



**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ
ТЕХНОЛОГИИ**

Александър Кирилов Александров

Интегриране на данни от интелигентни сензорни системи

ДИСЕРТАЦИЯ

**за получаване на образователна и научна степен „доктор“,
по специалност „Информатика“
в професионално направление 4.6 Информатика и компютърни науки**

**Научен ръководител:
Доц. д-р Владимир Монов**

София, 2017г.

Интегриране на данни от интелигентни сензорни системи

Съдържание:

Основни дефиниции и съкращения използвани в дисертационният труд	4
Увод.....	8
Актуалност на темата	8
Обзор на основните резултати в областта.....	9
Анализ и актуалност на проблемите по тематиката на дисертационния труд	60
Цел и задачи на дисертационния труд.....	62
Методология на изследването	63
Структура на дисертационният труд.....	64
1. РАЗРАБОТКА НА СЕНЗОРЕН МОДУЛ ЗА МОНИТОРИНГ И ИНТЕЛИГЕНТНА ОБРАБОТКА НА МЕТЕОРОЛОГИЧНИ ДАННИ И ВЪЗМОЖНОСТ ЗА БЕЗЖИЧНА КОМУНИКАЦИЯ.	65
1.1 Разработка на хардуерна архитектура на безжичен сензорен модул за мониторинг на метеорологични данни.....	65
1.2 Разработка на системната архитектура на фърмуера на безжичния сензорен модул.....	88
1.3 Изводи	98
2. МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ЗА ИНТЕГРИРАНЕ НА ДАННИ ОТ ИНТЕЛИГЕНТНИ БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ И СИСТЕМИ.	100
2.1 Метод и алгоритъм базиран на филтър на Калман за интегриране на данни от интелигентни безжични сензорни мрежи.....	100
2.2 Метод и алгоритъм за формиране на клъстери в AD HOC интелигентни безжични сензорни мрежи.....	110
2.3 Метод и алгоритъм за оптимизация на консумацията на енергия от сензорен модул по време на процеса на измерване и предаване на данни в сензорна мрежа	120
2.4 Метод за оптимизация на консумацията на енергия от сензорен модул на ниво комуникация в сензорна мрежа с клъстерна топология.....	123
2.5 Изводи	128

3. SOA БАЗИРАНА СОФТУЕРНА ПЛАТФОРМА ЗА ИНТЕГРИРАНЕ НА ДАННИ ОТ СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ.....	131
3.1 Разработка на софтуерна архитектура на SOA базирана софтуерна платформа за интегриране на данни от сензорни системи.....	131
3.2 Изводи	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
Списък на публикациите по дисертацията	143
Забелязани цитирания на трудове по дисертацията.....	144
Апробация на резултатите	145
Основни научни и научно-приложни приноси	146
Декларация за оригиналност.....	149
Благодарности	150
БИБЛИОГРАФИЯ.....	151

Интегриране на данни от интелигентни сензорни системи

ОСНОВНИ ДЕФИНИЦИИ И СЪКРАЩЕНИЯ ИЗПОЛЗВАНИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯТ ТРУД

Следните дефиниции и съкращения са широко използвани в литературата за безжичните сензорни мрежи:

Трансдюсер (transducer) – устройство, което преобразува една форма на енергия в друга.

Сензор – трансдюсер (transducer), преобразуващ физични величини в електрически сигнал

Сензорен модул – комбинация от няколко сензора, интегрирани в общ корпус и с общо електронно управление

Умен сензорен модул (smart sensor) - състои се от сензорен елемент (transducer), микропроцесор с набор аналого-цифрови преобразуватели позволяващ цифрова обработка на измерения сигнал, автоматично калибриране и блок за предаване на данни

Интелигентен сензорен модул (intelligent sensor) - 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.

Сензорен възел (sensor node) - използва се в терминологията на сензорните мрежи. Под сензорен възел се разбира сензорен модул, работещ като част от сензорна мрежа с вградени функции за маршрутизация на данните.

Сензорна мрежа (Sensor Network) - група от сензорни модули свързани помежду по определена топология и комуникиращи помежду си на базата на един или няколко комуникационни протокола.

Безжична сензорна мрежа (WSN-Wireless Sensor Network) - група от сензорни модули, свързани помежду по определена топология и комуникиращи помежду си по радиоканал.

Сензорна система (sensor system) - група от жични и безжични сензорни мрежи, измерващи различни параметри на околната среда обединени на базата на обща платформа за интегриране на данни.

IEEE 802.15.4 – това е стандартът който дефинира механизъм за реализация на безжичната комуникация, характеризираща се относително с ниска скорост на данните и ниска консумация на енергия.

Received Signal Strength Indicator (RSSI) - измерва мощността на приетия сигнал в радиоканала излъчена от IEEE 802.15.4, FSK или други трансмитери. RSSI често се дефинира като ED (Energy Detection) и се използва в CCA (Clear Channel Assessment) алгоритмите за анализ на радиоканала. За мрежи тип „single-hop“, RSSI се използва за LQI.

Link Quality Indication (LQI) - показател чрез който се измерва качеството на комуникационната среда на даден канал.

Интегриране на сензорни данни (Sensor Data Fusion) - е процес на интегриране на данни от различни сензори и обработката на тези данни със специално разработени алгоритми с цел повишаване на тяхната достоверност.

QoS (Quality of Service) - 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 [139]

TCP (Transport Control Protocol) - семейство от протоколи за комуникация между компютърни системи, който се използва в Internet и в почти всички други съвременни компютърни мрежи.

UDP (User Datagram Protocol) - транспортен пакетен протокол, документиран в IETF RFC 768. Предоставя прост интерфейс между мрежовия протокол под него и приложните протоколи над него.

HTTP (Hypertext Transfer Protocol) - протокол за пренос на хипертекст. Мрежов протокол, от приложния слой на OSI модела, за пренос на информация в компютърни мрежи. Създаден като средство за публикуване на HTML страници.

OSI (Open System Interconnection) - теоретичен модел, описващ принципния начин на комуникация и строежа на телекомуникационните и компютърните мрежи.

FTP (File Transfer Protocol) - протокол за прехвърляне на файлове от една машина (компютър или сървър) на друга.

SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) - Интернет стандарт host-to-host имейл транспортен протокол. Традиционно оперира с TCP порт 25.

TDMA (Time Division Multiple Access) - мултиплексна технология за цифров трансфер, която позволява на няколко потребители да споделят общ честотен канал, чрез разделяне на сигнала в различни времеви интервали, уникални за всеки потребител в рамките на използвания канал.

FDMA (Frequency division multiple access) - Комуникационна технология за множествен достъп с разделение на честотите, прилагана при аналоговите мобилни мрежи. Честотния спектър се дели на канали по 30 KHz.

CDMA (Code Division Multiple Access)- Комуникационна технология за множествен достъп с кодово разделение на каналите, използвана в мобилните мрежи от 2-ро поколение.

CSMA-CA (Carrier-sense multiple access with collision avoidance) – комуникационна технология за множествен достъп при която се проверява комуникационния канал за вече започнато предаване на данни с цел избягване на колизии, преди да започне предаване. Комуникационния блок предава данните си само ако тази проверка е показала че канала не е зает.

ZigBee – стандарт и протокол създаден през 2004 г. от ZigBee Alliance, за да се дефинират спецификации за изграждане на големи безжични мрежи надграждащи съществуващия 802.15.4 стандарт.

LLC(Logical Link Control) - подслой на комуникационен протокол съгласно OSI модела, представляващ подслой на слой 2 (Data Link layer) на OSI модела. LLC осигурява механизми за мултиплексиране.

SSCS (Service Specific Convergence Sublayer) подслой на стека на IEEE 802.15.4 за обслужване на специфична конвергенция, отнасящ се за някои специфични приложения.

MAC (Medium Access Control) - подслой на слой 2 (Data Link layer) на OSI модела. Осигурява адресиране и достъп до контролни механизми за работа на устройства в среди на мрежи с множествен достъп.

УВОД

АКТУАЛНОСТ НА ТЕМАТА

IT технологиите са навсякъде в нашето съвремие и именно те определят очертанията на нашето бъдеще. Сензорите и сензорните мрежи са неотделима част от живота на човечеството. В много области без сензори човешкият живот е подложен на опасност, а в други без тях е невъзможно съществуването на цели индустрии и научни изследвания.

През последните няколко години безжичните сензорни мрежи провокират интереса на специалистите с големия брой теоретични и практически предизвикателства, свързани с приложните им възможности. Безжичната им архитектура позволява лесно измерване на физични величини като температура, влажност и налягане, както и интеграция към вече съществуващи измервателни системи. Тяхната гъвкавост, възможностите за математически анализ и обработка на данните, както и лесният графичен подход за програмиране предоставят възможност за изграждане на цялостни решения за мониторинг на технологични процеси. Така например, безжичните сензори могат да служат за дистанционно измерване на величини в случаи, когато стандартните способности за комуникация по кабели или директно измерване са неефективни и скъпи. В случаите на измерване на параметри на физични и химични величини на големи площи е по-надеждно и икономически по-изгодно използването на безжични сензорни мрежи вместо класическа проводникова мрежа. Всяка област на приложение на сензорите е неизбежно свързана с огромни потоци от информация генерирана от сензори, обработката на тази информация т.н. big data съхранявана в огромни хранилища за данни е една от първостепенните задачи, чието решаване е на дневен ред.

Интегрирането на данни от сензори и сензорни мрежи е проблем, чието решаване стои на дневен ред в много области на живота, като се започне от рутинните медицински изследвания на човешкото тяло и се стигне до данните свързани с климатичните промени на планетата.

ОБЗОР НА ОСНОВНИТЕ РЕЗУЛТАТИ В ОБЛАСТТА.

Сензори - общи сведения

Основната функция на сензорите е преобразуването на определени физични величини в електрически сигнал. Във връзка с това в литературата [27],[33] се разграничава термина трансдюсер (transducer) от термина сензор (датчик) въпреки близкото им съдържание.

По дефиниция трансдюсер (transducer) е устройство, което преобразува една форма на енергия в друга.

Когато трансдюсер преобразува физическа величина в електрически сигнал, то се нарича сензор.

Когато трансдюсер преобразува електрически сигнал във физическа или механична енергия, то се нарича актуатор (Actuator)

Въз основа на тази дефиниция може да се каже че всеки сензор е трансдюсер, но не всеки трансдюсер е сензор.

Основната функция на един сензор е преобразуването на физични въздействия от заобикалящата го среда в пропорционален на въздействието електрически сигнал. На блок диаграмата от фиг.1 е показан пример на типична за сензора функция - преобразуване на измерена температура в електрически сигнал:



Фиг.1 Принцип на работа на сензор за измерване на температура

Основни параметри на сензорите:

Чувствителност (Sensitivity): минималното физическо въздействие на входа на сензора водещо до регистрируем сигнал на изхода му.

Обхват (Range): минималната и максималната стойност на измервания физически параметър, която сензорът може да измери и обработи.

Прецизност (Precision): възможността сензора да репродуцира на изхода си едни и същи резултати при повтарящи се входни условия.

Точност (Accuracy): най-голямата разлика между актуалната стойност и стойността измерена от сензора.

Резолюция (Resolution): най-малката промяна на входната величина, която може да бъде детектирана от сензора и пропорционално отразена във изходния сигнал.

Отместване (Offset): нивото на изходния сигнал при липса на сигнал на входа на сензора

Време за реакция (Response time): времето необходимо на сензора да промени изходния сигнал при промяна на входния сигнал

Класификация на основните видове сензори

Класификация според нуждата от външен източник на енергия

Според нуждата на допълнителна енергия при процеса на измерване сензорите независимо от принципа им на работа могат да се разделят на две основни групи: пасивни и активни.

Пасивните сензори не се нуждаят от източник на енергия и директно генерират изходен сигнал пропорционален на въздействието на входа му. В повечето случаи този вид сензори преобразуват енергията на входния сигнал в изходен електрически сигнал. Пример за такива сензори са термодвойките, фотодиодите и пиезоелектрическите сензори.

Активните сензори се нуждаят от допълнителна енергия (електрическа или друга) за преобразуване на входния сигнал в изходен електрически сигнал. На практика тази допълнителна (в повечето случаи електрическа) енергия се модулира с входния сигнал и по-този начин се формира изходен сигнал пропорционален на входното въздействие. Пример за това е фоторезистора и фотодиода - и двата елемента не формират електрически сигнал, но тяхното съпротивление зависи от светлината и по-този начин силата на тока преминаващ през тях се променя в зависимост от съпротивлението им и косвено от интензитета на светлината на която са изложени. Т.е. този тип сензори могат да генерират изходен сигнал само ако им е подадено електрозахранване от външен източник.

Класификация по естеството на измерването

Според естеството на измерването сензорите се делят на две основни групи:

Група-1: Сензори измерващи абсолютни величини - това са сензорите които могат да измерват входните величини независимо от условията на измерване в абсолютни единици (ампери, волтове, фаради, температура в градуси Celsius, градуси Kelvin, линейно отклонение в милиметри, ъглово завъртане в радиани и т.н.

Група-2 : Сензори измерващи относителни величини - това са сензорите чието измерване зависи от условията на околната среда. Такива са сензорите за барометрично налягане, термодвойките чието измерване е базирано на предварителни реферирана температура, сензорите за влажност на въздуха, чието измерване е в зависимост от температурата и предварително реферирана базова стойност и др.

Класификация на сензорите по естеството на измерваната величина

Въз основа на тази класификация сензорите могат да се разделят условно на следните групи:

- Механични
- Оптични (фотоелектрични)
- Микровълнови
- Магнитеоелектрически
- Химични
- Биологични (биосензори)

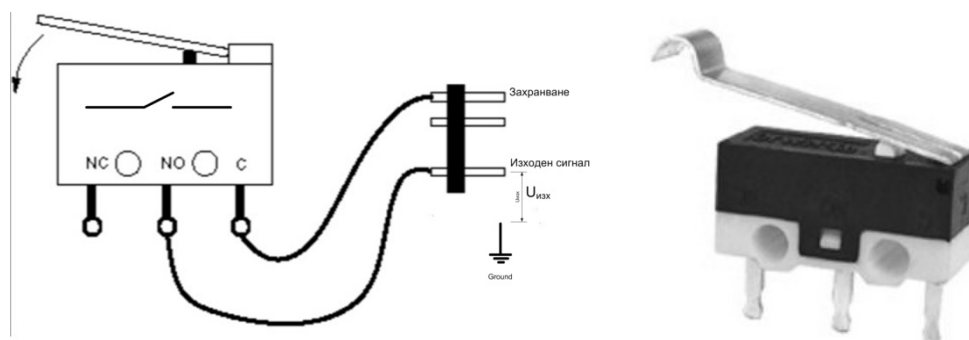
На таблица 1 е представена примерна класификация на сензорите по естеството на измерваните величини и типа на изходния сигнал подлежащ на интегриране:

Входен параметър	
Механичен	Позиция (линейна и ъглова)
	Ускорение
	Сила
	Налягане
	Маса
	Усукване
	Деформация
	Температура
	Вискозитет и др.
Оптичен (фотоелектричен)	Светлинна вълна (амплитуда, фаза, поляризация и спектър)
	Скорост на разпространение
	Индекс на рефракция
	Сила на излъчване
	Степен на отразяване
	Степен на поглъщане
Микровълнов	Радио вълна (амплитуда, фаза, поляризация и спектър)
	Скорост на разпространение
	Индекс на рефракция
	Сила на излъчване
	Степен на отразяване
	Степен на поглъщане
Магнитоелектричен	Магнитно поле(амплитуда, фаза, поляризация и спектър)
	Магнитен поток
	Магнитопроницаемост
	Електрически величини(ток, напрежение, капацитет, индуктивност и др.)
Химичен	РН на разтвори
	Наличие на определени химически вещества в течности
	Наличие на определени химически вещества в газове
Биологичен	Наличие на протеини, ензими, антигени нуклеиди и др.
	Наличие на определен вид клетки и бактерии

Таблица-1 Класификация на сензорите по естеството на измерваните величини

Механични сензори

Механичните сензори се използват широко за позициониране или като крайни изключватели в роботиката, строителната техника, машиностроенето и др. Типичен механичен сензор от тип краен изключвател е показан на фиг. 2



Фиг.2 Пример за механичен сензор

Освен стандартните механични сензори напоследък широко разпространение получават т.н. MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) сензори. Този тип сензори се използват основно в областта на нанотехнологиите като микроактуатори и микросензори.

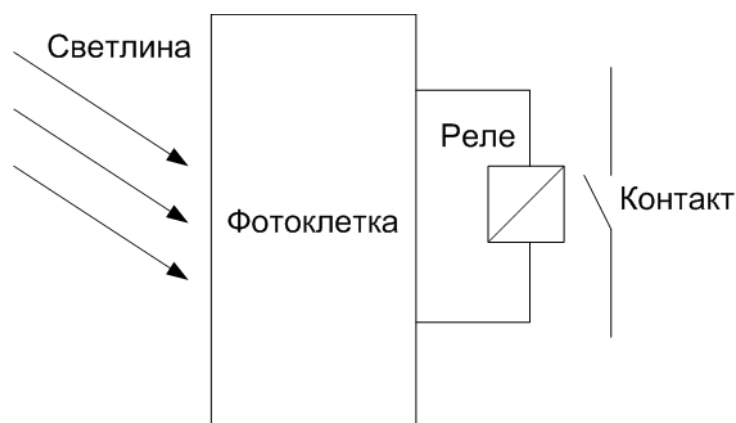
Оптични (Фотоелектрически) сензори

Фотоелектрическият сензор е устройство използващо светлинен поток за детекция на определени физични величини или събития. В зависимост от вида и предназначението си фотоелектрическите сензори могат да бъдат пасивни и активни.

Пасивните фотоелектрични сензори са от тип фотоволтаична клетка и сами генерират енергията за работата си и изходния сигнал. В болшинството от случаи този тип сензори служат за детекция на светлинни източници и изходният им сигнал е в състояние да задейства изпълнителни механизми като рид релета, светодиодна индикация и др.

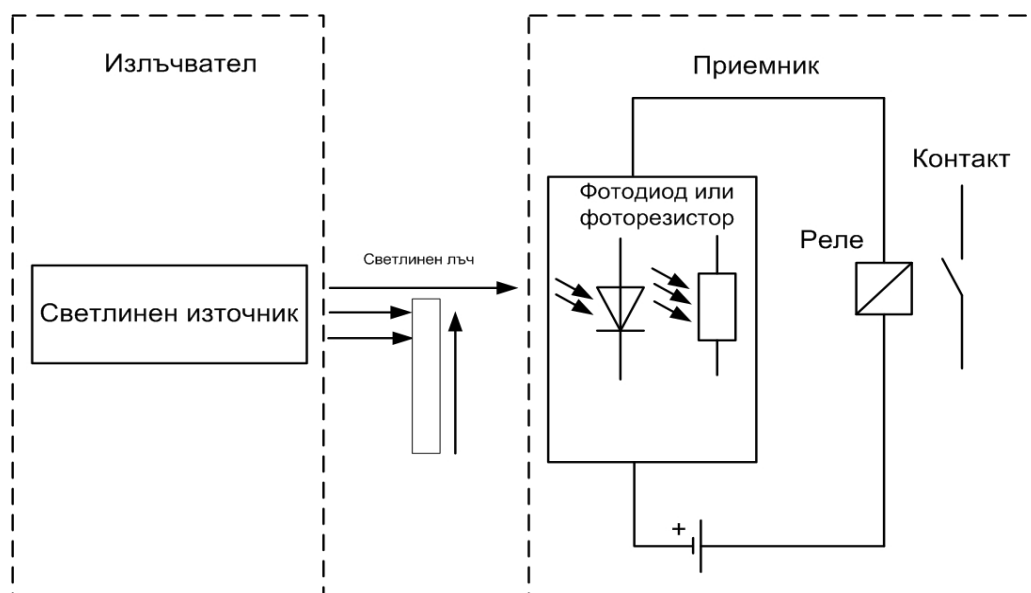
Активните фотоелектрически сензори обикновено са в конфигурация светлинен трансмитер и фотоелектрически приемник и като правило разполагат с по-голяма чувствителност и бързодействие.

На фиг.3 и фиг. 4 са показани функционални схеми на пасивен и активен фотосензор.



Фиг.3 Функционална блок-схема на пасивен фотосензор

Принципът на работа на пасивния фотосензор от фиг. 3 се свежда до генериране на ток от фотоволтаична клетка, пропорционален на количеството светлина, попаднала на нейната повърхност. Когато количеството светлина премине определена граница, генерираният от клетката ток става достатъчен да задейства бобината на релето, то се задейства, нормално отвореният контакт се затваря и задейства изпълнителен механизъм и/или светлинна индикация.



Фиг.4 Функционална блок-схема на активен фотосензор

Принципът на работа на активния фотосензор от фиг. 4 се свежда до намаляване /увеличаване на съпротивлението на фоторезистор или фотодиод в зависимост от попадналото върху повърхността му количество светлина.

Фотосензорът е комбиниран с източник на светлина с оптична система, фокусирана върху фоточувствителния елемент и непрозрачна преграда.

Фоточувствителният елемент е свързан във верига с източник на напрежение и реле с нормално отворен контакт. В нормален режим преградата прекъсва светлинния поток, количеството налична светлина не е достатъчно да отпусне фотодиода (респективно съпротивлението на фоторезистора е достатъчно голямо), релето не е задействано и контакта е отворен. Когато количеството светлина се увеличи поради премахване на преградата, съпротивлението на резистора се намалява до определена стойност, респективно фотодиода се отпусна, токът във веригата става достатъчен за да задейства бобината на релето, нормално отвореният контакт се затваря и задейства изпълнителен механизъм и/или светлинна индикация.

Микровълнови сензори

Микровълновите сензори използват дължина на вълната от около 1 см до няколко десетки см. Основното предимство на този вид сензори е, че показанията им не се влияят съществено от метеорологичните условия (облаци, дъжд, вятър, мъгла и т.н.)

Системите за наблюдение базирани на микровълни осигуряват надеждна информация за движещи се обекти, използвайки принципите на отразения сигнал, ефекта на Доплер, поляризацията на отразените вълни и др.

Магнитеоелектрически сензори

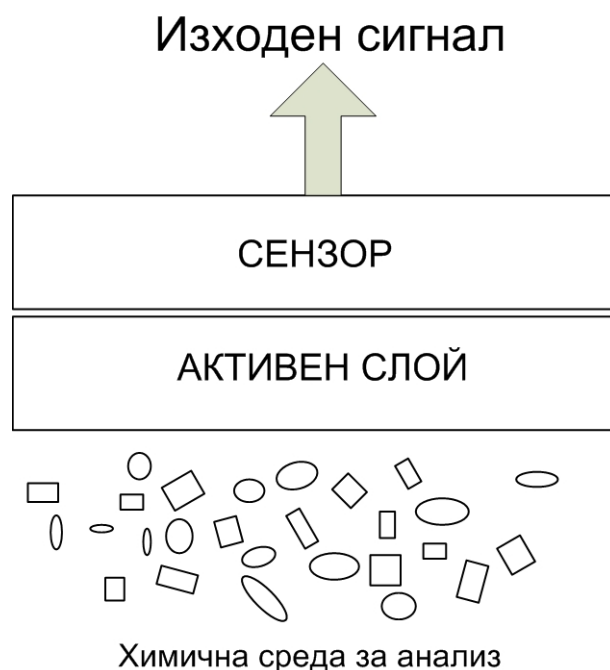
Сензорите с магнитеоелектрически принцип на измерване са най-голямата група сензори използвани в съвременните технологични устройства. Към тази група спадат индуктивните, капацитивните, пиезоелектрическите сензори и др.

Химични сензори

Химичният сензор е устройство, което преобразува химическа информация (състав, наличието на определен елемент или йон, концентрация, химическа активност и др.) в аналитично полезен сигнал.

Химичният сензор е аналитично устройство, което е в състояние да направи анализ на определени субстанции разтворени в течна или газова среда [62]. Информацията се предоставя под формата на измерим сигнал, който е пропорционален на концентрацията на някои химични вещества. При химичните сензори има два основни етапа на действие: разпознаване (recognition) и преобразуване (transduction).

В етапа на разпознаване анализираните молекули реагират по определен начин с молекулите на рецептора включени в структурата му, в резултат на този процес в молекулите на рецептора настъпват определени химични промени и техните характеристики се променят. В етапа на преобразуване (transduction), промяната на характеристиките на молекулите на рецептора водят до промяна на техни физични параметри (електропроводимост, прозрачност и т.н.), което води до промяна на изходния сигнал. На фиг. 5 илюстриран принципът на работа на химичния сензор



Фиг. 5 Принцип на работа на химичен сензор

Химичен сензор използващ като рецепторен компонент т.н. синтетични биомиметични (synthetic biomimetic) материали, като молекулярно отпечатани полимери и аптамери (aptamers) се доближава до дефиницията на биосензор.

Биологични сензори

Биологичните сензори (биосензори) са сходни по принципна действие с химичните сензори с тази разлика, че рецептора е съставен от биологични компоненти (клетки, протеини, нуклеинови киселини и т.н.)

Интегриране на сензорни данни (Sensor data fusion)

Процесът на интегриране на данни от сензори (sensor data fusion) е процес на обработка на тези данни със специално разработени алгоритми с цел повишаване на тяхната достоверност. В резултат от обработката се получават по-точни и по-надеждни данни, отколкото ако са получени от всеки сензор поотделно.

