелна обработка на интегрирани сензорни данни в WSN. Предложеният метод използва моделиране, базирано на подхода на обобщените мрежи. Разработеният обобщено-мрежови модел адекватно отразява процеса на паралелната интеграция на сензорни данни в WSN, базиран на протоколи от стандарта IEEE 802.15.4. Авторските резултати от тази глава са публикувани в издание на престижното международно издателство Elsevier.

Глава шеста в голямата си част съдържа авторски разработки. В т. 6.2.3 е представен нов метод и алгоритъм за кълстериране на сензорни възли, базиран на модифициран WCA (Weighted Clustering Algorithm) алгоритъм. Разработката включва допълнителна функционалност за кълстериране на сензорни възли с приоритет на качеството на връзката (Link Quality). Предложеният метод намалява чувствително риска от срив на кълстер-координаторите на мрежата и спомага за енергийно оптимизиране на вградените протоколи за маршрутизиране.

В т. 6.3.2 е представен авторски метод и алгоритъм за динамична промяна на интервалите за синхронизация на таймера между възли в хетерогенни WSN. Методът се базира на двустепенна процедура на прогнозиране и оценка, използва-

ща филтър на Калман, Централна гранична теорема CLT (General Limit Theorem) и уравнения на Фрейзър–Потър. Методът значително намалява комуникационния трафик за синхронизация на таймера в хетерогенните WSN и значително увеличава срока на работа на включени в мрежата сензорни устройства, захранвани от батерии.

В т. 6.4.3 е представен хибриден метод за подобряване на локализацията на закрито чрез използване на WSN базирани сензорни локатори. Методът използва два независими процеса на изчисление на позицията на канала, базирани на техническите RSS (Received Signal Strength) и AoA (Angle of Arrival) съответно. Реализирана е оптимизация на две нива с използването на статистически подход с филтър на Калман и уравнение на Фрейзър–Потър на първо ниво и използване на разширен филтър на Калман на второ ниво. Ефективността на предложения метод е тествана чрез експериментална система за локализиране на закрито. Представеният метод позволява да се комбинира информацията от фиксиран брой измервания и интеграцията на данните в реално време.

Разработените от автора и представени в тази глава методи и алгоритми са публикувани в престижни международни издания.

Актуалността на разглежданата тематика е безспорна, имайки предвид бурното развитие на информационните и комуникационните технологии, разработването на нови материали с разнообразни и уникални свойства, все по-широкото използване на интелигентни устройства и изкуствен интелект, както и широкия обхват на приложение на сензорите и сензорните мрежи практически във всички сфери на социалния и икономическия живот. В този контекст авторът си е поставил високата цел да обхване и изложи в систематичен вид главни-

те компоненти, етапи и проблеми, свързани с разработването на безжичните сензорни мрежи и системи. Цялостното съдържание на книгата, тематичният обхват и начинът на изложение доказват по безспорен начин постигането на тази цел.

Несъмнено достойнство на монографичния труд е детайлното описание и анализ на свойствата и приложението на голямо разнообразие от безжични сензорни устройства, задълбоченото изследване на методите и подходите за изграждане на архитектурата и топологията на безжичните сензорни мрежи, прецизният анализ на съвременните комуникационни стандарти и базираните на тях протоколи от гледна точка на безжичната комуникация.

Заслужава да се отбележи умело подбраният и използвани методически подход при представянето на съдържанието на книгата. Монографията дава ясна представа за съвременното състояние на изследванията и достиженията в областта на сензорните мрежи и системи, очертава актуалните проблеми в тази област и изтъква възможностите и перспективите за използване на интелигентни методи, IoT устройства и изкуствен интелект с цел изграждането и развитието на интелигентни сензорни системи. С оглед на нелекия характер на научната и техническа материя, определено положителна характеристика на работата е премереният и разбираем език на изложението, наред със задълбоченото и съдържателно представяне на материала.

Едно от най-важните достойнства на рецензирания монографичен труд са авторските приноси по изследваните проблеми. В Глава пета е представен оригинален модел и метод за симулационно изследване на процеса на паралелна обработка на интегрирани сензорни данни в WSN. Разработеният модел използва апаратна обобщените мрежи и

адекватно отразява изследвания процес при използването на мрежови протоколи от стандарта IEEE 802.15.4. В Глава шеста са представени разработени от автора методи и алгоритми за кълстериране на сензорни възли в WSN, за динамична промяна на интервалите за синхронизация на таймера между възли в хетерогенни WSN, както и хибриден метод за подобряване на локализацията на обекти на закрито чрез използване на WSN базирани сензорни локатори. Тези авторски резултати са публикувани и цитирани от наши и чуждестранни учени, с което са станали достояние и получили признание от научната общност.

Рецензирианият монографичен труд е адресиран до широка аудитория от читатели в областта на техниката и техническите науки. Със своя разбираем и в същото време съдържателен и задълбочен стил на изложение той може да бъде полезен за студенти от горните курсове, обучаващи се в дисциплините по комуникации и комуникационни системи, за преподаватели при изготвянето на лекционни курсове, както и за професионалисти, работещи по изграждането и внедряването на безжични сензорни мрежи и системи.

Авторът е защитил докторска дисертация, посветена на разработването на методи и алгоритми за интегриране на данни от интелигентни сензорни системи, има многогодишен опит, трайни интереси и значими резултати в областта на сензорите и сензорните мрежи, които са представени в редица негови научни публикации. Настоящият монографичен труд обобщава резултатите от предходната му научноизследователска дейност и е едно логично и несъмнено успешно продължение и развитие на тези резултати.