Типичен пример на интегриране на данни е стереоскопичното изображение което е комбинация от две двумерни (2D) изображения в резултат на комбинирането на които по определен начин се получава допълнителна информация и се формира 3D изображение. [51] [56]

Не е задължително данните да идват от идентични по конструкция и принцип на работа сензори. Данните могат да се интегрират и синтезират (т.н. непряк синтез) от разнородни сензори както и исторически сензорни данни (данни от предходни във времето измервания).

Интегрирането на сензорна информация (multisensor data fusion) е подмножество на интегрирането на информационни данни (information fusion).

Алгоритми и методи за интегриране на сензорни данни (sensor data fusion):

- Central Limit Theorem
- Kalman filter
- Bayesian networks
- Dempster-Shafer

Ако се разгледат две примерни измервания с вариращ шум единият от начините да се подобри съотношението сигнал-шум е да се приложи Central Limit Theorem. Този метод се използва и в алгоритмите за обработка на Fraser-Potter стремящи се към изглаждане и линеализиране на даден фиксиран интервал. Като резултат имаме линеализирана комбинация от двете измервания.

Друг метод е използване на филтри на Калман[19][36][42]. При него процеса се разделя на две фази - корекция (correction) и предвиждане(prediction).

В първата фаза се извършва измерване и се коригира предвиждането на предходното или началното измерване. Фазата на предвиждане изчислява стойността на следващото измерване базирана на отклонението на предходната фаза. Основното предимство на този метод е че е адаптивен и се базира на оценката на качеството на измерените от сензорите данни.

В настоящият дисертационен труд се използва основно разширен филтър на Калман [46] като основен метод за интегриране на сензорни данни.

Методи за интегриране на сензорни данни според местоположението

Интегрирането на сензорни данни според мястото на процеса условно може да се раздели на три метода - централизиран, децентрализиран и смесен [46].

При централизираният метод на интегриране всички данни от сензорите се изпращат в централен сървър за обработка на данни, който е отговорен за корелацията и интегрирането на данните.

При децентрализираният метод данните се интегрират на ниво сензор или група от сензори. Този метод е приложим само в случай, че сензорната мрежа е изградена от "умни"(smart) или интелигентни сензори, разполагащи с необходимия ресурс за самостоятелна обработка на данните.

При комбинираният метод [56] основната част от валидизирането и интегрирането на данните се извършва на ниво сензор или група от сензори и след това обработените данни се изпращат в централен сървър, където се извършва т.н. глобално интегриране на данните на ниво сензорни мрежи.

При смесеният метод сензорните данни се интегрират на няколко етапа в процеса на трансферирането им от първоизточника до приложението за анализ и крайна обработка.

Приложения

Типичен пример за интегриране на сензорни данни (Sensor Data Fusion) е GPS/INS (Global Positioning System and Inertial Navigation System), където измерените данни за местоположението на даден обект се интегрират (fused) основно по метода на разширения филтър на Калман [42]. Това позволява определяне на височината на летателни апарати, използвайки сравнително ниско бюджетни сензори[87]. Друг пример е използването на филтри на Калман при интегриране на сензорни данни за определяне на степента на натовареността на пътния трафик в големите градове, използвайки акустични и видео сензорни данни. [64][50][56][63]

Аналогичен пример е описан в статията на Пири [101] където интегрирането на данните от различни позициониращи сензори обработени с филтри на Калман (MIMO Kalman filtering), помага за увеличаване на пропускната способност по някои пътни артерии чрез адаптивно пренасочване на трафика.

Принцип на работа на безжичните сензорни мрежи

Стек на OSI (Open Systems Interconnection) и WSN (Wireless Sensor Network)

Open Systems Interconnection (OSI) е седем слоен модел [70][92][141], предложен от Международната организация по стандартизация (ISO). Този модел е в основата на дизайна на стека на WSN (Wireless Sensor Network) протокола. За разлика от оригиналния седем слоен OSI модел, състоящ се от physical layer, data link layer, network layer, transport layer, session layer, presentation layer и application layer дизайнът на стека на WSN (Wireless Sensor Network) протокола не приема всички седем слоя на модела OSI. В практиката се е наложил 5-слойният модел на стека на WSN протокола показан на фиг. 6.



Фиг.6 Стек на WSN протокол

Петслойният модел на WSN стека се състои от физически слой, слой предаване на данни, мрежов слой, транспортен слой и приложен слой. Всеки слой извършва специфичен набор от задачи независимо от другите слоеве в стека.

Първият слой на стека т.н. физически слой, е проектиран за определянето и управлението на връзките между отделните устройства и тяхната комуникационна среда. Физическият слой е отговорен за избор на честота, генериране на носеща честота, детекция на сигнала, модулация и кодиране на данните. Освен това, физическият слой определя типа на съединителите и кабелите съвместими с комуникационната среда.

Вторият слой на протокола стека е слоя за предаване на данни. Този слой е отговорен за предоставянето на услуги, които позволяват на множество възли успешно да имат достъп и да споделят комуникационната среда. Тези услуги включват осигуряване на среда за контрол на достъпа, надеждна доставка, откриване на грешки и корекция на грешки.

Третият слой на стека, т.н. мрежов слой, е отговорен за установяване на комуникационни канали между възлите в мрежата и успешно маршрутизиране на пакети по тези канали. Изискванията на различни протоколи за маршрутизация може да варират и конкретният избор влияе на създадените комуникационни канали. Някои протоколи за маршрутизация дават предимство на комуникационни канали с високо ниво на QoS (Quality of Service), други протоколи дават предимство на маршрути оптимизиращи разхода на енергия и даващи възможност за по-голям период на автономна работа на мрежата. Има протоколи оптимизиращи и двете изисквания - високо ниво на QoS и относително икономичен маршрут от гледна точка на икономия на енергия.

Четвъртият слой на стека - транспортния слой предоставя на потребителите с прозрачни и надеждни комуникации между крайни точки за комуникация. Основно са популярни два основни протокола работещи на ниво транспортен слой – TCP (Transport Control Protocol) и UDP (User Datagram Protocol).

Протоколът TCP гарантира надеждна комуникация, той е т.н. connection oriented протокол. Това означава, че при установена връзка между два възела на база този протокол, предаването на данни е двупосочно и се гарантира с механизми за обработка на грешки, механизми за контрол на предаване и приемане на пакети, механизми за контрол на потока от данни и т.н. Това е надежден протокол по отношение на предаване и приемане на данни.

За разлика от TCP, UDP протокола не е connection oriented, което означава че когато един възел започне да предава пакети с данни не е задължително тези пакети да се получат в приемащия възел в реда в който са предадени. При този протокол всеки пакет се движи по индивидуален маршрут независимо от останалите пакети с данни и не е гарантирано получаването му в приемащия възел. Недостатък на този протокол е че няма механизъм за повторно изпращане на пакети и корекцията на грешки е на относително елементарно ниво. Основното предимство на UDP е високата скорост на предаване/приемане на данни и поради тази причина е широко използван в

приложения, работещи с големи потоци от данни - онлайн видео и аудио комуникация и др.

Петият слой на WSN стека е приложния слой. Приложният слой осигурява платформа за изграждане на потребителски приложения като Telnet, HTTP (Hypertext Transfer Protocol), FTP (File Transfer Protocol) и SMTP (Simple Mail Transfer Protocol). Този слой отговаря за криптирането на информацията, форматирането и съхранението на данните. Една от основните функции на този слой е да проверява слоевете под него за наличие на ресурси и услуги нужни за работата на потребителските приложения, които обслужва.

Стандарт IEEE 802.15.4 и безжичните сензорни мрежи

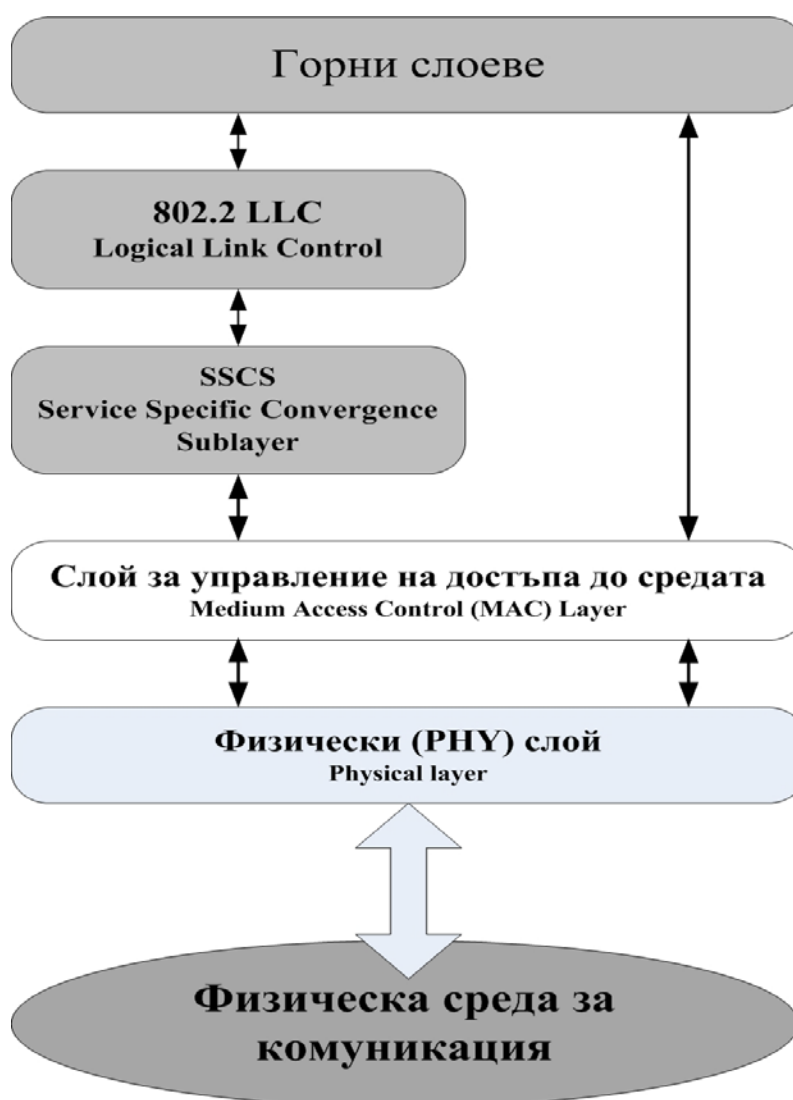
Процесът на проектиране на безжични сензорни мрежи е базиран на стандарти, за да се гарантира, че сензорната мрежа може да функционира безпроблемно на различни хардуерни платформи. Съвременните стандарти могат да бъдат условно разделени в две категории - публични и частни, според целите на проектиране.

Производителите на безжични сензорни мрежи изграждат долните слоеве (модул за безжична модулация / демодулация, MAC слой, мрежов слой протоколи и т.н.), с помощта на избрания стандарт. Обикновено тези слоеве са под формата на фърмуер вграден в хардуерните модули на производителите. Разработчиците изграждат свои собствени приложения базирани на горните слоеве на стандарта след закупуване на базовите модули от производителите. В областта на безжичните сензорни мрежи не съществува единен стандарт. Съществуващите в момента частни стандарти, обикновено се фокусират върху определени приложения и са така разработени, че ограничават възможността на поддръжка на приложенията от трети страни и в известна степен монополизират услугите предоставяни от тези стандарти само до един или група производители. Характерна особеност на частните стандарти е по-бързият им темп на развитие поради стремежа на производителите да подобрят продукта си в съответствие на изискванията на потребителите. Недостатък на тези стандарти е че като правило не са достъпни извън групата производители, които са ги създали и не са отворени за безплатно ползване.

Публичните стандарти се развиват с относително по-бавни темпове поради необходимостта да се осигури максимална съвместимост с вече произведените продукти базирани на тези стандарти.

Въпреки тази особеност те са широко разпространени именно поради факта, че са достъпни от страна на голяма група производители. Такъв публичен стандарт е 802.15.4 дефиниран през 2003г. (IEEE2003). [92][123][134]. Този стандарт е проектиран като LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area Network) стандарт основно за приложения, разполагащи с относително ограничени ресурси на енергия, памет и изчислителна мощ. Основната цел на 802.15.4 стандарта е да преодолее проблемите, свързани с вече съществуващите стандарти като Wi-Fi и Bluetooth. IEEE 802.15.4 специфицира физическия и MAC слоеве. Спецификацията за мрежовия слой включва само дефиниране на най-елементарните топологии - звезда (star) и peer to peer за изграждане на мрежи от сензори [142].

Фигура 7 показва типична архитектура на стандарта IEEE 802.15.4.



Фиг. 7 Архитектура на стандарт IEEE 802.15.4.

Показаната на фиг. 7, архитектура се състои от два слоя - физически слой и слой за управление на достъпа до средата MAC (Media Access Control). Физическият слой включва основно радио трансивър и съответния механизъм за контрол на ниско ниво. MAC слоя осигурява дефиниции за трансфер на данни до физическия слой. Междинните слоеве SSCS (Service Specific Convergence Sublayer) и 802.2 LLC (Logical Link Control) дефинират стандартен механизъм за достъп до по-горните слоеве на физическия и MAC слоеве. Поради ограничения ресурс, приложенията за безжични сензорни мрежи изискват използването на протокола да бъде максимално опростено за да се намали натоварването на системата. В IEEE 802.15.4 е предвидена достатъчно опростена архитектура, позволяваща на разработчиците да проектират такива софтуерни приложения на ниско ниво, които могат директно да взаимодействат с процеса на прехвърляне на данни.

Специфични особености при FFD и RFD сензорите съгласно IEEE 802.15.4

Full Function Device (FFD) and Reduced Function Device (RFD)

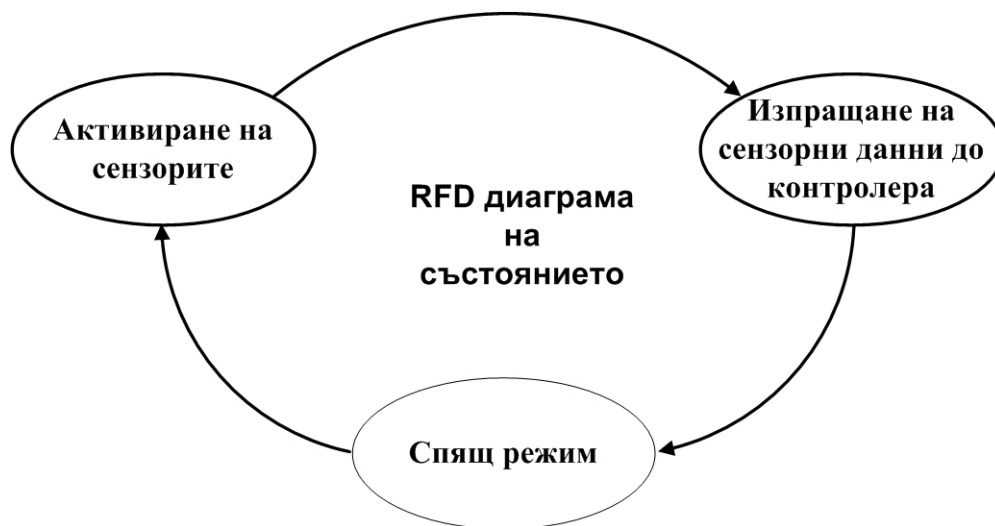
Според стандарта IEEE 802.15.4, има два типа устройства, които участват в системата на IEEE 802.15.4 - Full Function Device (FFD) and Reduced Function Device (RFD).

Едно FFD дава възможност за прилагане на всички функции на стека на IEEE 802.15.4, включително и да работи като координатор на цялата мрежа - PAN (Personal Area Network) координатор. Работата на PAN координатора включва създаването на мрежа, приемането на заявки за асоцииране от други устройства и т.н. Освен PAN координатор едно FFD може да работи и като обикновен координатор, (без възможност да инициира мрежа) и да изпълнява заявки на съседни устройства за маршрутизация на данни. [92][154][72]

Устройство работещо като RFD може да изпълнява само основните функции на стека, т.е. минимално прилагане на протокола IEEE 802.15.4. RFD не може да се използва за инициране и управление на мрежа, но може да изпълнява прости задачи като управление на сензори. Най-честата употреба на RFD е да работи като краен сензорен модул и да предава информация до други сензори в мрежата. Стандартът 802.15.4 дефинира специфичните особености при комуникацията на FFD и RFD - FFD може да комуникира свободно с други FFD и RFD, докато RFD може да комуникира само с FFD. Поради тази причина едно RFD е неподходяща алтернатива за изграждане на сензорни мрежи със сложна функционалност, като AD HOC мрежи, beacon устройства за синхронизация на мрежата и т.н.

В същото време поради ограничената си функционалност едно RFD консумира много по-малко енергия в сравнение с едно FFD при едни и същи условия.

Фигура 8 илюстрира модела на работа на типично RFD.



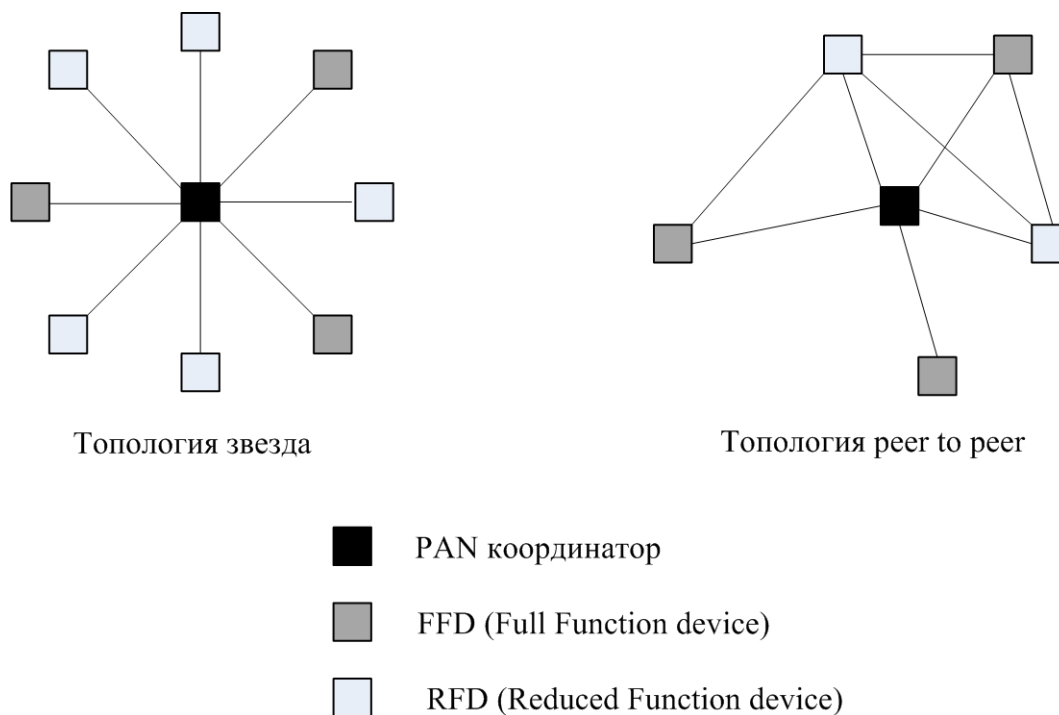
Фиг. 8 Модел на работа на RFD

Както е показано на фиг. 8 основните функции на RFD са да чете данни от сензорите, да ги изпраща към контролера и след това да се превключи в спящ режим (sleep) за определен интервал от време, след което цикълът се повтаря.

Топологии базирани на IEEE 802.15.4

Стандартът IEEE 802.15.4 поддържа звезда, дърво, клъстер, peer to peer и mesh мрежови топологии.

Фигура 9 илюстрира звездовидна и peer to peer топологии.



Фиг. 9 Топологии звезда и peer to peer на стандарт IEEE 802.15.4

На база на топология звезда (star) се формира и топология дърво (tree) а на база топология peer to peer се формират топологии клъстер (cluster) и mesh.

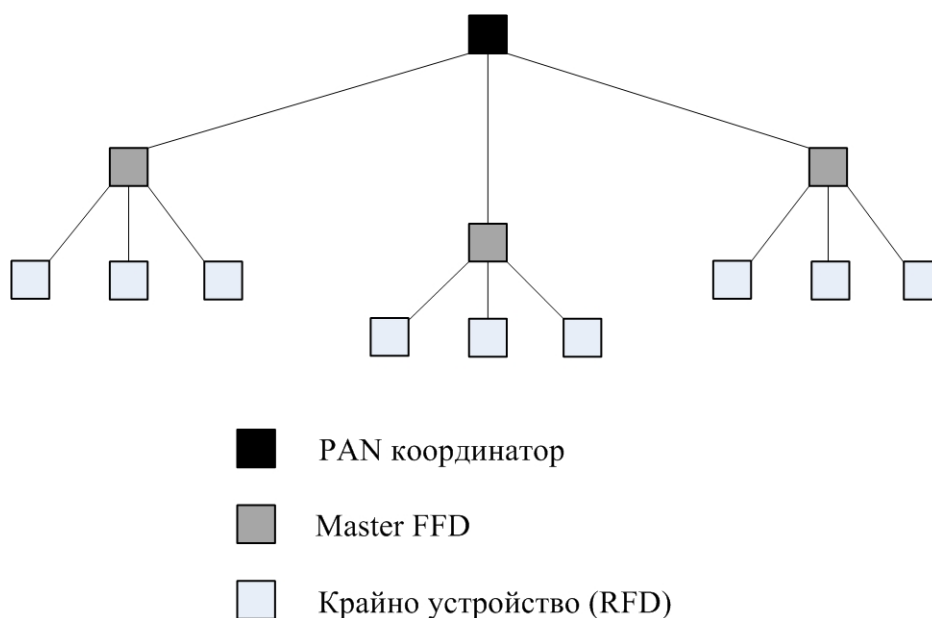
При топология звезда, FFD служи като координатор и може да бъде специфициран да изпълнява ролята на PAN координатор и да управлява цялата мрежа. Други координатори и мрежови устройства се включват в мрежата, само след като се асоциират към PAN координатора. PAN координаторът контролира всички мрежови комуникации при топология звезда.[43]

Peer to peer топологията също изисква централен PAN координатор за стартиране на процедурата по инициализиране на мрежата. За разлика от star топологията, при peer to peer комуникацията между устройствата е директна и не се ограничава от PAN координатора. Всяко FFD устройство може свободно да комуникира с всяко друго FFD устройство толкова дълго, колкото е специфицирано от режима на мрежата. В

същото време RFD може да комуникира само със своето главно (master) FFD към което е инициализирано и не може директно да говори с други RFD и FFD[61][143][144].

Група от RFD и тяхното master FFD за което са свързани образуват дървовидна топология. Дървовидната топология може да бъде във форма на едно или няколко разклонения с йерархична структура. Единичната дървовидна структура съдържа само един координатор. Всички възли са свързани към координатора (Master FFD) с един хоп и формално в процеса на формиране на мрежата топологията на мрежата се превръща в звездовидна. Дървовидната мрежова топология съдържа по принцип повече от един координатор.

Фигура 10 илюстрира дървовидна топология с йерархична архитектура.



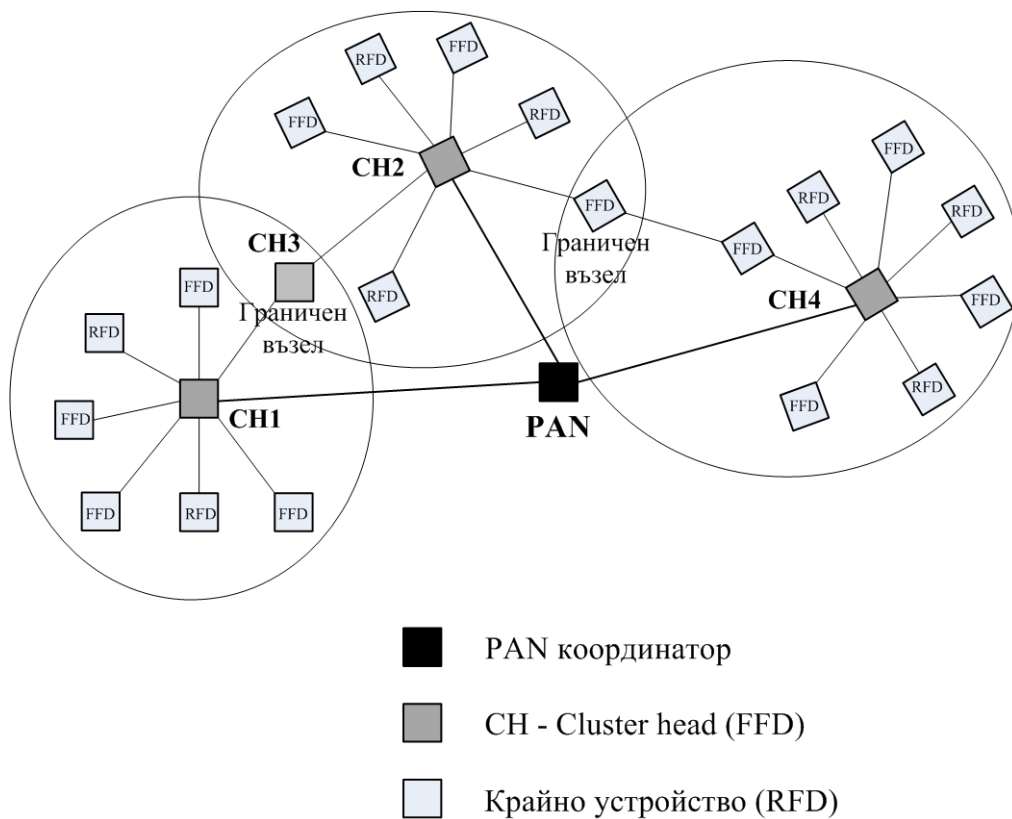
Фиг. 10 Пример за дървовидна топология

Групата от координатори (Master FFD) формират подмрежа от по-високо ниво. Всеки от координаторите може да комуникира, както с централния PAN координатор така и с други външни за мрежата устройства, като възли за синхронизация, gateway устройства и др.

Недостатък на дървовидната топология е относително ниската надеждност при предаване на данни, поради липса на алтернатива при маршрутизация.[62]

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

Фиг. 11 илюстрира клъстерна топология, където всеки клъстер се свързва с друг клъстер чрез възел, който е общ за два съседни клъстера, т.н. наречения граничен възел (border node).



Фиг. 11 Пример за клъстерна топология

Като гранични възли могат да се специфицират, както клъстерни координатори (CH), така и обикновени възли с FFD функционалност.

Както е показано на фиг. 11 клъстерния координатор CH3 играе ролята и на граничен възел. Особеното при CH3 е че той има 2 логически адреса - един като клъстерен координатор (CH) и друг като граничен възел (DD). В останалите два случая FFD, които са регистрирани в два съседни клъстера изпълняват функцията и на гранични устройства (border node).

Множествен достъп базиран на IEEE 802.15.4

Както във всички видове мрежи, възлите в безжичните сензорни системи трябва да споделят обща среда за предаване на сигнала. Протоколите за множествен достъп (MAC - Multiple Access Control), съгласно стандарта IEEE 802.15.4 определят начина, по който безжичната среда се споделя от участващите комуникационни възли с цел

повишаване на общата производителност на системата. [60] Протоколите за контрол на достъпа тип MAC. за безжични мрежи могат да бъдат разделени условно в две основни категории:

- протоколи с канален метод на достъп TDMA и FDMA
- протоколи базирани на случайното разпределение на достъпа (CSMA / CA)

Протоколи с канален метод на достъп TDMA, FDMA и CDMA

При протокола TDMA (Time Division Multiple Access), наличната честотна лента се споделя на база временни интервали (слотове), като на всеки активен възел се присвоява един или повече времеви интервала (слотове) за предаване на неговите данни.

При протокола FDMA (Frequency division multiple access), наличния спектър се разделя на честотни канали, като на всеки потребител се разпределя специален канал, различен по честота от каналите присвоени на другите потребители. Информацията за потребителите се обменя с помощта на отделен специален канал. Най-големият проблем при FDMA е фактът, че каналите не може да са много близо един до друг. Поради тази причина се изисква разделяне по честота, за да се избегнат смущения между каналите [76][89].

Протоколът CDMA (Code Division Multiple Access) следва подобен подход. Вместо споделяне на наличната ширина на честотната лента по честота или време, при CDMA тя се разделя по код. При този протокол, всички възли комуникират в една и съща същата честотна лента, по едно и също време. Предаването на различни потребители са управлява с уникален код, който е присвоен на всеки потребител. CDMA може да бъде илюстриран с примера на разговори, провеждани в обща стая на различни езици. При този случай хората, които разбират определен език слушат този разговор и отхвърлят всички останали разговори на други езици. (Nicolopolitidis et al. 2003, p. 59.) [95].

Понякога CDMA се специфицира като DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum) протокол.

Протоколи базирани на случайно разпределение на достъпа (CSMA / CA)

Протоколите за множествен достъп тип CSMA-CA (Carrier-sense multiple access with collision avoidance) са базисни за слоя на управление на достъпа до средата (MAC – Medium Access Control) на стандарта IEEE 802.11.

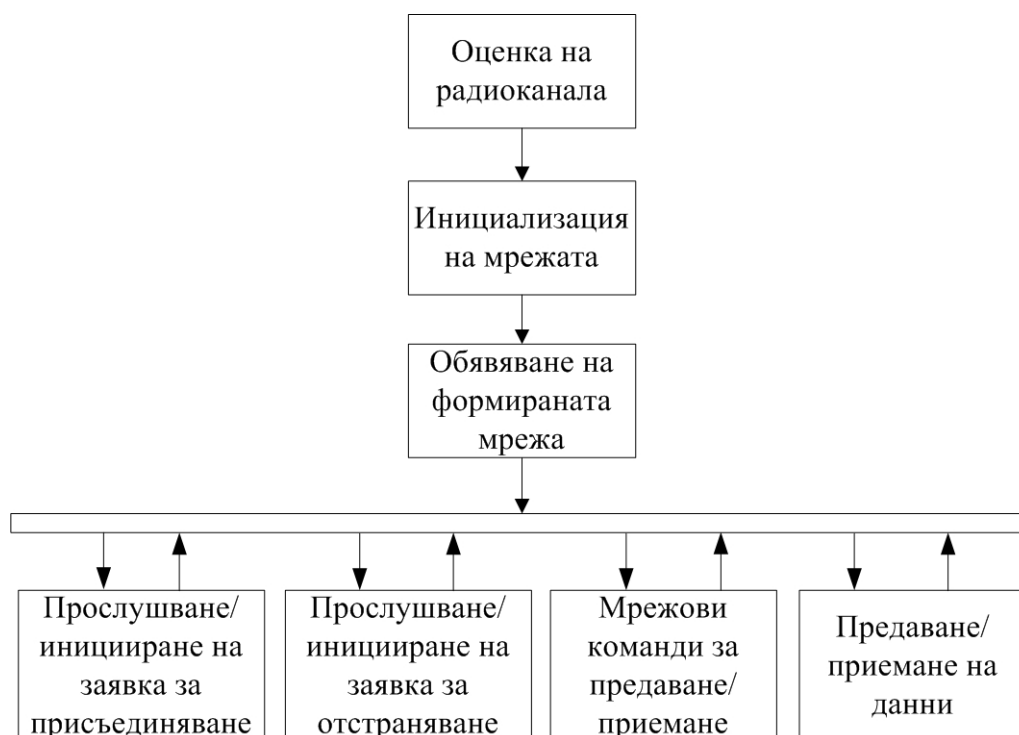
При този протокол всеки възел, който има пакет за предаване слуша комуникационната среда за да провери дали друг възел не предава. Ако има друг възел който предава в момента на прослушване на канала, текущият възел спира процеса си и изчаква определен интервал от време. След изтичане на този интервал възелът отново се включва на прослушване и ако няма трафик по прослушвания канал възелът започва предаване на пакета си. При наличие на трафик възелът отново прекъсва процеса си и изчаква нов, случаен по продължителност интервал.

Процесът се повтаря циклично до намиране на свободен от трафик времеви слот.

Изграждане на мрежи базирани на стандарт IEEE 802.15.4

Съдържанието на раздела по същество е отразено в публикация 4 - Alexander Alexandrov, "Comparative analysis of IEEE 802.15.4 based communication protocols used in wireless intelligent sensor systems" Proc. of the International conference RAM 2014

На Фигура 12 е показана стандартната процедура по отношение на която е базирана безжичната сензорна мрежа.



Фиг. 12 Процедура по изграждане на безжична сензорна мрежа базирана на стандарта 802.15.4

Процедурата започва с оценка на радио канал, след това стартира инициализация на мрежата и процедура по анонсиране (обявяване на формираната мрежа). След процедурата по анонсиране стартират няколко процедури, показани на фиг. 12, които се осъществяват паралелно в съответствие с концепциите дефинирани в стандарта 802.15.4 [92]

Радио канали (Radio Channel Assessment)

Първата основна процедура при изграждане на безжична сензорна система е оценката на комуникационната среда, т.е. дали има налична комуникационна среда. Детайлите касаещи тази оценка зависят от характеристиките на безжичната мрежа, която трябва да бъде проектирана [92].

За мрежи, които използват за FDMA протоколи, оценката може да се съсредоточи върху анализа на всички възможни канали и процедурата на изработване на схема за превключване на каналите (hopping scheme).

При мрежи, които използват CSMA/CA базирани протоколи, оценката се фокусира върху търсене на най-подходящия канал за използването от мрежата, т.е. търси се канал който има относително малко радиошум.

Друг важен въпрос в етапа на оценка на канала, е да се специфицират други системи, използващи безжични честотни ленти в близост до канала, който се оценява.

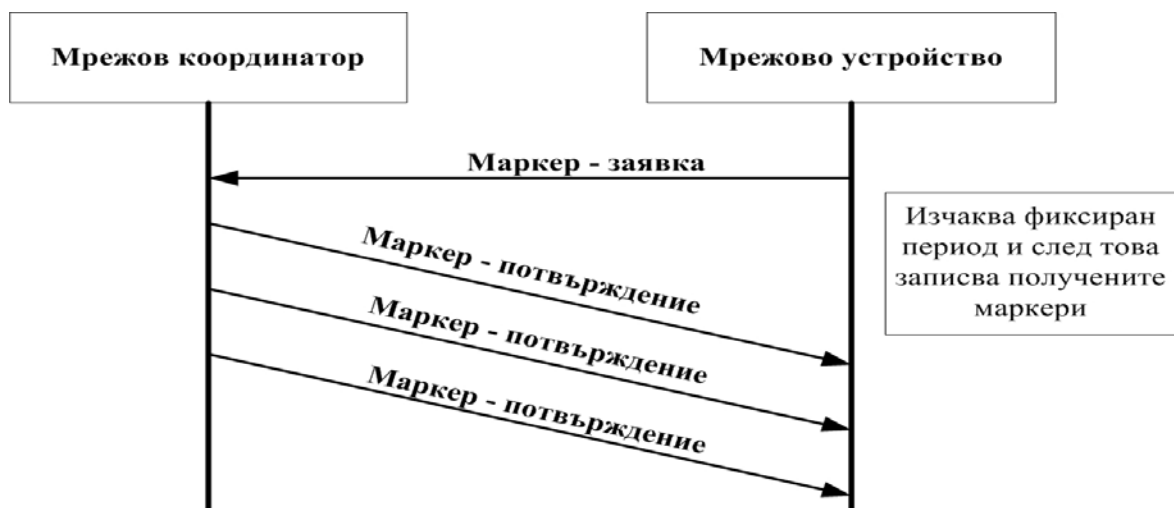
В IEEE 802.15.4 стандарта са дефинирани три функции, свързани с оценка на канала: детекция на енергия, активно сканиране и пасивно сканиране.[89]

Детекция на енергия ED (Energy detection): функцията за детекция на енергия дава възможност системата да определи на нивото на енергия на определени канали. Всеки радио сигнал наличен в честотния диапазон на избрания канал, увеличава нивото му на енергия. Основната задача на тази функция е да намери всички потенциални интерфериращи източници

Активно и пасивно сканиране (Active and passive scan): Функциите на активно и пасивно сканиране са предназначени да помогнат на системата да открие наличието на подобни безжични мрежи в обсега на комуникация.

При първата инициализация на FFD като PAN координатор в една IEEE 802.15.4 базирана мрежа, тя трябва да изпълни поне едно активно сканиране.

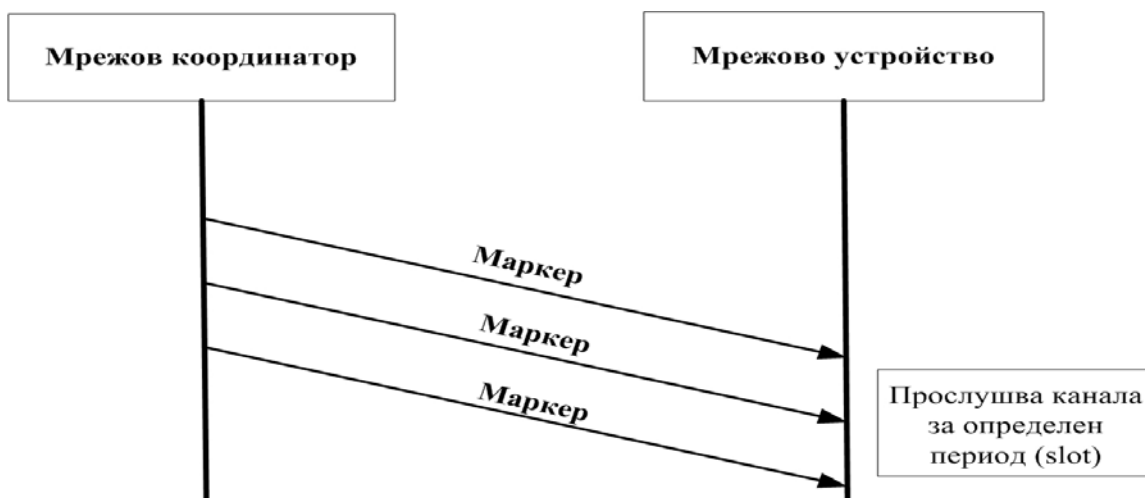
Активно сканиране - тази функция се осъществява чрез изпращане на специално съобщение маркер (beacon request) съдържащо POS (Personal Operating Space) код, което се използва за синхронизиране на мрежовите устройства. Това съобщение обикновено е генерирано от PAN координатора на мрежата. След това PAN координаторът записва получените отговори (beacon frames), съдържащи описание на мрежата от всички други съществуващи координатори ако има такива, както е показано на фиг. 13.



Фиг.13 Активно сканиране

Чрез сравняване на отговорите PAN координатора е в състояние да определи дали е възможно да се изгради безжична мрежа в тази комуникационна среда или канал.

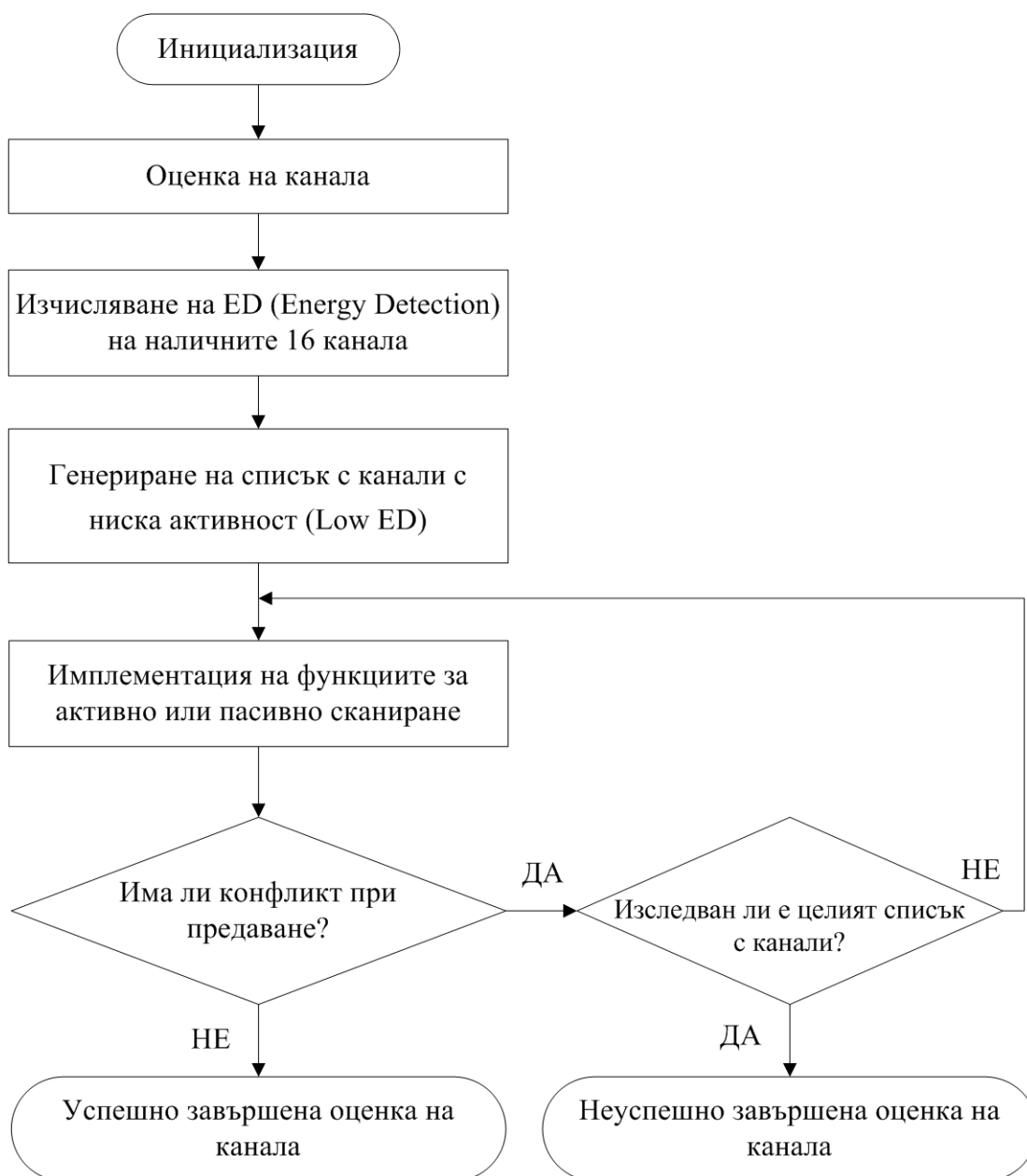
Пасивно сканиране - целта на пасивното сканиране е да се даде възможност на приемника на мрежовото устройство (в случая FFD) да прослушва за мрежови съобщения (beacons) на избрания канал в продължение на определен период от време, както е показано на фиг. 14.



Фиг.14 Пасивно сканиране

Ако други координатори излъчват broadcasting съобщения, съдържащи описание на техните мрежи, отговорите ще бъдат записани и обработени със същия метод, както активното сканиране.[109]

Функциите на откриване на енергия и активно сканиране са достъпни само за FFD устройства. Функцията за пасивно сканиране може да се прилага, както от FFD така и от RFD устройства. Типична процедура за оценка на канала е показан на фиг. 15, в която процедурите по откриване на енергия, активно сканиране и пасивно сканиране са интегрирани в оценката на 16 канала.



Фиг. 15 Процедура по оценка на канала (Channel assessment procedure)

Мрежова инициализация

Процедурата по мрежова инициализация се изпълнява от PAN координатора. Целта на тази процедура е да се специфицират различни мрежови параметри на мрежата, преди безжичната мрежа да започне да функционира. Параметрите включват работния канал, идентификатора на мрежата, разпределението на мрежов адрес и съдържанието на IEEE 802.15.4 синхронизиращото съобщение (beacon request).[109][116]

Конфигуриране на мрежови параметри

Работният канал се определя в зависимост от резултатите от оценката на канала обсъдени по-рано. Стандартът IEEE 802.15.4 дефинира използването на радиочестоти и съответните схеми за модулация. В стандарта са дефинирани 27 канала в три честотни диапазона, както и поддържаната скорост за обмен на данни за всеки диапазон.

Таблица 2 обобщава разпределението на честотните ленти на спецификация 802.15.4

Честотна лента (MHz)	Канал	Скорост на предаване (kb/s)	Модулация
868-868.6	0	20	BPSK
902 - 928	10-Jan	40	BPSK
2400 - 2483.5	26-Nov	250	Q-QPSQ

Таблица 2 Разпределение на честотни диапазони и скорост на обмен на данни.

Специфична особеност при IEEE 802.15.4 е че в него не е предвидена поддръжка на FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) и DRS (Dynamic Rate Shifting). В случая след определяне на работния канал се дефинира мрежов идентификатор чрез който устройствата могат да се идентифицират. Като мрежова система, стандартът IEEE 802.15.4 поддържа 16-битов идентификатор (PAN ID) за дефиниране на всяка мрежа базирана на него. Избраният PAN ID трябва да бъде уникален и не може да се припокрива с идентификатор на друга мрежа.

Особеност на стандарта IEEE 802.15.4 е че само определя два основни режима на комуникация: режим на разширена адресация и режим на съкратена адресация.

Режимът на разширена адресация специфицира уникален 64-битов адрес, който е фиксиран в фърмуера на устройството, когато то е било произведено. Използването на

режим разширена адресация гарантира че няма да има припокриване на адреси в процеса на работа на мрежата. Недостатъкът е че по този начин се намалява дължината на пакета с данни.

При режима на съкратена адресация размера на адресното поле е 16 бита (0x0000). Генерирането на адрес на съкратения 16-битов мрежов адрес е отговорност на PAN координатора при първоначална инициализация на мрежата. [119]

Например, избрания чрез различни ad hoc алгоритми PAN координатор си присвоява шестнадесетичен адрес 0x0000. След това PAN координатора генерира 16-битови мрежови адреси на устройствата които се присъединяват към мрежата чрез последователно инкрементиране с 1 на собствения си адрес(0x0001, 0x0002 и т.н.) Съкратената 16-битова адресация позволява формиране на мрежи състоящи се от не повече от 65 535 устройства (т.е. 2^{16}). Основното предимство на съкратената адресация е че увеличава съществено размера на полезната информация предавана в рамките на един пакет. Недостатък е невъзможността от гарантиране на уникален адрес на всяко устройство.

Структура на суперфрейм (Superframe)

Ниската консумация на енергия в стандарта IEEE 802.15.4 се постига чрез създаването на т.н. low duty-cycle. Компонентът, който консумира най-много енергия в безжичната система е комуникационния блок. Типичният работен ток за един IEEE 802.15.4 приемопредавател е около 20-30 mA. Това е значителен разход на енергия, ако радиостанцията се поддържа в продължение на цялото време, особено когато модулът се захранва от батерия.

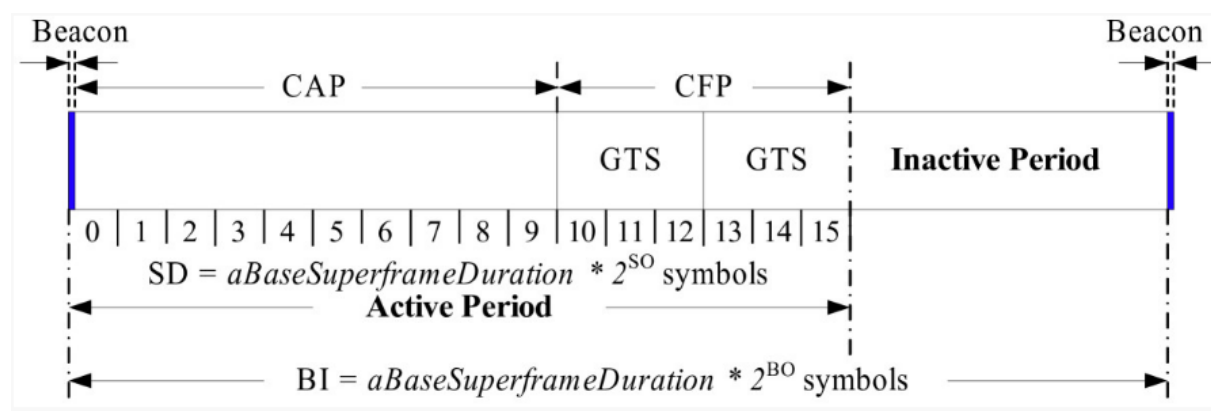
В IEEE 802.15.4 стандарта се дефинира понятието суперкадър или суперфрейм (Superframe) - това е начин на работа на системата при която системата изключва циклично приемо-предавателя, като в същото време се запазва функционалността на мрежата [116][119].

Структурата на суперфрейм представлява определен период, ограничен от т.н. beacons на мрежата които изпълняват функцията на синхронизиращи маркери. При получаване на beacon, комуникационните блокове на мрежовите устройства се синхронизират и започват да изпълняват определени комуникационни задачи в рамките на периода на суперфрейма. Структурата на суперфрейма определя срока, в който комуникационните блокове на устройствата в мрежата могат да бъдат активни. Ако активния период е приключил, приемо-предавателите на комуникационните блокове спират да работят и

остават в латентно състояние до пристигането на следващия суперкадър. Този механизъм за синхронизация дава възможност на системата да пести енергия, без да се губи комуникационна свързаност.

За да се гарантира, че устройствата се синхронизират с един и същ източник, маркерите се изпращат от PAN координатора.

Фигура 16 показва структурата на суперфрейм (Superframe), като значенията на съкращенията са показани в Таблица 3.



Фиг. 16 Структура на суперфрейм

Съкращение	Значение
CAP	Период на състезателен достъп до комуникационната среда (Contention Access Period)
CFP	Период без състезателен достъп (Contention Free Period)
GTS	Период на достъп гарантиран чрез времеви слотове (Guaranteed Time Slots)
SD	Продължителност на суперфрейма (Superframe Duration)
SO	Заявка на суперфрейм (Superframe Order)
BI	Между маркерен интервал (Beacon Interval)
BO	Заявка с маркер (Beacon Order)

Таблица 3 - Използвани съкращения във фиг.16

Показаната на фиг.16 структура на суперфрейм се състои от 3 основни части: маркер (beacon), активен период и неактивен период. Дължината на активния период е обозначена като продължителност на суперфрейма (SD Superframe duration) и се изчислява на база уравнение (1):

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \quad (1)$$

където обхвата на *SuperframeOrder* (SO) е от 0 до 15, и *aBaseSuperframeDuration* се изчислява на база броя слотове (обикновено 16). Продължителността на базовия слот в повечето случаи е 60 ms.