В заключение убедено може да се направи изводът, че монографията „Безжични сензорни мрежи и системи. Архи-

тектура и комуникационни протоколи“ с автор д-р инж. Александър Александров представлява едно сериозно и задълбочено научно изследване, което неминуемо ще допринесе за разширяване и обогатяване на съществуващата у нас литература в областта на комуникациите, комуникационните мрежи и системи.

**Проф. д-р Владимир Монов**  
Институт по информационни  
и комуникационни технологии,  
Българска академия на науките

## **РЕЦЕНЗИЯ**

**на монография**

**„Безжични сензорни мрежи и системи:  
Архитектура и комуникационни протоколи“  
с автор д-р инж. Александър Александров**

Представената за рецензиране монография е в обем от 190 стандартни машинописни страници. Научният труд съдържа 49 фигури, 32 формули и общо 222 библиографски източника.

Темата на монографията се отнася до проблеми от теорията и практиката на безжичните сензорни мрежи и по-специално тяхната архитектура и свързаните с нея комуникационни протоколи.

Монографията е структурирана в увод и шест глави. Всяка глава завършва с библиографска справка на използваните в нея литературни източници.

В Глава 1 е направено подробно описание на основните принципи на работа на различни видове сензори и автономни сензорни модули. Направен е анализ на областите на тяхното приложение и перспективите за развитие.

В Глава 2 са анализирани основните безжични комуникационни технологии, свързани с функционирането на сензорите. Направено е описание на основните хардуерни и софтуерни платформи и основните мрежови характеристики и ограничения, съпътстващи функционирането на сензорните мрежи. Специално внимание е обрнато на възможностите за надграждане на мрежата с използване на

нови софтуерни технологии и по-специално развитието на интелигентни сензорни мрежи (ISN), характеристики и приложение в различни области.

Глава 3 разглежда базовите мрежови архитектури и топологии, използвани при изграждането на безжичните сензорни мрежи. В тази глава е направен анализ на предимствата и недостатъците на всяка топология, както и предизвикателствата при проектирането на безжични сензорни мрежи.

Глава 4 представя сравнителен анализ на комуникационните протоколи по стандарта IEEE 802.15.4., както и на фамилията комуникационни стандарти IEEE 1451, касаещи работата на преобразувателите на сигнали от сензори (трансдюсери).

Глава 5 се фокусира върху комуникационните протоколи, имащи отношение към сензорните мрежи. Направено е описание на специфични за безжичните сензорни мрежи комуникационни протоколи от каналния, мрежовия, транспортния и приложния слоеве на OSI модела и научния принос на автора в тази област.

В т. 5.7.2 е представен разработен от автора математически и симулационен модел, базиран на обобщени мрежи, за паралелна обработка на интегрирани сензорни данни.

Глава 6 съдържа основно резултати от авторски научни изследвания.

В т. 6.2.3 е описан нов метод и алгоритъм за кълстериране на сензорни възли, базиран на приоритет на качеството на връзката (Link Quality).

В т. 6.3.2 е описан нов метод и алгоритъм за динамична промяна на интервалите за синхронизация в кълстерни и mesh базирани безжични сензорни мрежи. Предлаганият метод се състои от двустепенен процес на прогнозиране и оцен-

ка чрез филтър на Калман и Централна гранична теорема CLT (General Limit Theorem). Предложеният метод води до намаляване на комуникационния трафик за синхронизация на таймера и спестява енергия на сензорни устройства, захранвани от батерии.

В т. 6.4.3 е представен нов метод за локализация на мобилни обекти в закрити пространства чрез използване на безжични сензорни локатори. Предлаганият метод използва два независими канала за локализиране, базирани на AoA (Angle of Arrival) и RSS (Received Signal Strength) съответно. Резултатите от измерванията се обработват статистически на база филтър на Калман на първо ниво и разширен филтър на Калман на второ ниво.

Разработените от автора и представени в тази глава научни изследвания са докладвани на престижни международни конференции и публикувани в издания с импакт фактор.

Представеният монографичен труд прави сериозен анализ на комуникационните технологии в областта на безжичните сензорни мрежи, както и на перспективите за развитие в тази област.

Важна характеристика на рецензирания монографичен труд са авторските научни изследвания, допринасящи за решаване на важни проблеми в областта на безжичните сензорни мрежи и свързаните с тях предизвикателства в областта на развитие на протоколите за комуникация.

Научният труд съдържа оригинални научни изследвания и като структура, съдържание и качество на научните приноси представлява завършен монографичен труд.

В заключение считам, че монографията „Безжични сензорни мрежи и системи. Архитектура и комуникационни протоколи“ с автор д-р инж. Александър Александров представ-

лява сериозно научно изследване, допринасящо за развитието на комуникационните технологии в областта на безжичните сензорни мрежи в международен мащаб.

**Проф. д-р. Румен Трифонов**  
Технически университет – София

**Александър Александров**

**Безжични сензорни системи.  
Архитектура и комуникационни протоколи**

**Монография**

**Българска  
Първо издание**

**Научни рецензенти  
Проф. д-р Владимир Монов,  
Проф. д-р Румен Трифонов**

**Редактор и коректор  
Татяна Джунова**

**Формат 60/90/16  
Печатни коли 17  
Предпечат и печат  
Лазарон прнт ООД**

**Академично издателство „За буквите – О писменехъ“  
София, 2023**

**ISBN 978-619-185-636-7**





9 786191 856367