Цялата продължителност на периода на суперфрейма се нарича междумаркерен интервал (BI - Beacon Interval), който включва както активната така и неактивната част и се изчислява на база показаното уравнение (2):

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \quad (2)$$

Размерът на BO (Beacon Order) е от 0 до 15 и стойностите на SO и BO са в съотношение: $0 \leq SO < BO \leq 14$. Това е така, защото ако $BO = SO = 15$, стойността на SO е пренебрежително малка и суперфрейм на практика няма да има, следователно комуникационните блокове на устройствата ще бъдат в режим на непрекъсната работа, без пестене на енергия.

Ако $0 \leq SO = BO \leq 14$, то неактивната част (Inactive Period) няма да съществува, като дължината на междумаркерния интервал ще е равна на активния период (Active Period). Ако $0 \leq SO < BO \leq 14$, разликата между продължителността на суперфрейма SD (Superframe Duration) и BO(Beacon Order) е неактивната част, в която всички мрежови комуникации не са активни до пристигането на следващия фрейм.

При получаване на маркерите (beacons), мрежовите устройства могат да започнат да комуникират, като процеса на комуникация трябва да спре преди края на активната част, ако $SO < BO$ или преди края на периода на суперфрейма ако $SO = BO$.

Активната част от структурата на суперфрейма се разделя поравно в 16 слота с обща продължителност равна на $aBaseSuperframeDuration * 2^{SO}$ и е разделена на две части: период на състезателен достъп на комуникационните блокове на устройствата до комуникационната среда базиран на CSMA (Carrier Sense Multiple Access) наречен CAP

(Contention Access Period) и период на гарантиран от PAN координатора достъп на определени слотове (GTS – Guaranteed Time Slots) дефиниран като CFP(Contention Free Period). Обикновено GTS периода се използва от устройства с ниска латентност. По време на CAP периода всяко мрежово устройство може да инициира комуникация ако има данни за предаване, в същото време по време на CFP периода само предварително регистрирани от координатора (с предоставени от него GTS) устройства могат да започнат комуникация.

За всеки суперфрейм не се допуска да има повече от 7 GTS. Заявките за регистрация се подават предварително до PAN координатора и регистрациите на обработените от него заявки се съдържат в маркерите (beacons) на суперфрейма за да могат одобрените за комуникация в CFP (Contention Free Period) устройства да са предварително информирани.

След като са дефинирани BO (Beacon Order) и SO (Superframe Order) може да се изчисли работния цикъл DC (Duty Cycle).

Увеличаването на SO (Superframe Order) може да намали времето за реакция на системата и намаляване на BO (Beacon Order), т.е. увеличаване на работния цикъл. В същото време увеличаването на работния цикъл DC (Duty Cycle) ще доведе до повишена консумация на енергия и ще намали енергийната ефективност на комуникиращите в мрежата устройства.

Постигането на баланс между висока производителност на системата и относително ниска консумация на енергия е предизвикателство за всяка система съдържаща устройства с ограничен по капацитет енергиен източник.

Процес на създаване (формиране) на 802.15.4. мрежа

След инициализацията на параметрите на мрежата, PAN координатора обявява успешното формиране на мрежата. Действителната процедура за обявяване на формиране на мрежата се определя от използваните мрежови протоколи. Целта на обявяването е да се информират устройства, които не са част от тази мрежа за съществуването на текущата безжична система.

Има два начина за постигане на тази цел: да се обявяват активно или да отговарят пасивно при получаване на заявки. [133]

Някои безжични протоколи използват маркерите (beacons), за да синхронизират операциите в мрежата. Този тип мрежа се нарича мрежа с маркерна, поддръжка (beacon enabled network). С получаването на маркер новите устройства се информират за

характеристиките на съществуващата безжична мрежа, като честотата на работния канал, честотната лента, физическото място, и т.н.

Ако протоколът не поддържа периодично изпращане на маркери, този тип мрежа се нарича мрежа без маркерна поддръжка (non beacon enabled network) и PAN координаторът ще слуша непрекъснато работния канал и ще отговаря на всички валидни заявки, които са изпратени от устройства, извършващи оценка на радио канала. [134]

При мрежи с маркерна поддръжка, след обявяването на формирането на мрежата периодично ще се изпращат маркери, в зависимост от настройките на SO (Superframe Order) и BO (Beacon Order).

По време на целия работен цикъл на мрежата, PAN координатора трябва да осигурява постоянно предаване на маркери, за да направи мрежата откриваема за устройства прилагащи пасивно сканиране.

Междувременно всяко активно сканиране, инициирано от други устройства също така трябва да получава отговор независимо от източника на заявката.

Процедура по прослушване и инициализиране на процес на присъединяване на устройства към мрежата

След успешно инициализиране на IEEE 802.15.4 базирана мрежа, PAN координаторът става централен координатор на мрежата. Основната функция на PAN координатора, освен ако не е в режим на предаване е прослушване на избрания работен канал за да е в състояние ефективно да управлява мрежата. Всички устройства, които желаят да се присъединят към мрежата трябва да изпълнят три основни стъпки: да инициират активно (само FFD) или пасивно сканиране за да намерят желания PAN координатор, да се синхронизират с маркерите на мрежата, при условие $0 \leq SO \leq BO \leq 14$, да изпратят заявка за присъединяване към мрежата чрез изпращане на заявка за присъединяване до намерения PAN координатор.

При получаване на искане за присъединяване, PAN координатора стартира процедура за валидиране на заявлението. Ако PAN координатора удовлетвори искането, той решава какъв адрес (ID) да присвои на устройството и го изпраща като отговор на заявката за присъединяване съдържаща информация за мрежата (т.е. адреса на мрежата).

Ако искането за присъединяване се отхвърля, PAN координатора изпраща отговор до устройството с което го информира за отхвърлената заявка.

При получаване на отговор от PAN координатора, мрежовото устройство използва разпределения му адрес за имплементация на комуникационна мрежа. Ако отговорът на PAN координатора съдържа отказ, устройството стартира определен алгоритъм обработващ отказа за присъединяване.

Процедура по прослушване и инициализиране на процес на изключване на устройства от мрежата

Процедурата по изключване на устройства от мрежата е обратна на процедурата на присъединяване на устройства към мрежата.

PAN координаторът изтрива адреса на устройство от списъка на избраните устройства и уведомява устройството за решението за отстраняване. Алтернативно, PAN координатор прилага процедури по отстраняване, когато получи заявка за изключване от самото устройство. Чрез изпращане на уведомление от PAN координатора, устройството получава потвърждение, че искането за отстраняване е одобрено.

Процедура по предаване и приемане на команди

Процедурите по предаване и приемане на мрежови команди се използват основно за целите на управлението на мрежата. Те обикновено са невидими за потребителите. Въпреки това, някои команди изискващи намеса на потребителя няма да продължат, докато не се получат инструкции от потребителя. Поради тази причина е необходимо да има модул за обработка на изпълнението на този вид мрежови команди.

Например, когато мрежово устройство забележи, че има и друга IEEE 802.15.4 мрежа в обсега на комуникация използваща същия мрежов ID, то трябва да изпрати уведомление за конфликт до PAN координатора. В такъв случай PAN координаторът започва активно сканиране и стартира процедура по определяне на нов PAN ID чрез broadcast излъчване на команда за реинициализиране на мрежата.[134]

Друг пример е, когато мрежова система е повишила изискванията за сигурност при приемане на нови устройства. В този случай информацията за всяко устройство, изпратило заявка за присъединяване се разглежда от по-горен слой отговорен за сигурността на мрежата. Впоследствие този слой отговаря и за изпращане на команда за присъединяване или отхвърляне на устройството от мрежата.

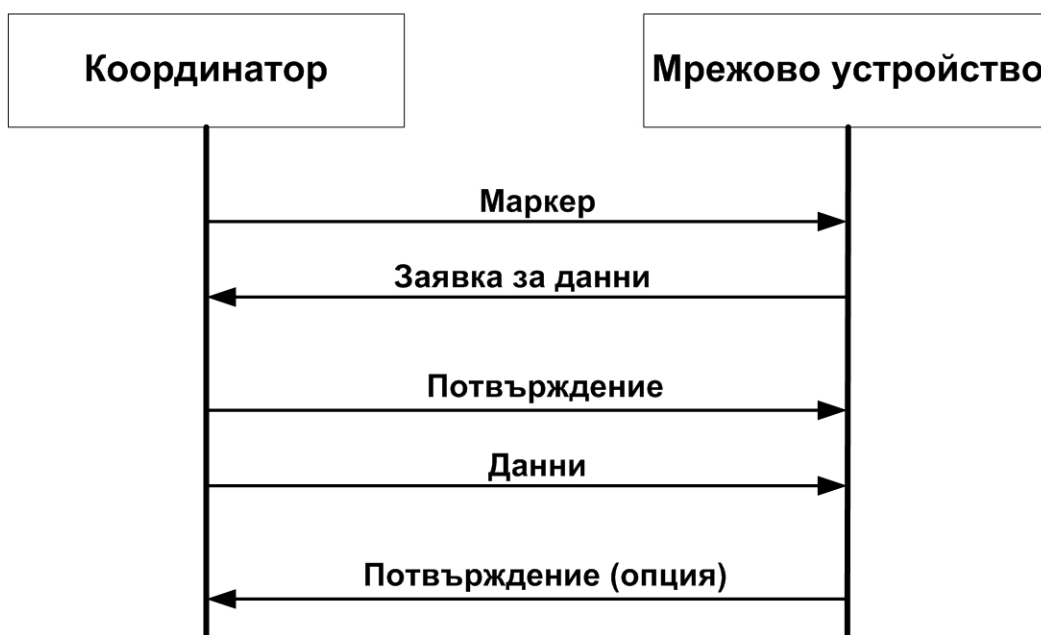
Предаване и приемане на данни

Предаването и приемането на данни при стандарта IEEE 802.15.4 се категоризира в зависимост от използването на маркери.

Фигура 17 илюстрира методите за комуникация. На практика съществуват две комуникационни направления: от координатора към мрежовото устройство и от мрежовото устройство към координатора.

Предаване на данни от координатор до мрежово устройство

Случай при мрежа с маркери е показан на фиг.17а. Когато координаторът има пакет за предаване към мрежово устройство, той съхранява данните на пакета в локалния си буфер и включва информация за пакета (адреса на дестинация) в списъка с адреси на маркера.



Фиг. 17а Процедура за изпращане на пакет с данни от координатор до мрежово устройство при мрежи с маркери базирани на стандарт IEEE 802.15.4

При получаване на маркер устройството разбира, че за него има пакет за предаване от координатора.

Съществуват две възможности за процедиране на мрежовото устройство:

- ако флагът *macAutoRequest* който разрешава или забранява MAC response mode е вдигнат (TRUE), устройството автоматично изпраща заявка за данни до

координатора използвайки слота за CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).

- ако флагът *macAutoRequest* е спуснат (FALSE), то управлението на отговора се прехвърля на процедура от приложния слой на стека и в този случай процедурата от това ниво взема решение дали да изпрати заявка за получаване на данни или не.

При получаване на команда със заявка за данни от мрежовото устройство, координаторът на първо място определя метода на изпращане на потвърждение до мрежовото устройство. Ако координаторът е в състояние да провери локалния си буфер и да определи, дали съществува пакет за това мрежово устройство, то тогава той изпраща потвърждение *macAckWaitDuration*. [134]

Ако той не е в състояние да завърши изпращането на потвърждението в рамките на необходимото време, координаторът изпраща потвърждението с включен индикатор за състояние на изчакване, настроен на 1. След изпращане на потвърждението, координаторът трябва да изпрати данните до мрежовото устройство със следващия суперфрейм.

Дължината на данните може да бъде 0, ако няма данни. При получаване на потвърждението от координатора, мрежовото устройство ще разреши на приемника си максималната продължителност дефинирана в *aMaxFrameResponseTime*. Устройството за мрежата може да върне потвърждение индикиращо успешното получаване на изпратените данни.

Предаването на данни от координатора до мрежовото устройство се извършва на база на метода за предаване на данни CSMA-CA.

Процедурата при мрежи които не поддържат маркери е показана на фиг. 17б. Ако координаторът желае да изпрати пакет с данни до мрежово устройство, той има две възможности:

- изпраща пакета данни за мрежовото устройство директно с протокол CSMA-CA,
- поставя данните в локалния си буфер и чака команда със заявка за данни от мрежовото устройство, ако мрежовото устройство е програмирано да пита координатора за данни през определен интервал.

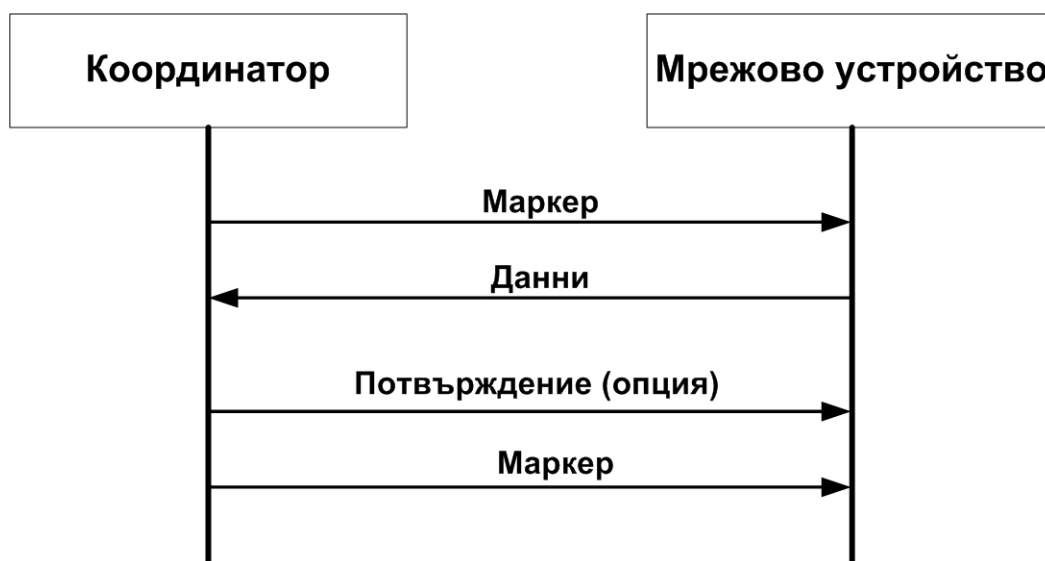


Фиг.17б Процедура за изпращане на пакет с данни от координатор до мрежово устройство при мрежи без маркери базирани на стандарт IEEE 802.15.4

Процесът за изискване на данни от координатора в мрежи, които не използват маркери е същият като в мрежите поддържащи маркери. В същото време, когато не е предвидена циклична суперфрейм структура, механизмът на изпращане на данни базиран на протокол CSMA-CA трябва да използва версията без слотове.

Предаване на данни от мрежово устройство до координатор

Предаването на данни при мрежа с поддръжка на маркери показано на фиг. 17в, като предаване се извършва, когато мрежата е в активен период съгласно фиг. 16.



Фиг.17в Процедура за изпращане на пакет с данни от мрежово устройство до координатор при мрежи с маркери.

При получаване на маркер, ако мрежовото устройство има пакет за предаване на координатора, то може да започне комуникация по време на някой от слотовете на CSMA-CA. Трябва да се гарантира, че предаването на данни до координатора включително потвърждението ще е завършено преди края на активния период. В противен случай, процедурата по предаване на данни ще бъде прекратена и ще започне в началото на следващият активен период.

При мрежи които не поддържат маркери (фиг. 17г.), ако мрежово устройство има пакети от данни, които трябва да се предадат до координатора, то може просто да започне комуникацията на база протокол CSMA-CA във версия без слотове.



Фиг.17г Процедура за изпращане на пакет с данни от мрежово устройство до координатор при мрежи без маркери

Методът на съхранение на данните в локалния буфер на координатора и изпращането им при получаване на искане от мрежовото устройство, се нарича непряко (индиректно) предаване. Непрякото предаване е проектирано за случаи, когато се изисква ниска или ултра ниска консумация на енергия от мрежовите устройства. При този метод на предаване мрежовите устройства обикновено са с изключени комуникационни блокове (приемник и предавател) за икономия на енергия. Съхраняването на данни в буфера на координатора е полезно в случаите, когато мрежовите устройства трябва да приемат команди и/или пакети с данни без да се налага да държат приемника си постоянно включен. При този вариант мрежовото

устройство се събужда и изпраща искане за получаване на данните съхранени в буфера на координатора по време на някой от активните слотове с които разполага.

Протокол CSMA-CA версия със слотове и версия без слотове.

Както бе споменато в предишната част, двата вида мрежи с маркери и без маркери използват протокол CSMA-CA при предаване на данни.

Протоколът CSMA-CA е разработен в два варианта: CSMA-CA със слотове за достъп базиран на изпращане на маркери и протокол CSMA-CA без слотове за достъп, без използване на маркери.

В таблица 4 е дадена информацията относно използваните при протокол CSMA-CA термини.

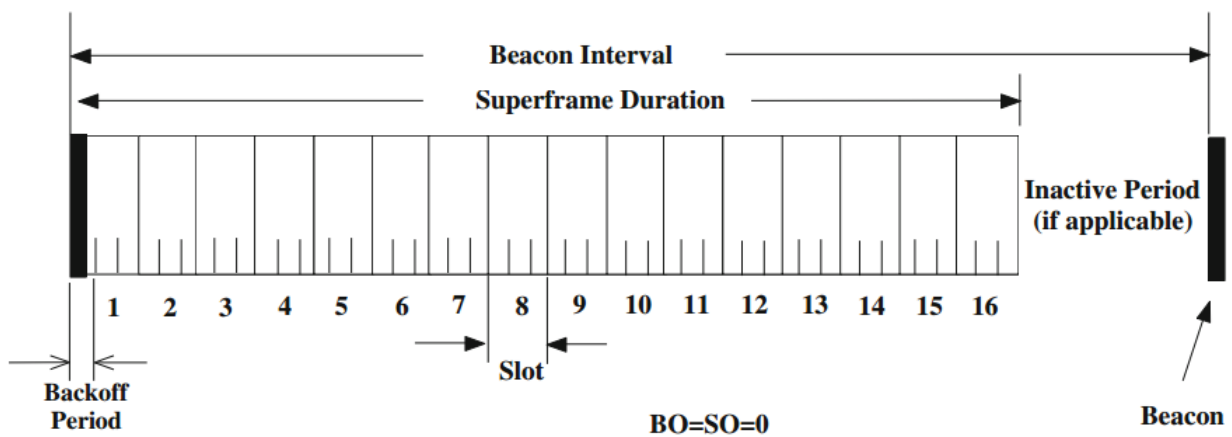
Съкращение	Значение
Unit of Backoff Period	Времето което устройство трябва да изчака преди отново да достъпи мрежата
Backoff exponent (BE)	Времето което устройство трябва да изчака преди отново да опита да предаде пакет в зает канал
<i>macMaxBE</i>	Максимална BE. По подразбиране е = 5
<i>macMinBE</i>	Минимална BE. По подразбиране е = 3
Number of Backoffs (NB)	Броя на опитите, които устройството се е опитвало да достъпи мрежата при CSMA-CA. По подразбиране е = 0.
Contention Window (CW)	Броя на backoff периодите през които канала трябва да е чист преди да започне предаване на пакета. По подразбиране е = 2
MacBattery life extension <i>macBattLifeExt</i>	Когато тази стойност е TRUE устройството ще използва MacBattery life extension period за да изчисли броя на backoff периодите.
<i>MacMaxCSMABackoffs</i>	Максималния брой опити които устройството има за да достъпи мрежата при CSMA-CA. По подразбиране е = 4
Backoff period boundary	Начало на маркер в суперфрейма

Таблица 4. Термини използвани при операции с протокол CSMA-CA

Понятието слот (slot) е валидно само за мрежи с използване на маркери.

Фигура 18 илюстрира понятието слот и кореспондиращият му back-off период в структура на суперфрейм, където $BO=SO=0$.

На фиг. 18 структурата на суперфрейма е разделена на 16 равни части, всяка от които се нарича слот. Основният елемент, който се използва, за да се локализира подходяща времева точка във всеки слот се нарича "Backoff Period" и се представя с променливата $aUnitBackoffPeriod$. Това е времето, което устройството трябва да изчака преди да влезе отново в мрежата.



Фиг. 18 Слот и Backoff Period в структура на суперфрейм където $BO=SO=0$

Тъй като броят на слотовете в суперфрейма е фиксиран на 16, в съответствие с уравнение (3) продължителността на един слот се получава като:

$$T_{SuperframeSlot} = \frac{SD}{16} = \frac{60 * 16 * 2^{SO} symbols}{16} = 60 * 2^{SO} symbols \quad (3)$$

Продължителността на един backoff period се дефинира като:

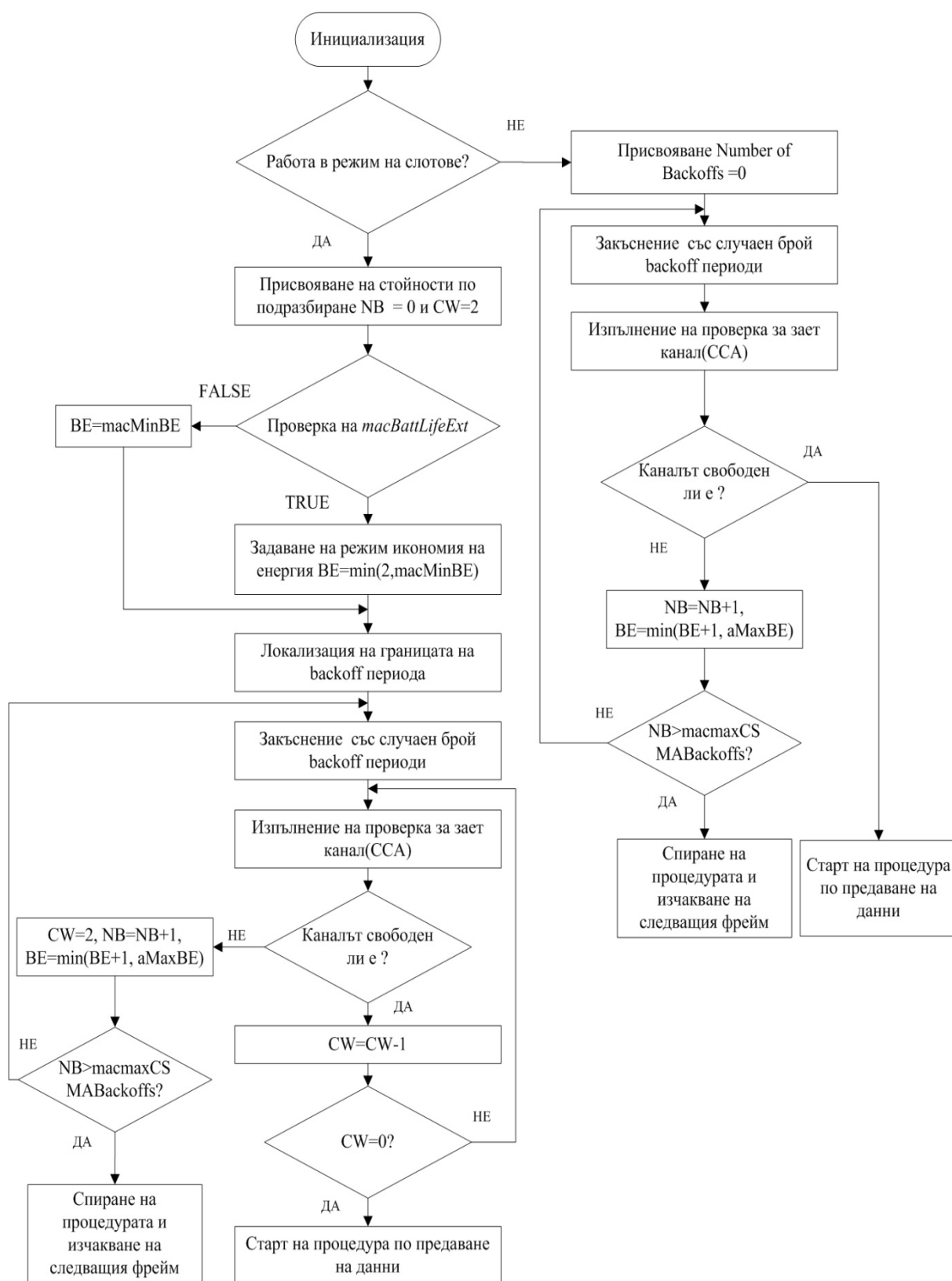
$$T_{Backoff Period} = aUnitBackoffPeriod = 20 symbols \quad (4)$$

Тогава броят на backoff периодите в един слот $N_{backoff period}$ се дефинира като:

$$N_{Backoff_Period} = \frac{T_{SuperframeSlot}}{T_{Backoff_Period}} = \frac{60 * 2^{SO} symbols}{20 symbols} = 3 * 2^{SO} \quad (5)$$

Както е илюстрирано на фиг.18, при $SO=0$, броят на backoff периодите във всеки слот е 3.

Фигура 19 илюстрира функционирането на протокол CSMA-CA.



Фиг.19 Диаграма на CSMA-CA в стандарт IEEE 802.15.4

Съгласно блок схемата на тази фигура системата първо проверява дали текущата мрежа използва слотове(slots) и маркери (beacons) при формирането си или не.

Ако системата използва слотове се стартира процедурата в лявата страна на блок-схемата.

В противен случай, се стартира вариантът на протокол CSMA-CA използващ слотове, показан от дясната страна на блок-схемата.

Последователността на операциите в режим работа на слотове е при CSMA-CA следният:

1. Инициализация на следните три параметъра:

- NB (Number of Backoffs) – количество на интервалите при които мрежово устройство се опитва да комуникира с мрежата използвайки CSMA-CA. Стойността по подразбиране е 0.

- CW (Contention Window) – дължината на прозореца се дефинира като броя на backoff периодите по подразбиране, които канала трябва да се установи преди да започне предаването. Стойността по подразбиране е 2 и се установява на 2 всеки път когато канала, който се достъпва е зает.

- BE (Backoff Exponent) – определя колко backoff периода трябва да изчака мрежовото устройство преди да опита да изпрати отново пакета, ако при предишния опит канала е бил зает.

Ако параметърът *macBattLifeExt* е зададен като FALSE, параметърът BE трябва да е равен на стойността на *macMinBE*.

В противен случай BE трябва да се инициализира с по-малката двете стойности - на параметъра *macMinBE* или 2.

2. След завършване на инициализацията на параметрите, системата локализира границата на следващия възможен backoff период (етап 1).

3. След това процесът спира за определен брой backoff периоди, произволно избран между 0 и $2^{BE} - 1$ (етап 2).

4. Когато генерираното закъснение е завърши, системата трябва да провери дали канала е свободен (CCA - Clear Channel Assessment) на границата на следващия възможен backoff период.

Стандартът IEEE 802.15.4 дефинира правилото, че преди първото случайно генерирано забавяне на текущия опит, MAC слоя трябва да се прецени дали забавянето може да завърши преди края на CAP (Contention Access Period). [133]

Ако не може да завърши, преди края на този период, системата трябва да спре брояча в края на CAP и да го възобнови в началото на следващият суперфрейм.

Ако може да завърши, системата следва да приложи backoff процедурата за закъснение. Когато процеса на backoff закъснението завърши, системата трябва отново да преизчисли дали останалата част от операциите, включително две CCA анализа, предаването на фрейма с данни и получаването на потвърждение за приемането им може да завърши преди края на CAP (Contention Access Period).

Ако MAC слоя може да изпълни тези процедури, системата трябва да започне да изпълнява CCA (Clear Channel Assessment) (етап 3).

Ако не, системата трябва да се спре и да изчака следващият суперфрейм и да повтори оценяването.

Ако каналът е оценен като зает, CW приема стойност 2. Стойността на NB се увеличава с 1. BE е се установява на по-малката от двете стойности – $BE+1$ или $macMaxBE$. Ако стойността на NB е по-голяма от $macMaxCSMABackoffs$, то опита се оценява като неуспешен. Ако не е по-голяма от $macMaxCSMABackoffs$, то процедурата се връща в точка 2.

Ако каналът е неактивен, системата трябва да се провери CW чрез изваждане 1. Ако CW не е равен на 0, процедурата изпълнява точка 3. В противен случай, MAC слоя може да започне предаването на данни на границата на следващия backoff период.

В случай че е избран случая с протокол CSMA-CA неизползващ слотове (мрежата не поддържа маркери) тръгва процедурата в дясната страна на блок-схемата:

1. Инициализират се два параметъра – NB (Number of Backoffs) и BE (Backoff Exponent).

NB приема стойност 0 а BE приема стойност $macMinBE$. След инициализацията, системата пропуска няколко backoff периода, броят на които се генерира по случаен закон в диапазона 0 и $2^{BE} - 1$ (етап 4).

След генерираното закъснение, MAC слоя изпълнява CCA Clear Channel Assessment (етап 5).

Ако каналът е оценено като зает, NB се увеличава с 1 и се избира по-малката от двете изчислени стойности – $BE+1$ или $macMaxBE$. Ако NB е по-голяма от $macMaxCSMABackoffs$, опита се счита за неуспешен. Ако не е по-голяма, то процедурата изпълнява точка 4. Ако каналът е оценен като чист, MAC слоя започва веднага предаването на данни.

Обобщение на процеса на обмен на данни в IEEE 802.15.4

Тъй като повечето от функциите, използвани в предаването на данни се капсулират в стека, разработчиците нямат достъп до реалното прилагане на механизмите, описани в стандарта. Въпреки това, е полезно да се знае какво точно прави системата. Особено важно е когато стека не може да се справи с някой от проблемите и ги връща на приложението за обработка.

Архитектура и принцип на работа на ad hoc формирана интелигентна безжична сензорна мрежа

На основата на проектирания в глава 1 на настоящия дисертационен труд безжичен сензорен модул е изградена сензорна мрежа с клъстерна топология, позволяваща измерване и контрол на параметрите на околната среда в зоната на чувствителност на сензорите. Сензорните модули са в състояние да обменят данни на разстояние до 1 km на открито и да покрият площ до 3 кв.км.

В конкретния случай всички FFD сензори на системата изпълняват функциите на координатори и имат за задача да осигурят синхронизацията при предаване на данни (в случая температура, влажност, барометрично налягане и GPS данни в NMEA формат) към други сензори и/или координатори.

В рамките на сензорната система едно от FFD устройствата, което е избрано за главен координатор формира първия клъстер чрез присвояване на PAN идентификатор. В процеса на формиране на мрежата се дефинира CH (Cluster Head) с клъстерен идентификатор CID (Cluster Identifier) и се стартира broadcast на съобщения за присъединяване [1][8].

FFD сензорите, които могат да приемат съобщения подават заявка за присъединяване към клъстера. PAN координатора одобрява заявката на всеки нов сензор, добавя го към

списъка си за neighbour сензори, изпраща потвърждение към добавения сензор, който започва също да извършва beacon broadcast [10][23]. Други сензори намиращи се в обхвата на broadcasting-a по същия начин се присъединяват към системата. Ако няма възможност текущото устройство да се добави към хедъра (CH) на текущия FFD сензор, то започва търсене на друг FFD сензор в обхвата си.

PAN координаторът може да инструктира някое от устройствата да генерира CLN и да стане координатор на друг нов клъстер. Това се извършва чрез специално приложение, което има отговорност за генериране на нови клъстери на база предварително дефинирани критерии.

След свързване на всички налични сензори се формира клъстерно дърво, състоящо се от множество клъстери с mesh топология. Основното предимство на тази архитектура на сензорна мрежа е че е ad-hoc, самоорганизираща се и в определени граници се самоподдържа.

Структура на ZigBee стека

Стандартът IEEE 802.15.4 дефинира механизъм за реализация на безжичната комуникация характеризираща се с ниска скорост на данните и ниска консумация на енергия поддържащ само топологии звезда и peer-to-peer.

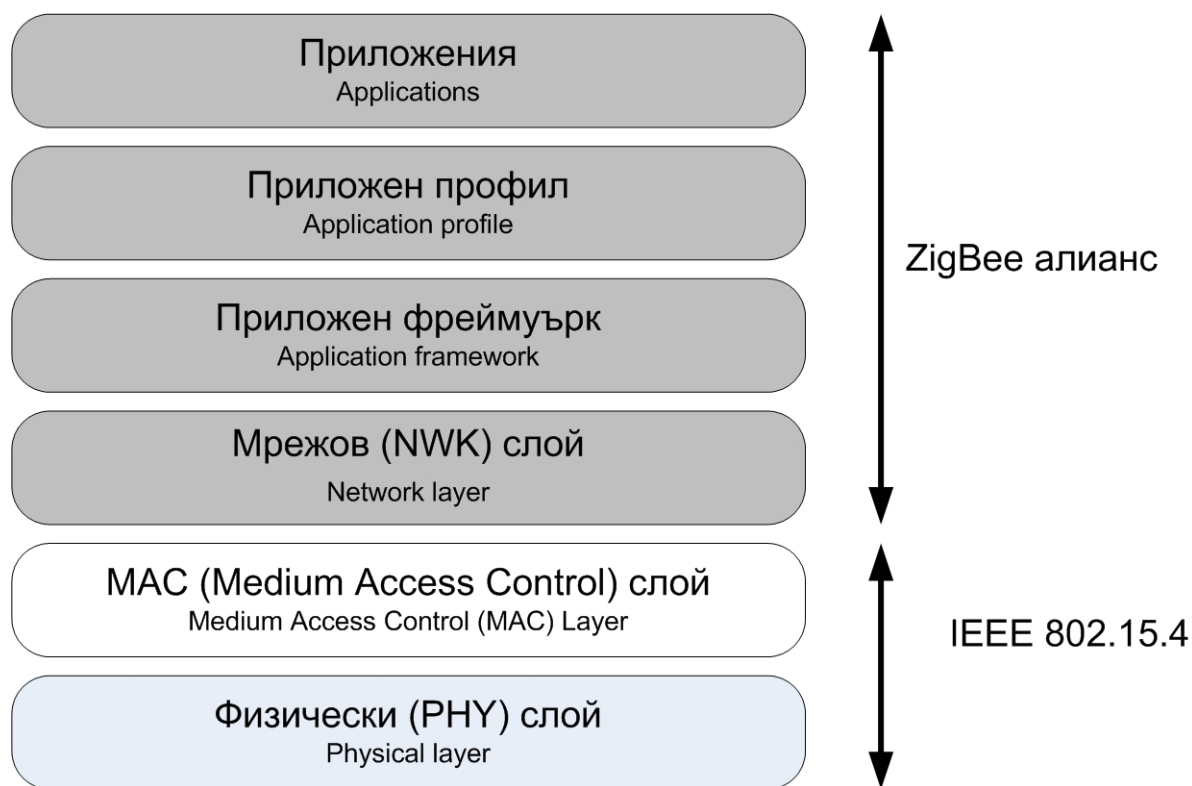
Технически, като стандарт IEEE 802.15.4 се фокусира основно върху развитието на PHY и MAC слоя, подходящи основно за безжична комуникация, а не за изграждане на големи по мащаб мрежи [31].

Спецификацията на ZigBee е създадена през 2004 г. от ZigBee Alliance, за да се дефинират спецификации за изграждане на големи безжични мрежи надграждащи съществуващия IEEE 802.15.4 стандарт, което специфицира само PHY и MAC слоевете, подходящи за формиране на малки мрежи като LR-WPAN (Low Rate – Wireless Personal Area Network) [94] [138].

ZigBee спецификацията дефинира стек, състоящ се от мрежов и security слой (NWK) и приложни слоеве показани на фиг. 20.

Разработчиците могат да създават свои собствени профили или да се интегрират с публични профили, предоставени от ZigBee Alliance. Публично достъпните ZigBee профили обхващат умна (smart) енергия, сградна автоматизация, домашна и болнична здравна мрежа, телекомуникационни приложения, битова електроника, мониторинг и контрол на индустриални процеси и др.

Спецификацията ZigBee е фокусирана основно към ниска скорост, ниска цена, ниска сложност, ниска консумация на енергия и лесна реализация.



Фиг. 20 IEEE 802.15.4 и ZigBee стек

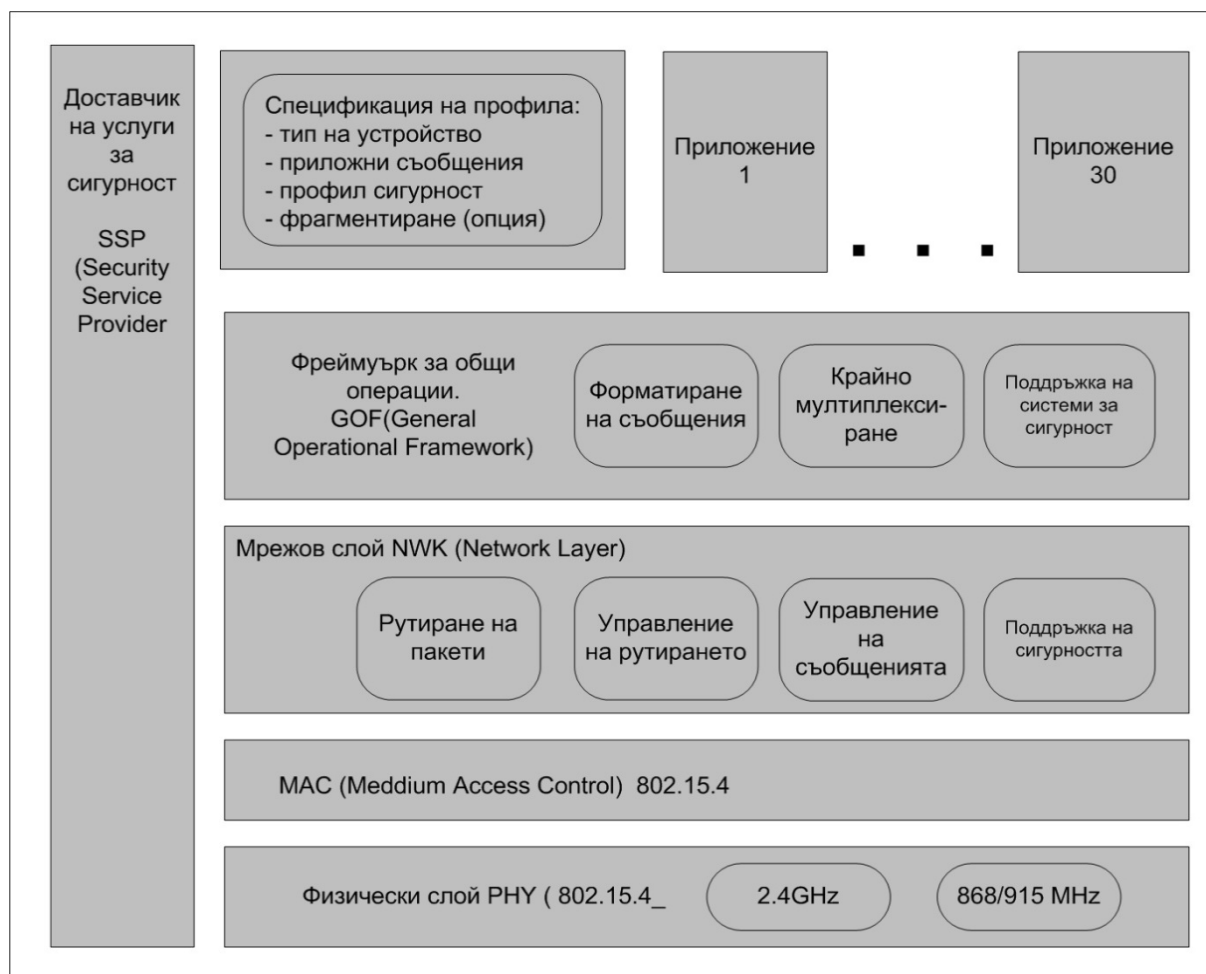
Фигура 20 илюстрира архитектурата на стека ZigBee, който е разделен на три основни секции:

- секция IEEE 802.15.4, която се състои от MAC и PHY слоеве.
 - секция ZigBee, състояща се от мрежов слой (NWK), подслой за поддръжка на приложения (APS), мениджмънт на сигурността и обект на ZigBee устройство (ZDO ZigBee Device Object), който може да има до 240 отделни обекта на приложения. В този слой се дефинират се входната и изходната точка на обекта и ZDO извършва контрол и управление на обектите.
 - секция ZigBee, в които разработчиците могат да използват профилите на ZigBee за да разработят свой собствен профил. Структурата на ZigBee стека е показана на фиг. 21.
- В спецификацията ZigBee, мрежовите устройства са категоризирани в три основни вида: ZigBee координатор, ZigBee рутер, и ZigBee крайно устройството. ZigBee координаторът е същевременно и PAN координатор съгласно IEEE 802.15.4, който е

FFD (Full Function Device). По аналогия с 802.15.4 всяка ZigBee базирана мрежа може да има само един ZigBee координатор [59].

ZigBee Координаторът трябва да има технически ресурс да извършва избор на разположение канал и да генерира мрежови идентификатори с 16-битова дължина за създаването на нова мрежа.

По подразбиране процесът за формиране на мрежа започва от ZigBee координатора и той поема отговорността като първо устройство за приемане и присъединяване на нови устройства и за генериране и разпределение на мрежовите адреси в мрежата [72].

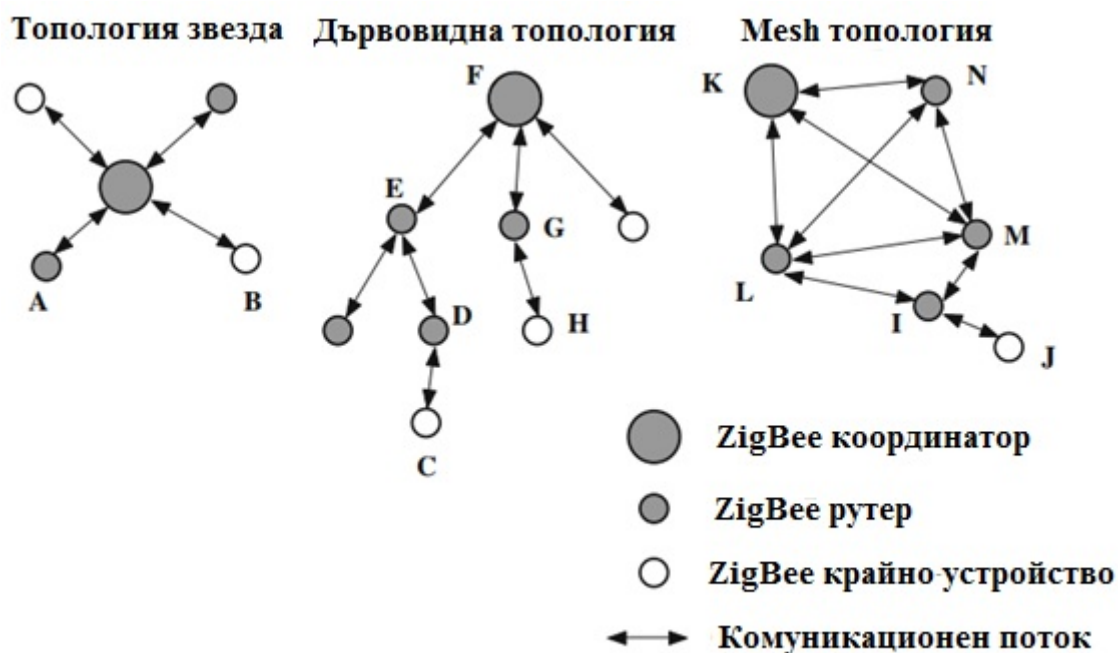


Фиг. 21 Структура на ZigBee стека

ZigBee рутера е IEEE 802.15.4 FFD (Full Function Device) и ролята му е да осигурява възможности избор и разширяване на съществуваща мрежа, както и да изпълнява функции по присъединяване на други устройства намиращи се извън обсега на комуникация на ZigBee координатора. ZigBee рутерите на практика изграждат гръбнака (backbone) на мрежата чрез прилагане на протоколи за маршрутизация.

Крайното ZigBee устройство може да бъде IEEE 802.15.4 FFD (Full Function Device) или RFD (Reduced Function Device). В общия случай крайните устройства са разположени по периферията на мрежата и работят основно като сензорни модули и рядко изпълняват маршрутизиращи функции.

Спецификацията ZigBee надгражда стандарта IEEE 802.15.4 и използва неговите MAC и PHY слоеве. При ZigBee се поддържат мрежови топологии звезда, дървовидна топология, mesh топология чрез разширения на поддържаната от IEEE 802.15.4 peer-to-peer топология [94].



Фиг. 22 Мрежови топологии при ZigBee спецификацията

Топология звезда.

Показаната на фиг. 22 топология звезда се реализира най-лесно. При тази топология на ZigBee координаторът е централен възел на мрежата, останалите ZigBee устройства, включително ZigBee рутери и ZigBee крайни устройства е необходимо да са свързани със ZigBee координатора за да работят в мрежа.

Тази топология не е подходяща за по-големи приложения, поради ограничението всички устройства в мрежата да са в обсега на комуникация на ZigBee координатора, т.е. устройства намиращи се извън неговия обхват не могат да бъдат свързани в мрежа.

Друг основен недостатък на тази топология е че при отказ на ZigBee координатора мрежата се разпада. При топология звезда мрежовите устройства не могат да комуникират директно без посредничеството на ZigBee координатора.

Дървовидна топология

Дървовидната топология е относително по-гъвкава в сравнение с топология звезда. Нейното изграждане не е ограничено от обсега на комуникация на ZigBee координатора и може да бъде разширена с помощта на ZigBee рутери.

Критериите за формиране на мрежа с дървовидна структура са:

- крайно устройство може да се присъедини към мрежата посредством ZigBee рутер, който от своя страна може да се свърже към дървото на мрежата чрез друг ZigBee рутер (ZigBee координатора също може да работи като рутер).
- Характерното при тази топология е че ZigBee рутера може да комуникира с крайни устройства или други ZigBee рутери като негови под-устройства, които се наричат деца. Крайно устройство не може да има деца. Поради тази причина крайно устройство не може да бъде родител. Например, както е показано на фиг.22, ако устройство С трябва да изпрати съобщение на устройството Н, съобщението трябва да бъде изпратено до устройство F чрез преминаване през устройства D и E. След това устройство F изпраща съобщението до устройство Н чрез устройство G. Критерият е че съобщението трябва да преминава от възела източник на дървото до най-близкия общ родител и след това надолу по дървото до крайния възел. Недостатък на тази топология е, че не съществува алтернативен маршрут за обмен на данни, ако някоя от връзките по маршрута откаже. Въпреки това, прилагането на този тип протокол за маршрутизация е сравнително лесно, тъй като всяко устройство поддържа таблица със списък на родителските връзки на дървото и съобщението преминава от възела майка или към възела на дете, който сочи към възела дестинация.

Mesh топология

Mesh топологията има подобна структура като дървовидната, но е чувствително по-гъвкава. При тази топология всички рутери имат право да комуникират помежду си, без да е необходимо да се изпраща съобщение първо до устройството родител. Например на фиг. 22, ако устройство J трябва да изпрати съобщение на устройство K, възможните маршрути могат да бъдат J-> I-> L-> K или J-> I-> M->K или J->I->M->N->K или J-> I-> L-> N-> K и т.н.

При отказ на някое устройство и провал на даден маршрут съобщението може да достигне до крайната си точка по алтернативни маршрути [123].

Адресна архитектура на ZigBee

Спецификацията на ZigBee дефинира мрежова адресация наречена "Cskip", която не е специфицирана в стандарта IEEE 802.15.4.

При тази адресация, капацитета на мрежата т.е. броя на наличните 16-битови адреси в топология тип дърво се определя от четири параметъра:

- C_m – Броят на децата, които всяко родителско устройство може да има.
- R_m – Броят на децата рутери, които всяко родителско устройство може да има.
- L_m – Максималната дълбочина на мрежата (нивото при което родителско устройство не може да има деца)
- d – актуалната дълбочина на конкретно устройство.

Горните четири параметри се съхраняват в информационната база данни на мрежата на координатора. ZigBee Координаторът присвоява блок от адреси за всеки рутер въз основа на максималния брой на децата C_m . Разрешеният брой на крайните устройства, приети от рутер устройство се изчислява като:

$$\text{MaxEndDevices} = \text{MaxChildren} - \text{MaxRouters} = C_m - R_m \quad (6)$$

Когато един ZigBee рутер успешно се присъединява към мрежа, родителското устройство към което се присъединява, разпределя група адреси за негова употреба като по този начин присъединения ZigBee рутер се превръща в потенциален родител.

Всеки присъединен ZigBee рутер може да приеме определен брой устройства деца, чийто брой не може да надвишава C_m . Присъединяването на новия рутер се счита за разширяване на дълбочината на мрежата и дълбочината не трябва да бъде по-голяма от L_m . Ако крайно устройството успешно се присъедини към мрежа, на него ще бъде

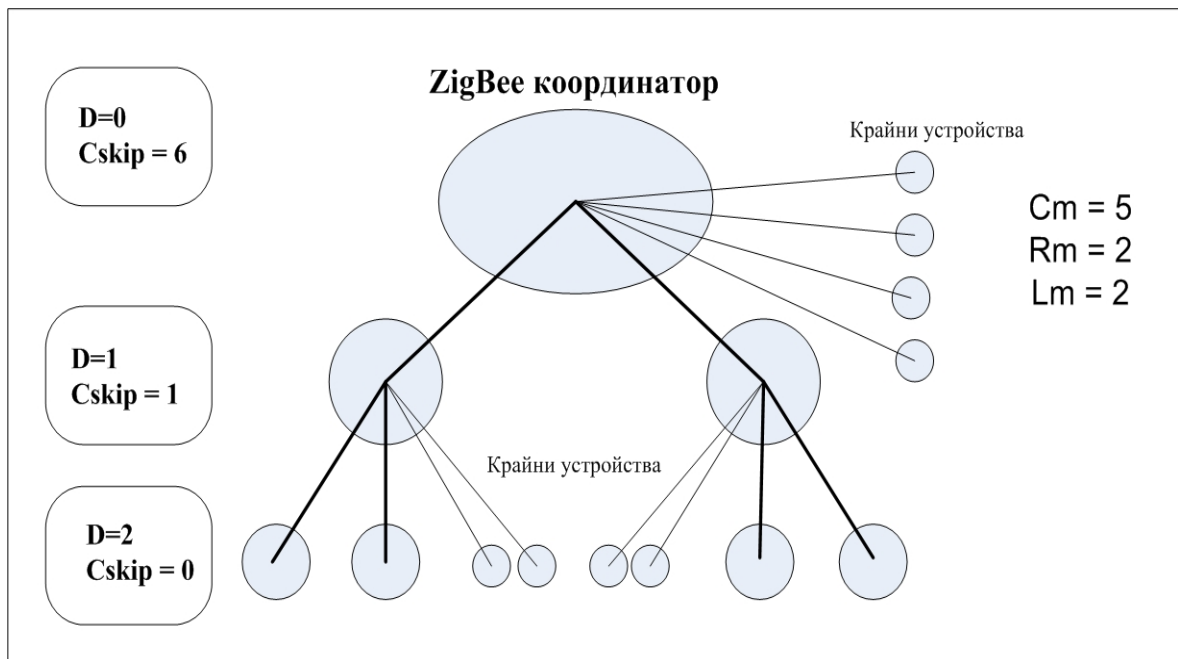
разпределен адрес на мрежата от неговото родителско устройство. Присъединени крайни устройства не могат да приемат нови деца устройства.

Cskip е методът за изчисляване на общия брой на възможните наследници, които съществуват за определяне на всеки клон в мрежата. Той се определя, както следва:

$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + C_m \times (L_m - d - 1) & \text{if } R_m = 1 \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m \times R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m} & \text{if } R_m > 1 \end{cases} \quad (7)$$

Фигура 23 илюстрира процеса на разпределение на адреси с параметри $C_m = 5$; $R_m = 2$; и $L_m = 2$.

Съгласно формула(7), $Cskip(0)$, $Cskip(1)$, and $Cskip(2)$ са получили стойности 6, 1 и 0 респективно. $Cskip(0)$ е максималния възможен брой от потомци лежащи под всеки клон на ZigBee рутер от координатора. $Cskip(1) = 1$ означава че всеки клон от започващ от рутер може да има максимално един потомък. $Cskip(2) = 0$ означава че всеки рутер на това ниво не може да има потомци.



Фиг. 23 Разпределение на адреси по метода Cskip

Общият брой на потенциални възли в мрежата може да се изчисли, както следва:

$$Node_{total} = Cskip(0) \times R_m + (C_m - R_m) + 1 \quad (8)$$

Съгласно уравнение (8), общият брой на възли на фиг. 22 се получава като $6 * 2 + 5 - (2) + 1 = 16$, в който се включва и ZigBee координатора.

Промяната на параметрите C_m , R_m и L_m води до промени в максималния брой възли в мрежата. На всяко ZigBee устройство се присвоява 16-битов адрес от ZigBee координатора или ZigBee рутера, когато се присъедини към ZigBee мрежа. Следователно максималният брой мрежови възли във всяка ZigBee мрежа е $2^{16} = 65535$. $Cskip(d)$ се използва и като стойност на отместването за задаване на адреси за маршрутизатори и техните крайни устройства. Ако приемем, че на адреса на ZigBee координатора е фиксиран, то адреса на първия рутер R_1 е равен на адреса на ZigBee координатора +1.

Следното уравнение се използва за присвояване на адрес към рутера R_n :

$$R_n = R_1 + (n - 1) \times Cskip(d) \quad (9)$$

където d е дълбочината на мрежата на горното ниво, т.е. нивото на ZigBee координатор.

По същия начин, всеки ZigBee рутер родител присвоява адрес на всеки от своите потомци. Например, рутер R_1 първоначално възлага обръщение към едно от децата си, което е една с 1 по-голямо от собственото му адрес. След това той използва $Cskip(d+1)$, като стойност на отместването присвояване на адреси на другите деца, свързани с него. Останалата част от ZigBee рутерите използват същата процедура.

Друг метод за присвояване на адреси се използва от ZigBee PRO.

При този метод се предлага стохастичен адрес. Това означава, че на всеки възел, когато се присъедини към мрежата, се определя случаен номер от 0 до 65,536 като адрес. Ако новият адрес на възел е бил използван за вече съществуващо устройство, ще се генерира съобщение за конфликт и адреса ще бъде сменен с друг отново на случаен принцип.

ZigBee механизми за управление

Основното предимство на стандарта ZigBee е неговият ефективен механизъм за управление на приложния слой.

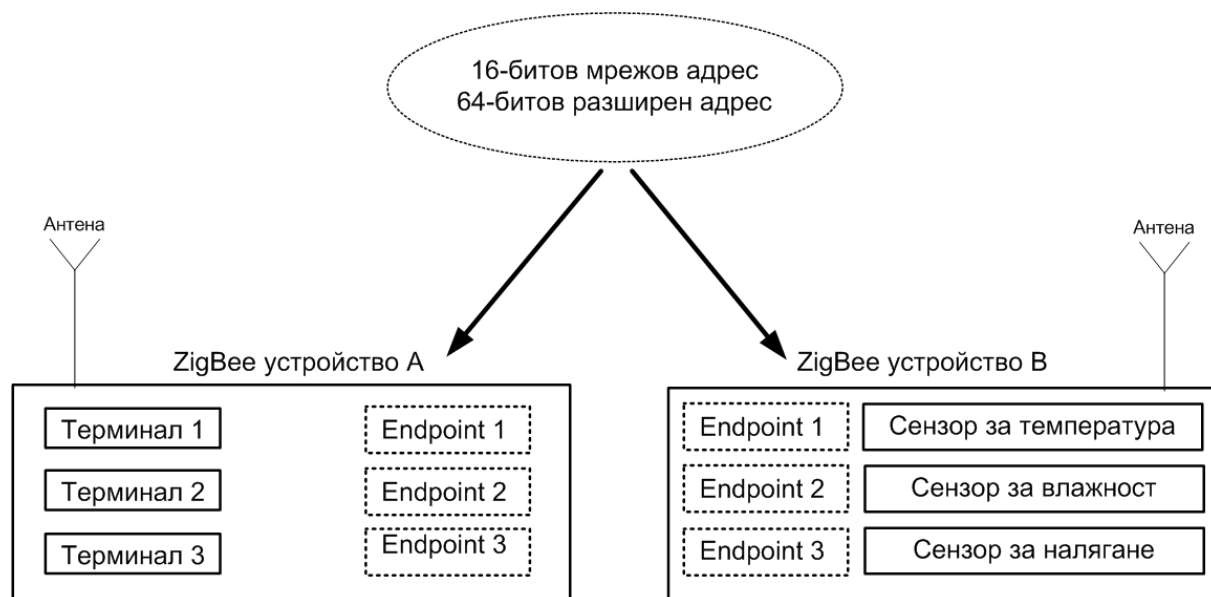
Дефиницията за механизма за управление на ZigBee се състои от механизми за управление на адрес(address management), механизъм за управление на профил(profile management), механизми за откриване на устройства и услуги(device & service discovery) и механизми за свързване. [138]

Управление на мрежови адреси при ZigBee

Тъй като стандартът IEEE 802.15.4 се използва за изграждане на най-долния слой (PHY и MAC) на ZigBee стека, една ZigBee базирана мрежа може да използва 16-битов мрежов адрес и 64-битов разширен адрес.

Въпреки това, те не са достатъчни, за да се идентифицират множество обекти, които споделят един и същ физически адрес. Поради тази причина в ZigBee спецификацията, се използва концепцията на Endpoint адресирането за да се реши този проблем.

Фигура 24 илюстрира използването на Endpoint адресиране в ZigBee мрежа, състояща се от две ZigBee устройства А и Б които трябва да комуникират едно с друго. Устройство А има три терминала, които кореспондират с три сензора на устройство В съответно. Ако терминал 1 на устройство А желае да установи комуникация с датчика за температура на устройство В, той може да поиска устройство А да установи безжична комуникационен канал с устройство В, като използва своя IEEE 802.15.4 64-битов разширен адрес или 16- битовия адрес на мрежата.



Фиг. 24 Управление на мрежови адреси при ZigBee

Проблемът е как да се направи устройство В да разбере, че съобщението е за сензора за температура, а не за някой от другите два сензора. Спецификацията на ZigBee

дефинира адресация на субниво наречена Endpoint, за да помогне на системата да различава множество обекти, съществуващи на едно физическо устройство.

Endpoint е един вид категоризация, която на практика съществува в стека. Всяко ZigBee устройство може да поддържа до 240 виртуални обекти (Endpoint 0 се използва за управление). Всеки виртуален обект има своя собственост и може да бъде независим от други обекти. Ако инициатора на съобщението специфицира крайната точка, която търси, ZigBee стека работещ на крайното устройството може лесно да намери обекта. Концепцията на Endpoint в ZigBee спецификацията е много полезна, особено за безжични сензорни мрежи където всеки възел в болшинството от случаите е оборудван с повече от един сензор за наблюдение и измерване.

АНАЛИЗ И АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМИТЕ ПО ТЕМАТИКАТА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В момента съществуват стотици компании произвеждащи умни (smart) сензори с някаква степен на интелигентност. Лидери в тази област са Texas Instruments USA, BOSH Germany, PHILIPS и др.

Компании като LIBELIUM, SENSORTECH и др. интензивно разработват нови smart сензорни модули с различни функционалности и процесорна мощ.

Поради редица причини има тенденция производителите на сензори да разработват все "по-умни", но не и по-интелигентни сензори. Като правило елементите на интелигентност се изнасят извън сензорните модули и сензорните мрежи с цел намаляване на себестойността на тези продукти и тази тенденция има своите предимства и недостатъци.

В редица случаи въпреки интензивното развитие на комуникационните технологии и тенденцията за осигуряване на ширококолов достъп до всяка точка на планетата е технически и икономически целесъобразна разработката на методи и средства за съществено редуциране на трафика в сензорните мрежи за сметка на повишаване на себестойността и сложността на изработка на сензорните модули изграждащи тези мрежи. Често обстоятелствата налагат създаване на сензорни модули с повишена автономност по отношение на вземане на решения и анализ на данни.

Граници на изследването

Проблемът с интегрирането на данни е граничен проблем за много научни области свързани с обработката и анализа на големи масиви от данни (big data).

Решаването на проблеми свързани с ефективното интегриране на данни може да стимулира развитието на нови поколения експертни системи и системи за автоматизирано управление базирани на изкуствен интелект. Пътят за решаването на тези проблеми води до създаване на хардуерни и софтуерни средства, методи и алгоритми позволяващи многослойно интегриране на данни получени от интелигентни сензорни мрежи и системи от мрежи.

Изводи

В литературата е описано голямо многообразие от сензори, сензорни модули (жични и безжични) и сензорни мрежи.

Концепцията на IoT (Internet of Things) и т.н. умни (smart) сензори добива все по-голяма популярност и навлиза все повече в промишлеността и бита на хората.

Налице са предпоставки за разработка на следващо поколение сензори, сензорни модули и сензорни мрежи базирани на все по-бързото навлизане на високите технологии и миниатюризацията на електронните устройства.

Терминът умен (smart) сензор вече се измества от термина интелигентен (intelligent) сензор дефиниращ появата на ново поколение сензорни модули.

Концепцията за интелигентният сензор включва в себе си структурата на умен (smart) сензор и я допълва с елементи на интелигентност под формата на адаптивни алгоритми за управление и анализ на данни и мини експертни системи. Интелигентният сензор е в състояние да анализира, контролира и адаптивно да управлява своите блокове с цел по-ефективна работа и по-голяма производителност. Освен с механизми за self-test и self-calibration интелигентните сензори разполагат с достатъчна изчислителна мощ да анализират и обработват в реално време данните от сензорните си блокове. Те разполагат с функционалност за самостоятелно вземане на решения свързани с надеждността и точността на измерените данни, както и с възможности за комуникация с други интелигентни сензорни модули свързани в мрежа с цел колективно решаване на оптимизационни проблеми свързани с маршрутизацията на данните, оптимизация на консумацията на енергия на група сензори и др.

Все по-основен е въпроса касаещ не количеството а качеството на измерените данни. Поради тази причина все по-голяма популярност добива вграждането в интелигентните сензори на алгоритми за децентрализирано интегриране на данни позволяващо съществено редуциране на трафика в рамките на една сензорна мрежа или система, а от там и икономия на енергия при предаване на тези данни и удължаване на периода на автономна работа на сензора.

Интегрирането на данните получени от обединени в сензорна система сензорни мрежи позволяват решение на широк кръг задачи, като глобален анализ на климатичните промени в краткосрочен и дългосрочен план, анализ на пътния трафик в големи мегаполиси като Ню Йорк, Москва, Мексико и др.

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.

Въз основа на направения обзор и анализ на проблематиката на дисертационния труд е формулирана следната обща цел:

Основна цел на дисертационният труд е разработка на нови методи, алгоритми, хардуерни и софтуерни средства за интегриране на данни от интелигентни сензорни системи.

За постигане на поставената цел са формулирани следните общи задачи:

1. Разработка на безжичен сензорен модул за мониторинг и интелигентна обработка на данни за околната среда.
2. Разработка на метод и алгоритъм за оптимизация на консумация на енергия от сензорен модул.
3. Разработка на архитектура и подход за генериране на интелигентна безжична сензорна мрежа .
4. Разработка на алгоритъм за децентрализирано интегриране на сензорни данни.
5. Разработка на архитектура на софтуерна платформа за интегриране на данни от интелигентни сензорни мрежи и системи.

МЕТОДОЛОГИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Методологията на настоящите изследвания се основава на фундаментални и приложни разработки от следните области:

Интегриране на данни

- Филтър на Калман (Kalman filter)
- Разширен филтър на Калман (Extended Kalman filter)
- Централна Гранична Теорема (Central Limit Theorem)
- Уравнения на Fraser-Potter

Алгоритми и протоколи за формиране и управление на безжични сензорни мрежи

- Weighted Clustering Algorithm (WCA)
- Unicast, Anycast and Broadcast Duty cycling algorithms
- 6LoWPAN протокол
- IEEE 802.15.4 ZigBee протокол

Програмни езици и платформи

- Програмен език C
- Език от високо ниво WSDL
- Framework WSO2 Carbon SOA

СТРУКТУРА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯТ ТРУД

По същество дисертационният труд се състои от увод включващ литературен обзор на основните резултати в областта , 3 глави описващи етапите на решаване на проблеми свързани с интегриране на данни от хетерогенни безжични сензорни мрежи и системи и заключение.

Литературния обзор е фокусиран върху съществуващото състояние на сензорните и мрежови технологии.

Глава 1 е посветена на създаването (хардуерна и софтуерна архитектура) на безжичен интелигентен сензорен модул с достатъчна процесорна мощност за изпълнение на задачи свързани с локално интегриране на сензорни данни и вграждане на адаптивни алгоритми..

В глава 2 на дисертационният труд се описва създаването на подобрени методи и алгоритми за интегриране на сензорни данни, като и методи и алгоритми касаещи процесите на формиране, измерване и комуникация между сензорни възли в ad hoc формирани безжични сензорни мрежи.

Глава 3 е посветена на разработка на архитектура на SOA базирана софтуерна платформа за интегриране на данни от интелигентни сензорни мрежи и системи от мрежи..

В заключението са дадени в резюме постигнатите резултати от изследванията и приложените разработки описани в глави от 1 до 3.

Дисертационният труд се състои от 165 страници и съдържа 14 таблици, 32 формули и 65 фигури. Списъкът на използваната литература включва 151 библиографски източника.

1. РАЗРАБОТКА НА СЕНЗОРЕН МОДУЛ ЗА МОНИТОРИНГ И ИНТЕЛИГЕНТНА ОБРАБОТКА НА МЕТЕОРОЛОГИЧНИ ДАННИ И ВЪЗМОЖНОСТ ЗА БЕЗЖИЧНА КОМУНИКАЦИЯ.

В настоящата глава е описана разработката на интелигентен сензорен модул за мониторинг на метеорологични данни. Модулът описан в тази глава е основна платформа за тестване на алгоритмите за интегриране на сензорни данни описани в глава 2.

На база разработката на безжичния сензорен модул за метеорологични данни, описана настоящата глава от дисертационния труд е направена и заявка за патент No.112400/17.10.2016

1.1 РАЗРАБОТКА НА ХАРДУЕРНА АРХИТЕКТУРА НА БЕЗЖИЧЕН СЕНЗОРЕН МОДУЛ ЗА МОНИТОРИНГ НА МЕТЕОРОЛОГИЧНИ ДАННИ

Интелигентният безжичен сензорен модул е съставен от четири основни компонента:

Сензорен блок - група от 3 основни сензора измерващи температура на въздуха , влажност на въздуха и барометрично налягане. От функционална гледна точка към групата от 3 основни сензора се причислява и GPS блока, тъй като същият има сензорни функции по отношение на измерване на текущите GPS координати на модула.

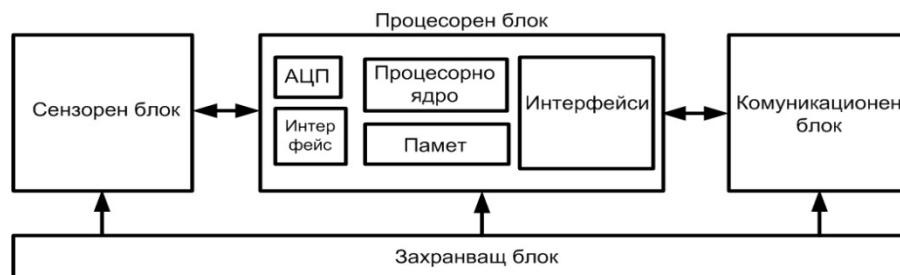
Процесорен блок - едночипов микроконтролер тип SOC(System on Chip), външна оперативна и външна енергонезависима памет. Този блок е отговорен за целия процес на събиране и обработка на данните от сензорния блок. В процесорния блок са заложили алгоритми управляващи цялостната работа на сензорния модул в зависимост околната среда и намиращи се около него други сензорни модули. Освен функции за събиране и обработка на сензорна информация, в процесорният блок на модула са предвидени алгоритми за self test и самоконтрол, адаптивни алгоритми за маршрутизация на данни, алгоритми за ad hoc изграждане на сензорни мрежи, алгоритми за анализ, валидиране и интегриране на измерените от сензорите данни и други функционалности.

Комуникационен блок – комбинация от електронни компоненти и софтуер с функционалност за предаване на данни измерени от сензорите в сензорния блок и прием на команди свързани с работата на сензорния модул.

Захранващ блок: комбинация от електронни компоненти и софтуер с цел управление на един или няколко източника на енергия необходими за нормалната работа на

сензорния модул. В конкретния случай захранващият блок работи под управлението на специален адаптивен алгоритъм за икономия на енергия.

Блок-схемата на разглеждания интелигентен сензорен модул е показана на фиг. 25

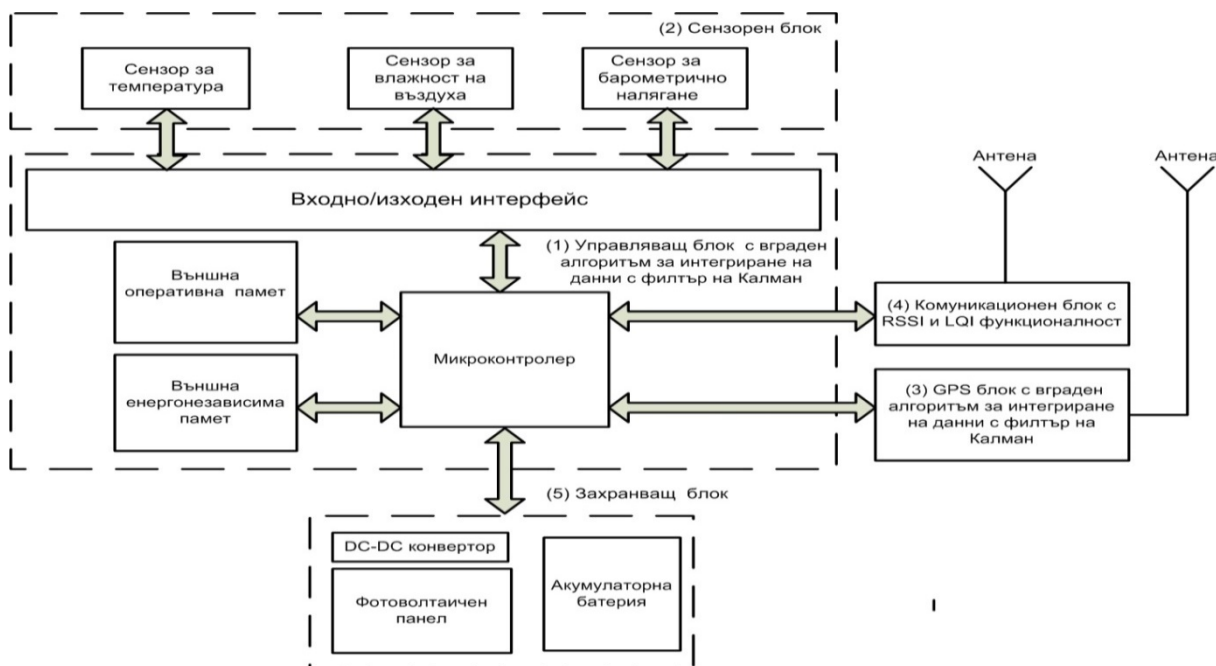


Фиг. 25 Блок-схема на интелигентен сензорен модул

Избраната за конкретната разработка хардуерна архитектура е базирана на разпространената концепция на използване на едночипов микроконтролер с вградена оперативна памет, външна енергонезависима памет и шини за обмен на данни за които са свързани всички периферни за контролера устройства - сензори, комуникационни модули, захранващи блокове и др.

Захранването на разработения сензорен модул е автономно на базата на LiON акумулаторна батерия в комбинация със соларен панел вграден в корпуса.

Функционалната блок-схема на сензорния модул за мониторинг на метеорологични данни е показана на фиг.26



Фиг. 26 Блок схема на сензорен модул за мониторинг на метеорологична информация

1.1.1 Избор на микроконтролер и външна енергонезависима памет.

Избор на микроконтролер

Техническите изисквания към сензорната система - брой сензори, обем и скорост на обработваните данни, наличие или не на операционна система са определящи за избора на микроконтролера и паметта.

В конкретния случай ключовите изисквания към микроконтролера са: ниска консумация на енергия, наличие на достатъчен обем вътрешна оперативна (RAM) и енергонезависима (FLASH) памет, относително висока тактова честота и поддръжка на комуникационни протоколи USART, I²C и SPI необходими за комуникация със сензорите.

На Таблица 6 е показано сравнение между най-използваните в момента на разработката сензорни модули, фамилии микроконтролери, сравнени по следните ключови показатели:

	ARM	8051	AVR	PIC	MSP430
Bus Width	32-bit mostly also available in 64-bit	8-bit for standard core	8/32-bit	8/16/32-bit	16-bit
Communication Protocols	UART, USART, LIN, I2C, SPI, CAN, USB, Ethernet, I2S, DSP, SAI (serial audio interface), IrDA	UART, USART, SPI, I2C	UART, USART, SPI, I2C, (special purpose AVR support CAN, USB, Ethernet)	PCI, UART, USART, LIN, CAN, Ethernet, SPI, I2S	UART, USART, LIN, I2C, SPI, I2S, IrDA
Speed	1 clock / instruction cycle	12 clock / instruction cycle	1 clock / instruction cycle	4 clock / instruction cycle	6 clock / instruction cycle
Memory	Flash, SDRAM, EEPROM	ROM, SRAM, FLASH	Flash, SRAM, EEPROM	SRAM, FLASH	SRAM, FLASH
ISA	RISC	CISC	RISC	Some feature of RISC	Some feature of RISC
Memory Architecture	Modified Harvard architecture	Von Neumann architecture	Modified Harvard	Harvard architecture	Von Neumann architecture
Power Consumption	Low	Average	Low	Low	Ultra Low
Families	ARMv4,5,6,7 and Cortex series	8051 variants	Tiny, Atmega, Xmega, special purpose AVR.	PIC16, PIC17, PIC18, PIC24, PIC32	MSP430X, MSP430FR57xx, MSP430x1xx to x6xx series
Community	Vast	Vast	Very Good	Very Good	Average
Manufacturer	Apple, Nvidia, Qualcomm, Samsung Electronics, and TI, etc.	NXP, Atmel, Silicon Labs, Dallas, Cyprus, infineon, etc	Atmel	Microchip	TI
Cost (as compared to feature provided)	Low	Very Low	Average	Average	Average
Other Feature	High speed operation	Known for its Standard	Cheap, effective	Cheap	Known for Ultra low power operation
Popular Microcontrollers	LPC2148, ARM Cortex-M0 to ARM Cortex-M7, etc	AT89C51, P89v51, etc	Atmega8, 16, 32, Arduino Community	PIC18XXX, PIC16F88X, PIC32MXXX	MSP430G2553, MSP430 launchpad.

Таблица 6 Сравнение между фамилии микроконтролери

Въз основа на направените проучвания на техническата документация на основните фамилии микроконтролери, и реализирани бенч марк тестове със закупени от производителите развойни системи на съответните микроконтролери, могат да се направят следните изводи:

- ARM – характеризира се с голяма процесорна мощ (1-clock instruction cycle и 32/64 битова шина), подходящ за приложения за контрол на процеси в реално време изискващи бърза скоростна обработка на данните. Наличие на поддръжка на широк набор комуникационни протоколи (UART, USART, LIN, I2C, SPI, CAN, USB, ETHERNET, I2S, DSP, SAI и IrDA), богата периферия (ADC, PWM и др.) и относително ниска консумация на енергия и цена.

AVR – характеризира се с относително голяма процесорна мощ (1-clock instruction cycle и 8/16/32 битова шина), поддържа основните комуникационни протоколи (UART, USART, I2C, SPI, CAN, USB и ETHERNET). Фамилията микроконтролери AVR е широко използвана в роботиката и автомобилната промишленост.

- PIC – характеризира се със средна процесорна мощ (4-clock instruction cycle и 8/16/32 битова шина), поддържа комуникационни протоколи PCI, UART, USART, LIN, I2S, SPI, CAN и ETHERNET. Фамилията микроконтролери PIC е широко използвана за индустриални приложения - управление на силови установки, климатични системи, IoT и др.

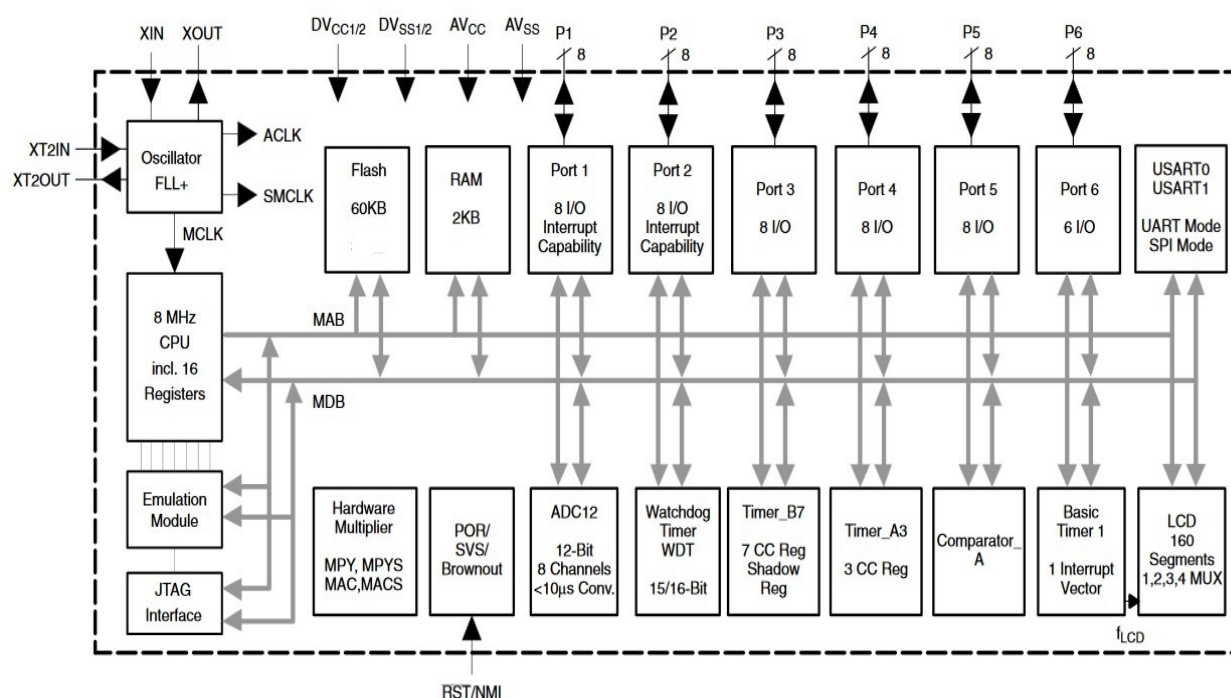
MSP430 – характеризира се със средна процесорна мощ (6-clock instruction cycle и 16 битова шина), поддържа комуникационни протоколи UART, USART, LIN, I2C и IrDA. Фамилията микроконтролери MSP430 е широко използвана за приложения, изискващи ниска консумация на енергия и батерийно захранване. Характерна черта за този тип микроконтролери е ултра ниската консумация на енергия (около 0.7mA в активен режим при 8Mhz) и възможността да работят пълноценно при много ниско захранващо напрежение от порядъка на 1.8V.

На база резултати от направените реални тестове с развойни системи на въпросните фамилии контролери бе взето решение за сензорния модул да бъде разработен на база

микроконтролер модел MSP430F449 на Texas Instruments с температурен диапазон на работа: -40°C $+85^{\circ}\text{C}$

Относително по-високата себестойност на микроконтролера и ограничения набор поддържани комуникационни протоколи се компенсират от ултра ниската консумация на енергия и ниско захранващо напрежение, позволяващи почти двойно по дълъг интервал на автономна работа между две презареждания на батерията и възможност за директно захранване от фотоволтаичен панел с малки размери. Елиминирането на необходимостта от смяна на батерии и възможността сензорния модул да работи без прекъсване в продължение на минимум 3-4 години в дългосрочен план компенсират относително високата начална себестойност на този блок от сензорния модул.

Блоковата диаграма на микроконтролера MSP430F449 е показана на фиг.27 съгласно [140]



Фиг.27 Блоковата диаграма на микроконтролера MSP430F449

Базовите технически спецификации на микроконтролера са показани на Таблица 7:

MSP430F449	
Ядро на CPU	MSP430
Честота	8 MHz
Вградена енергонезависима памет	60 KB
Вградена оперативна памет RAM	2 KB
Универсални входове/изходи GPIO	48
Интерфейс I2C	2
Интерфейс SPI	2
Интерфейс UART	2
Аналого-цифрови преобразуватели ADC	ADC12 - 8ch
Компаратори (Inputs)	Yes
Таймери - 16-bit	2
Таймери - 32-bit	0
Умножители	16x16
BSL	UART
Min VCC	1.8 V
Max VCC	3.6 V
Active Power	280 μ A/MHz
Standby Power	1.1 LPM3- μ A
Допълнителни особености	LCD, Watchdog, Сензор за температура, Brown Out Reset
Wakeup Time	6 μ s
Работен температурен диапазон (°C)	-40°C +85 °C
Корпус	LQFP

Таблица 7 Технически спецификации на микроконтролера MSP430F449

Избор на външна енергонезависима памет

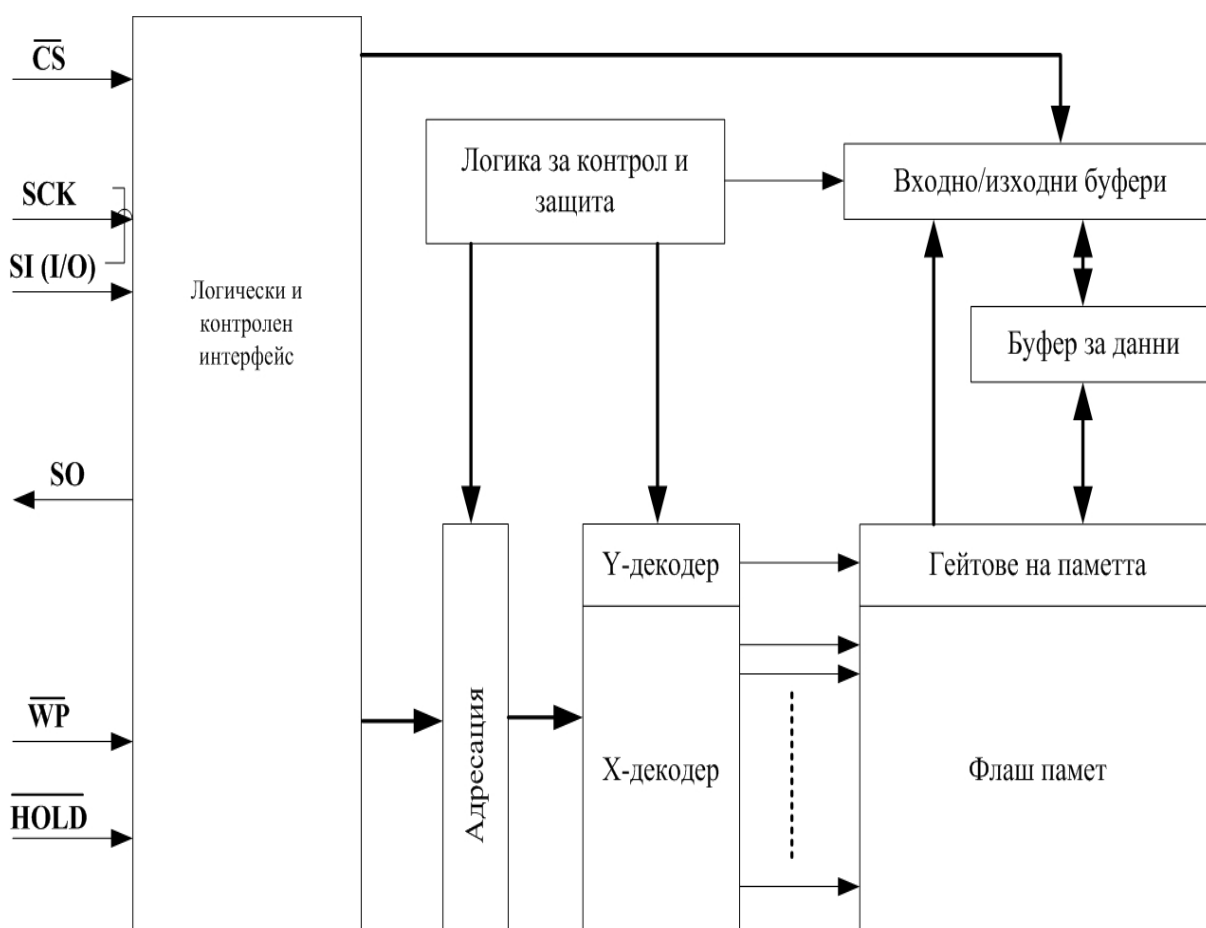
Изискванията към външната енергонезависима памет са аналогични на тези на микроконтролера - ниска консумация на енергия, относително висока тактова честота и възможност за работа в относително широк температурен диапазон.

Правилният избор на подходяща като обем и консумация на енергия енергонезависима памет е един от критичните етапи при разработката на сензорния модул. Една от задачите на енергонезависимата памет е да съхранява данните от измерванията на сензорите, които впоследствие ще се обработват и интегрират по специално разработен алгоритъм за елиминиране на случайни грешки и флукуационни отклонения на измерваният параметър, преди да се изпратят на по-високо ниво за допълнителна обработка.

Втората не по-малко важна задача е дългосрочното съхранение на измерените и компресирани данни и превръщането на сензорния модул в част от виртуална, нерелационна база данни изградена на географски принцип.

На база избрания микроконтролер и решение за използване на SPI шината за комуникация с външната енергонезависима памет бе направен избор за използване на FLASH памет с обем 4Mb на производителя Adesto Technologies. Избраната енергонезависима памет е модел AT25XV041B 4-Mbit SPI Serial Flash Memory with Dual-I/O Support с минимално захранващо напрежение 1.65V и консумация на енергия 3.5mA в активен режим и 25uA в режим Standby. Температурен диапазон на работа: -40°C +85 °C

Блоковата диаграма на избраната енергонезависима памет AT25XV041B е показана на фиг.28



Фиг.28 Блоковата диаграма на енергонезависима памет AT25XV041B

Базовите технически спецификации на енергонезависимата памет са показани на таблица 8:

AT25XV041B	
Захранващо напрежение	1.65V - 4.4V
Поддръжка на SPI интерфейс	Поддържа SPI Modes 0 and 3 Поддържа Dual-I/O Operation
85 MHz Максимална работна честота	Clock-to-Output (tV) of 7.5 ns
Налични режими на изтриване на данни	Uniform 4-Kbyte Block Erase Uniform 32-Kbyte Block Erase Uniform 64-Kbyte Block Erase Full Chip Erase
Хардуерно заключване на определени сектори от паметта чрез пин WP	Налично
Наличие на 128-битов, еднократно програмируем OTP регистър за сигурност.	64 битов заводски програмиран с уникален идентификатор. 64 битов програмируем от потребителя
Режими на програмиране	Byte/Page Program (1 to 256 Bytes) Dual-Input Byte/Page Program (1 to 256 Bytes) Sequential Program Mode Capability
Бързодействие при изтриване на паметта	1.85ms Typical Page Program (256 Bytes) Time 45ms Typical 4-Kbyte Block Erase Time 360ms Typical 32-Kbyte Block Erase Time 720ms Typical 64-Kbyte Block Erase Time
Наличие на автоматична проверка и сигнализиране при проблеми при изтриване на данни.	Налично
Софтуерен reset	Наличен
Наличие на методология JEDEC (Standard Manufacturer and Device ID Read)	Налична
Режими на понижена консумация на енергия	200nA Ultra Deep Power Down current (Typical)
	5µA Deep Power-Down Current (Typical)
	25uA Standby Current (Typical)
	3.5mA Active Read Current (Typical)
Брой цикли изтриване/запис	100,000 Program/Erase Cycles
Период на запазване на данни	20 години

Таблица 8 Технически спецификации на енергонезависима памет AT25XV041B

1.1.2 Проектиране на комуникационния блок на сензорния модул

Комуникационният блок на сензорния модул по принцип е необходимо да отговаря на редица несъвместими в някои отношения изисквания. Правилното проектиране на комуникационния блок е свързано с разумен компромис между няколко критични параметъра:

- ниска консумация на енергия
- излъчване на радиосигнал с възможно най-голяма мощност за покриване на голяма дистанция
- малки размери на антената
- висока чувствителност на приемника за приемане на радиосигнал от голяма дистанция

Въз основа на анализа от раздел „Анализ и актуалност на проблемите по тематиката на дисертационния труд“ и формулираните общи цели и задачи проектирането на комуникационния блок е реализирано на база следното техническо задание:

Комуникационен стандарт: 802.15.4

Протокол за комуникация: ZigBee

Радиочестотен диапазон на предаване/приемане: 2.405 GHz - 2.475 GHz

Дистанция за обмен на данни: не по-малко от 1000м в зона на пряка видимост.

Скорост на предаване на данни: не по-ниска от 100Kb/s

Номинална изходяща мощност: минимум 20dBm

Чувствителност на приемане : минимум -95 dBm

Време за автономна работа – минимум 3 години

Въз основа на техническото задание бе взето решение комуникационният модул да се проектира на база интегралната схема CC2650 на Texas Instruments, представляваща контролер за безжична комуникация тип SoC (System on Chip) с вградена поддръжка на протоколи ZigBee, ZigBee RF4CE и 6LoWPAN и вграден трансивър работещ в честотния диапазон 2.405 GHz - 2.475 GHz

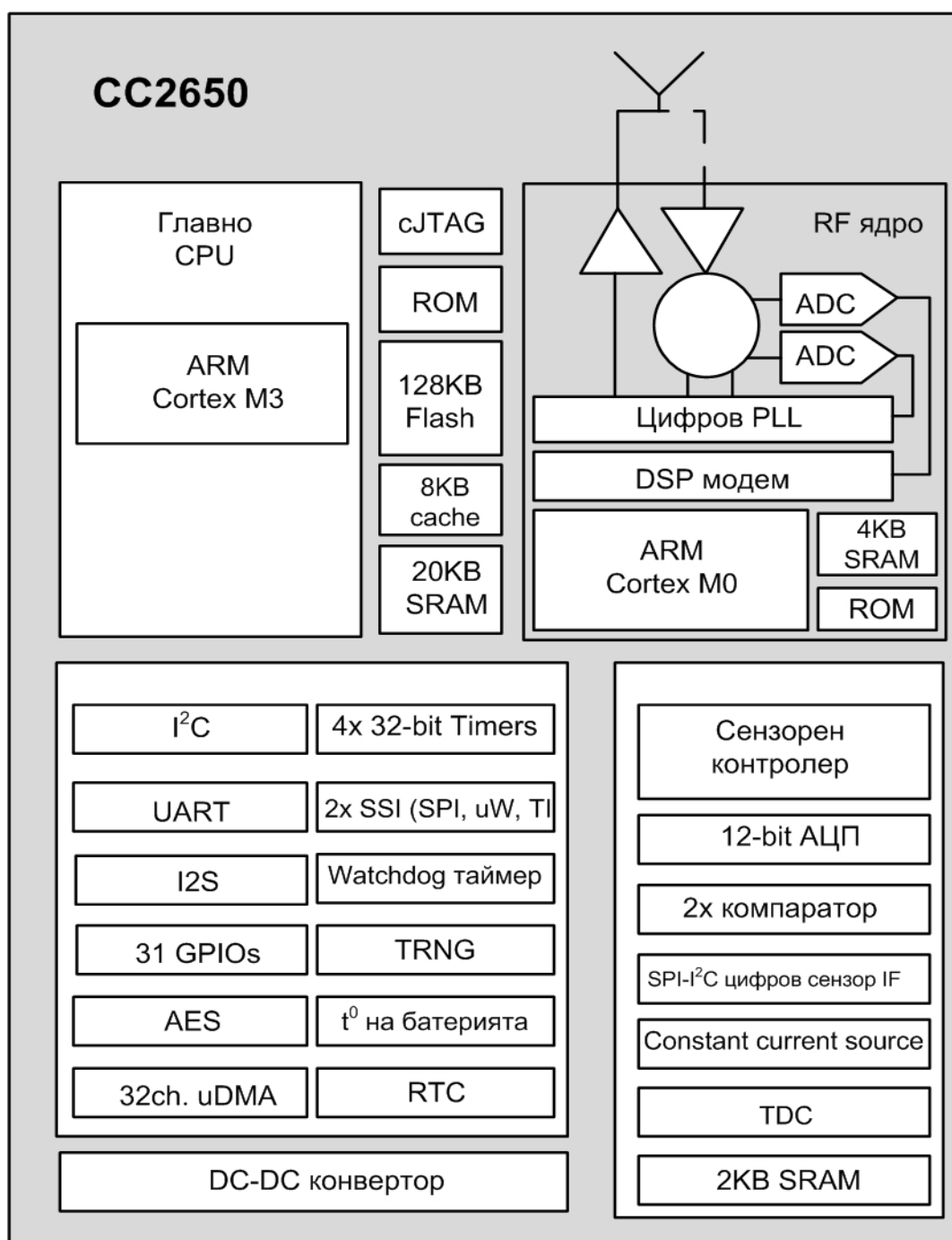
Радио контролерът CC2650 е изграден на база 32 битово процесорно ядро ARM Cortex-M3 и има ултра ниска консумация на енергия.

Техническите параметри на комуникационния контролер са показани на таблица 9:

CC2650 Texas Instruments	
Процесорно ядро	Powerful ARM® Cortex®
	Up to 48-MHz Clock Speed
	128KB of In-System Programmable Flash
	8KB of SRAM for Cache
	20KB of Ultralow-Leakage SRAM
	2-Pin cJTAG and JTAG Debugging
	Supports Over-The-Air Upgrade (OTA)
	16-Bit Architecture
Периферия	Four General-Purpose Timer Modules (Eight 16-Bit or Four 32-Bit Timers, PWM Each)
	12-Bit ADC, 200-ksamples/s, 8-Channel Analog MUX
	Continuous Time Comparator
	Ultralow-Power Analog Comparator
	Programmable Current Source
	UART
	2Ч SSI (SPI, MICROWIRE, TI)
	I2C
	I2S
	Real-Time Clock (RTC)
	AES-128 Security Module
	True Random Number Generator (TRNG) 10, 15, or 31 GPIOs, Depending on Package
	2.4-GHz RF Transceiver Compatible With
Блок за комуникация	Bluetooth Low Energy (BLE) 4.2 Specification
	and IEEE 802.15.4 PHY and MAC
	Excellent Receiver Sensitivity (–97 dBm for BLE and –100 dBm for 802.15.4), Selectivity, and Blocking Performance
	Link budget of 102 dB/105 dB (BLE/802.15.4)
	Programmable Output Power up to +5 dBm
	Single-Ended or Differential RF Interface
Захранващо напрежение	Normal Operation: 1.8 to 3.8 V
	External Regulator Mode: 1.7 to 1.95 V
Консумация на енергия	Active-Mode RX: 5.9 mA
	Active-Mode TX at 0 dBm: 6.1 mA
	Active-Mode TX at +5 dBm: 9.1 mA
	Active-Mode MCU: 61 µA/MHz
	Active-Mode MCU: 48.5 CoreMark/mA
	Active-Mode Sensor Controller: 8.2 µA/MHz
	Standby: 1 µA (RTC Running and RAM/CPU Retention)
	Shutdown: 100 nA (Wake Up on External Events)

Таблица 9 Технически параметри на CC2650

Блок-диаграмата на контролера CC2650 е показана на фиг.29:



Фиг.29 Блок диаграма на контролера CC2650

Изходящата мощност на радио блока на комуникационният контролер CC2650 е 5 dBm, което е недостатъчно за да бъде спазено заданието в частта дистанция за гарантирана комуникация минимум 1000м. в зона на пряка видимост. Поради тази причина, в

процеса на проектиране бе взето решение да се добави усилвател на мощност, който да гарантира покриването на тази дистанция.

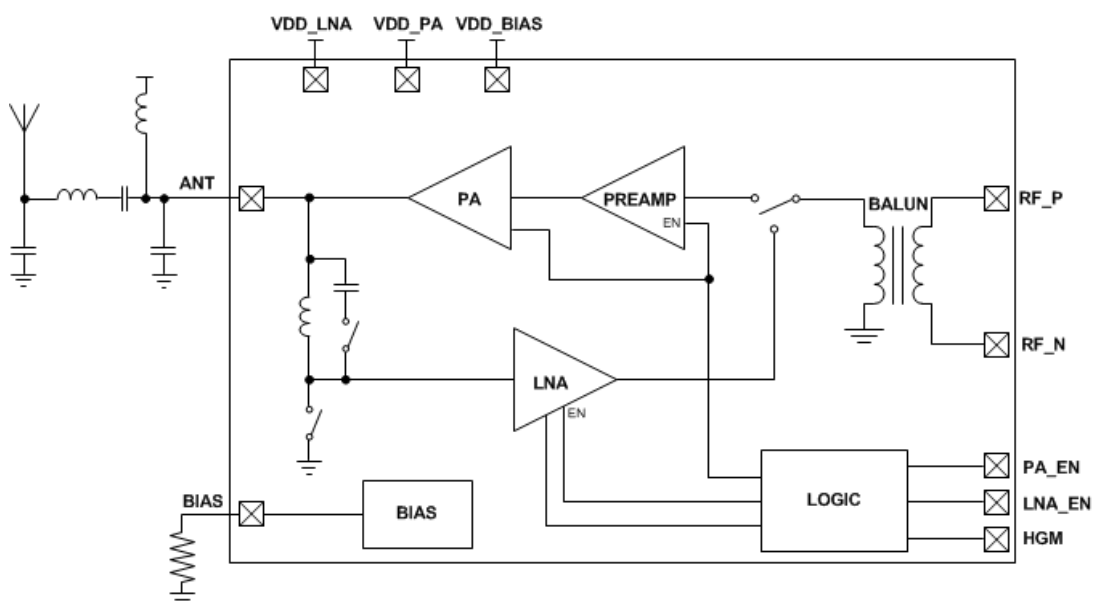
За усилвател на мощност бе избрана интегралната схема CC2592 на Texas Instruments. Интегралната схема CC2592 е усилвател на мощност, проектиран за диапазона 2.4GHz с който съществено се увеличава дистанцията за комуникация на различни радиоконтролери използващи този диапазон. CC2592 е комбинация от усилвател на мощност (PA-Power Amplifier) и ниско шумящ усилвател на радиосигнали (LNA- Low Noise Amplifier) в комбинация с RF ключ.

Техническите параметри на усилвателя на мощност са показани на таблица 10:

CC2592 Texas Instruments	
Изходна мощност	+22-dBm
Консумация на енергия в режим LowTransmit	155 mA at 3 V for +22 dBm
Консумация на енергия в режим Low-Receive	4.0 mA for High-Gain Mode
	1.9 mA for Low-Gain Mode
Консумация на енергия в режим Standby	100 nA in Power Down (LNA_EN = PA_EN = 0)
Захранващо напрежение	2.0V to 3.7V
Вградени компоненти	Integrated PA
	Integrated LNA
	Integrated Switches
	Integrated Balun and External Antenna Match
	Integrated Inductors
	Integrated Matching Network
Работна температура	-40°C to +125°C

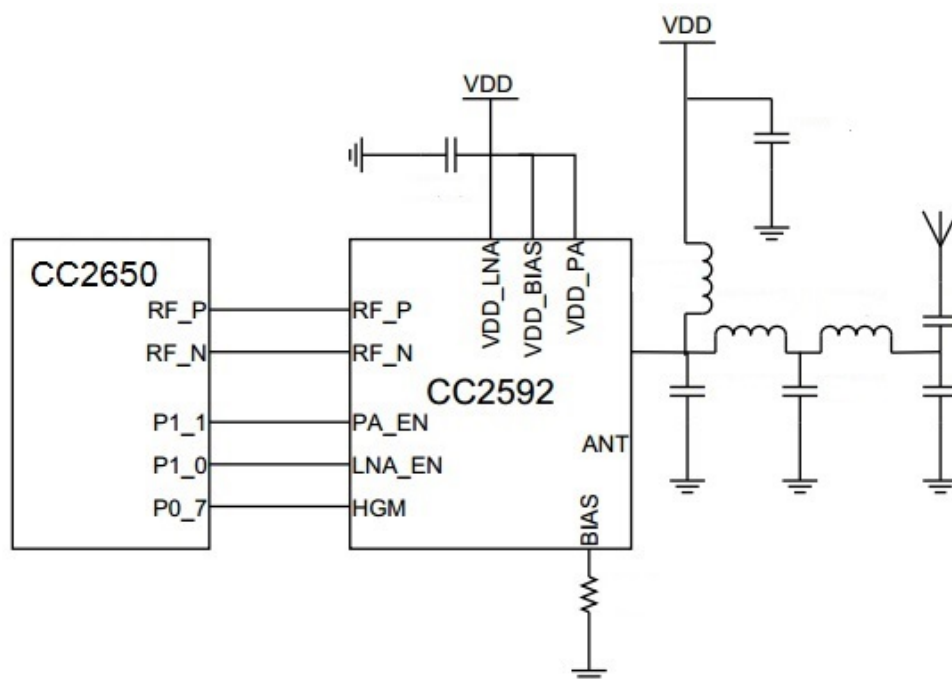
Таблица 10 Техническите параметри на CC2592

Блок-диаграма на контролера CC2952 е показана на фиг.30:



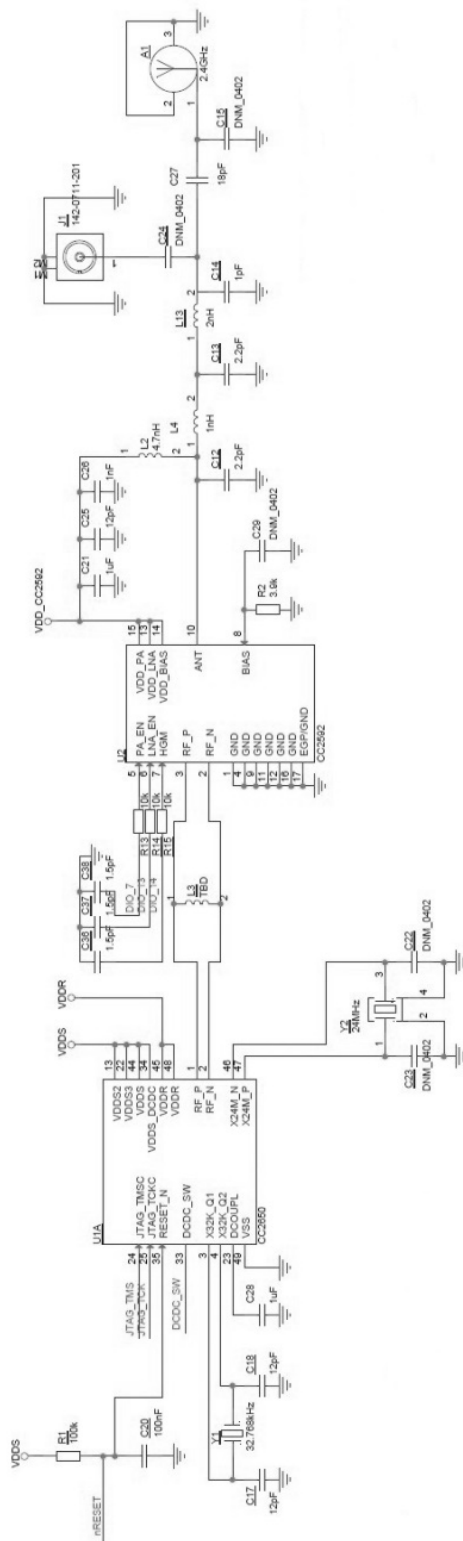
Фиг.30 Блок-диаграма на контролера CC2952

На база подбраните въз основа на техническото задание компоненти бе проектирана следната блок-схема на комуникационния блок, показана на фиг.31:



Фиг.31 Блок-схема на комуникационния блок

Въз основа на проектираната блок схема бе проектирана и тествана принципна схема на комуникационният блок на сензорният модул, показана на фиг. 32

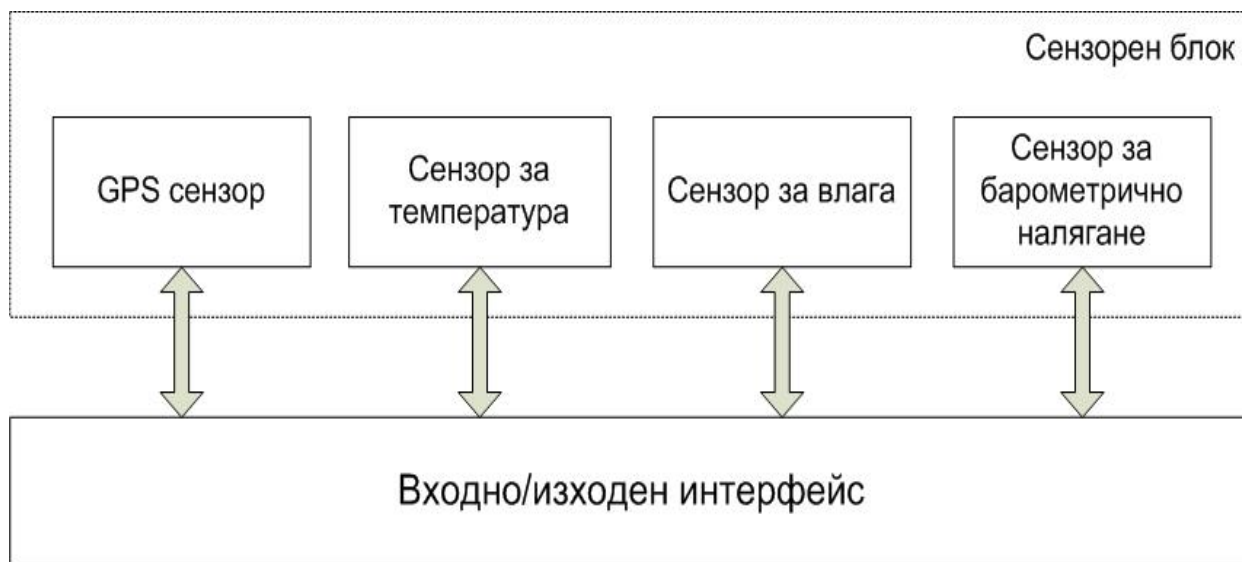


Фиг.32 Принципна схема на комуникационният блок

1.1.3 Проектиране на сензорния блок

Проектирането на сензорният блок на модула е важен етап от цялостното проектиране на устройството. От точността на измерване на метеорологичните данни и диапазона на измерване в голяма степен се определя, доколко разработката на метеорологичния сензор е успешна и може да работи в екстремални условия.

Блок диаграмата на сензорния блок е показана на фиг. 33



Фиг. 33 Блок-схема на сензорния блок

Въз основа на анализа от глава 1 и формулираните общи цели и задачи, проектирането на сензорния блок на метеорологичната сензорна система е реализирано на база следното техническо задание:

GPS сензор

- Определяне на местоположението с точност $\pm 5\text{м}$.
- Висока чувствителност- минимум -120dBm
- Наличие на SBAS (WAAS или EGNOS)
- Ниска консумация на енергия - не повече от 10mA при напрежение 1.8V
- Шумозащитеност - минимум 60dB-Hz

За комбиниран сензор за измерване на температура и влажност на въздуха бе избран цифровият сензор SIRFIV GSD4E на CSR UK.

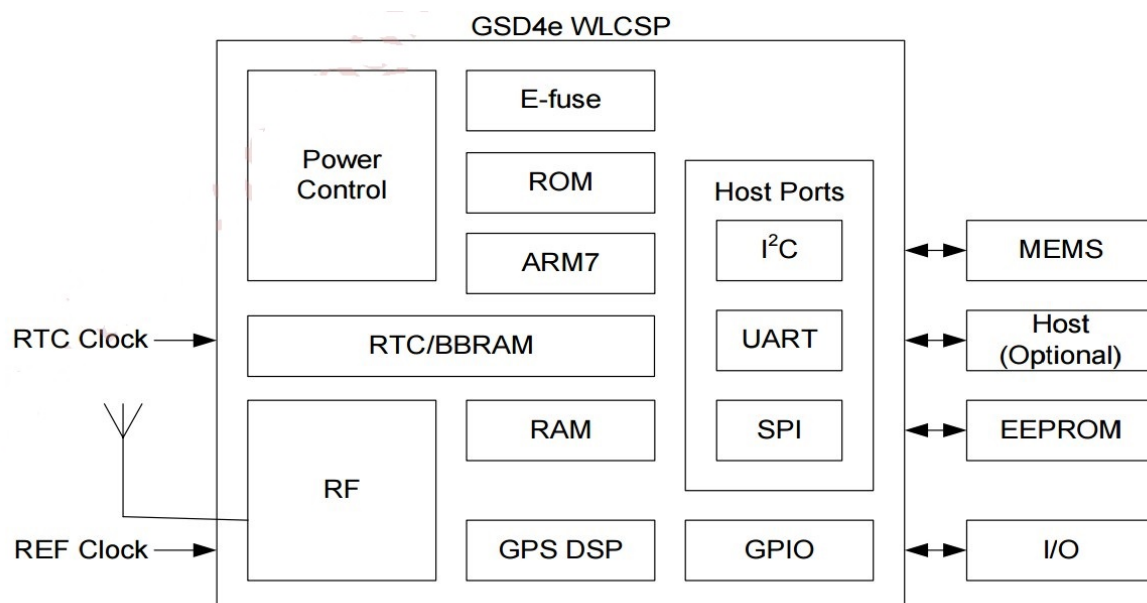
Техническите параметри на този GPS сензор отговарят напълно на изискванията на техническото задание и в някои отношения го превъзхождат.

Техническите параметри на избраният GPS сензор са показани на таблица 11:

SiRFstarIV™ GSD4e CSR UK	
Производителност	• Навигационна чувствителност (PVT) tracks as low as -163dBm
	• 48 track % Reification channels
	• SEAS (WAS or EGNOS)
Micropower Controller	• 50 to 500pA maintains hot start capability
	• <10mW required for TricklePower™ mode
Защита от заглушаване на сигнала	• Remmes in-band jammers up to 80 dB-Hz
	• Tracks up to 8 CW jammers
Навигационни особености	• Smart sensor I2C interface
	• Interrupt input for context change detection Tiny Solution Size
	• 42-ball IALCSP, 3.5 x3.2 x 0.6mm, 0.5mm pitch
	• Single-SAW support, minimal external KM of 5 to 6 passNes
	• Sternal flash memory
	• Typical solution footprint 45mm2
Други параметри	• Захранващо напрежение 1.8V
	• Fail safe I/O, including RTC and TCXO inputs
	• 3.3V compliant integrated TCXO power switch
	• Host PC, SRI and UART supported
	• Programmable E-fuse Product Details GPS RF
	• Вграден ниско шумящ усилвател (LNA)
	• Single-SAWfilter design
	• Fractional-N synthesiser
	• Наличие на SPI интерфейс
	• TOO input (crystal oscillator input/output supported)

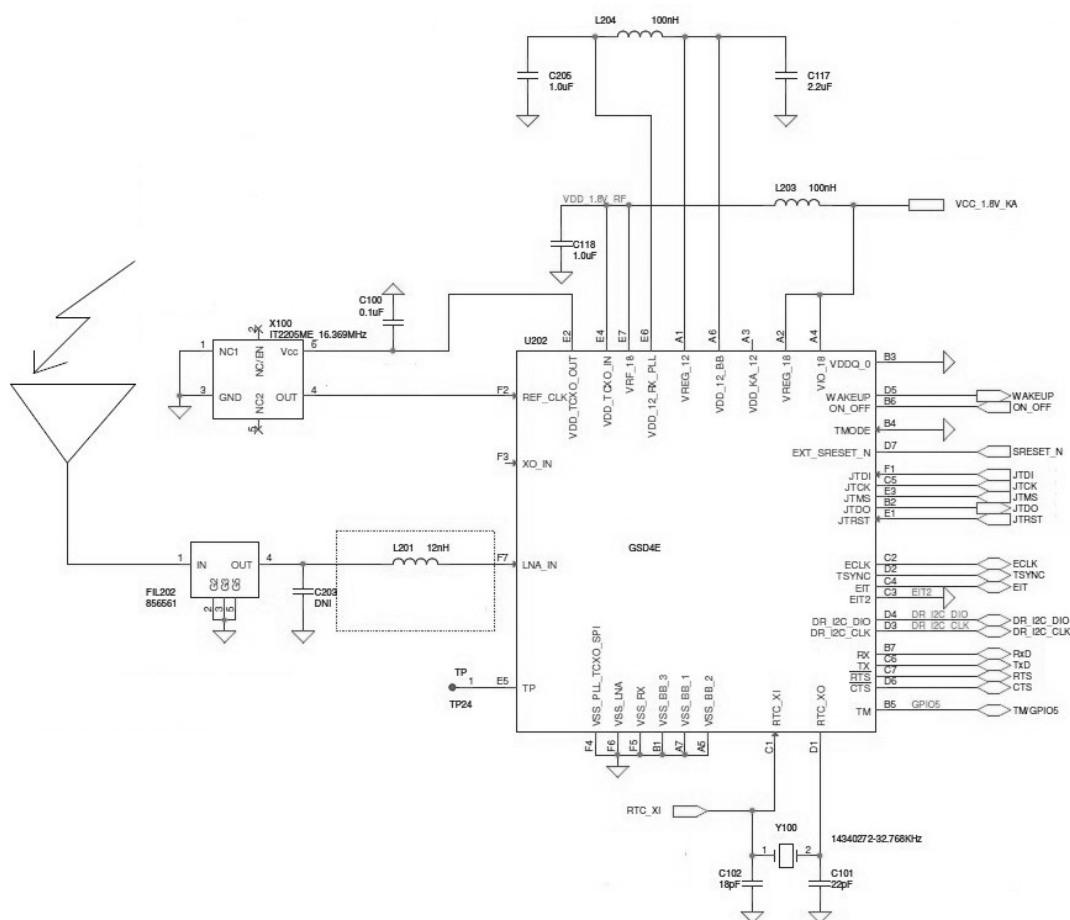
Таблица 11 Техническите параметри на SiRFstarIV™ GSD4e

Блок -схемата на избраният GPS сензор е показана на фиг. 34



Фиг.34 Блок -схемата на SiRFstarIV™ GSD4e

Въз основа на направеният избор за GPS сензор в процеса на проектиране, както и въз основа на блок схемата от фиг.8 бе разработена следната принципна схема на GPS сензора показана на фиг. 35



Фиг. 35 Принципна схема на GPS сензора

Сензор за измерване на температура на въздуха:

- Измерване на температура в диапазона от -40°C до +70°C с точност $\pm 0.5^\circ\text{C}$
- Цифров изход поддържащ I2C или SPI протокол
- Ниска консумация на енергия - под 10 μA

Сензор за измерване на влажността на въздуха:

- Измерване на влага във въздуха в диапазона от 0 до 100% с точност $\pm 3\%$
- Цифров изход поддържащ I2C или SPI протокол
- Ниска консумация на енергия - под 10 μA

Сензор за измерване на барометричното налягане на въздуха:

- измерване на абсолютно атмосферно налягане в диапазона от 500hPa до 1000hPa с точност ± 0.2 hPa
- цифров изход поддържащ I2C или SPI протокол
- ниска консумация на енергия - под 10 μ A

Въз основа на направените проучвания бе решено при проектирането на сензорния блок да се използва комбиниран сензор за измерване на температура и влажност на въздуха, позволяващ намаляване на броя на компонентите върху печатната платка на сензорния модул и опростяване на комуникацията с процесорния модул.

За комбиниран сензор за измерване на температура и влажност на въздуха бе избран цифровия сензор HDC1080 на Texas Instruments USA.

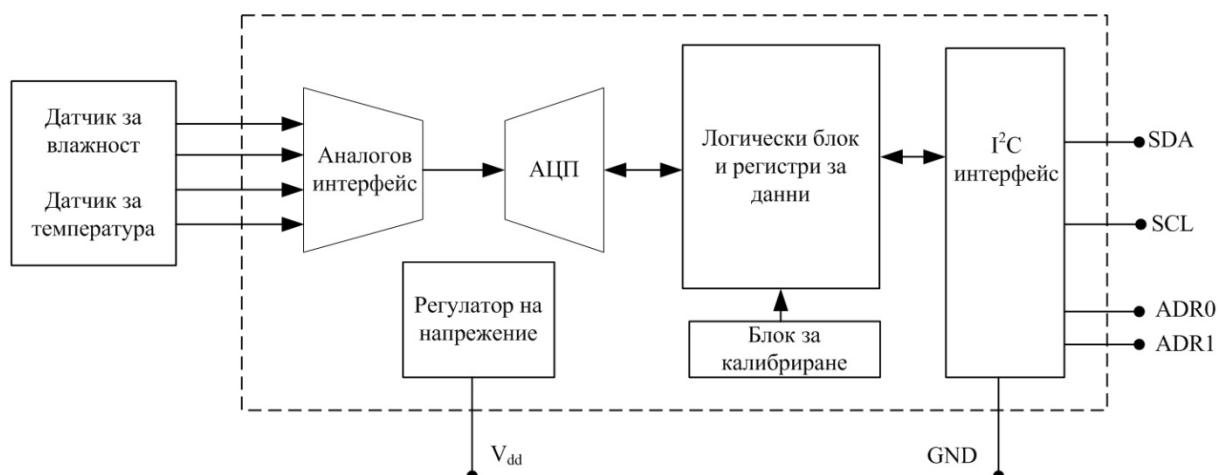
Техническите параметри на този сензор отговарят напълно на изискванията на техническото задание и в някои отношения го превъзхождат.

Техническите параметри на избраният комбиниран сензор са показани на таблица 12:

HDC1080 Texas Instruments	
Температурен диапазон на измерване	от -40°C до +70°C
Точност на измерване на температура	$\pm 0.2^\circ\text{C}$
Диапазон на измерване на относителна влажност	относителна влажност от 0 до 100%
Точност на измерване на влажност	$\pm 2\%$
Резолуция на измерването:	14 Bit
Консумация на енергия	100 nA Sleep Mode Current
	710 nA @ 1 sps, 11 bit RH Measurement
	1.3 μ A @ 1 sps, 11 bit RH and Temperature
Захранващо напрежение	2.7 V to 5.5 V
Комуникационен интерфейс	I2C

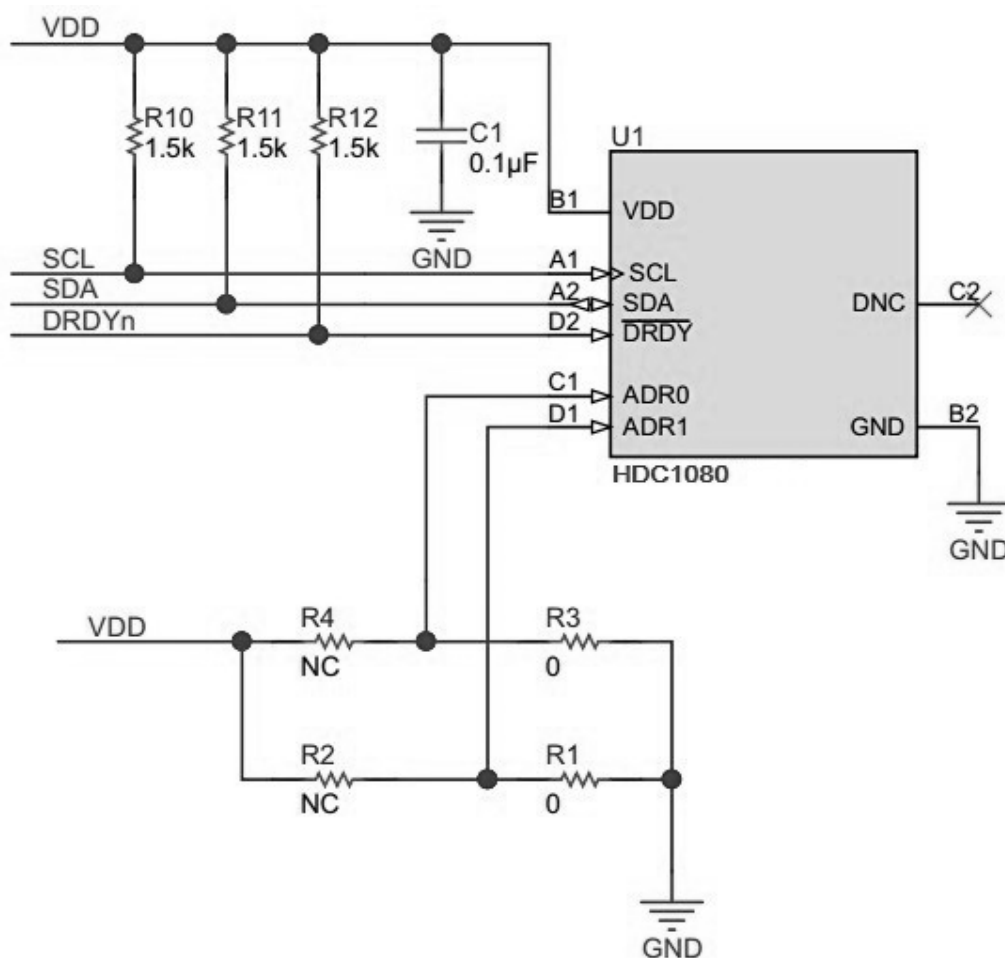
Таблица 12 Технически параметри на HDC1080

Блок-схемата на избраният комбиниран сензор е показана на Фиг. 36



Фиг. 36 Блок-схема на HDC1080

Въз основа на направеният избор на комбиниран сензор за температура и влажност в процеса на проектиране, както и въз основа на блок схемата от фиг.8 бе разработена следната принципна схема на комбинация сензор за температура и влажност, показана на фиг. 37



Фиг. 37 Принципна схема на HDC1080

Сензор за барометрично налягане

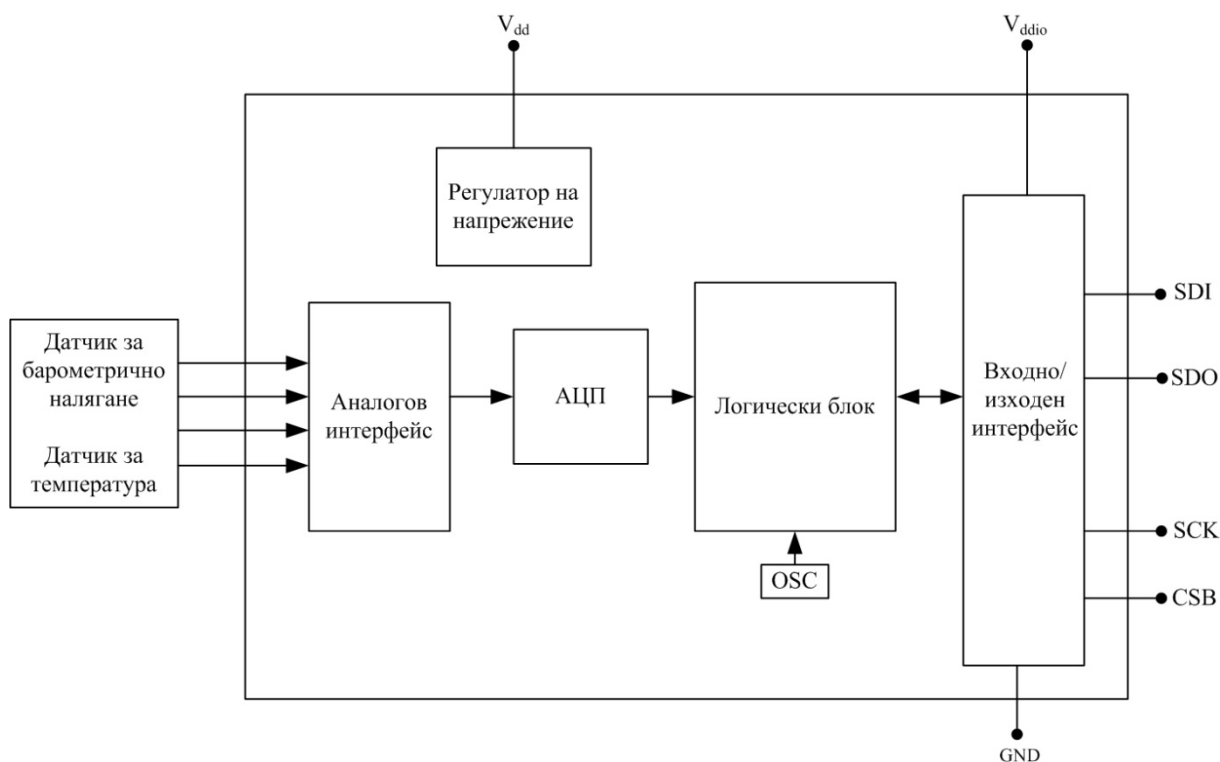
За измерване на барометричното налягане в процеса на проектиране на сензорния блок бе избран цифровият барометричен сензор модел BMP280 на BOSH.

Техническите параметри на избраният барометричен сензор са показани на таблица 13:

BMP 280 BOSH	
Диапазон на барометрично налягане	300 ... 1100 hPa (equiv. to +9000...-500 m above/below sea level)
Относителна точност	± 0.12 hPa, equiv. to ± 1 m в диапазона 950 ... 1050hPa при температура 25°C
Абсолютна точност	тип. ± 1 hPa в диапазона 950 ... 1050hPa при температура от 0 до +40°C
Температурен коефициент - корекция	1.5 Pa/K, equiv. to 12.6 cm/K
Интерфейси	I2C (up to 3.4 MHz)
	SPI (3 and 4 wire, up to 10 MHz)
Консумация на енергия в работен режим	2.7 μ A @ 1 Hz sampling rate
Работен температурен диапазон	от -40 до +85 °C

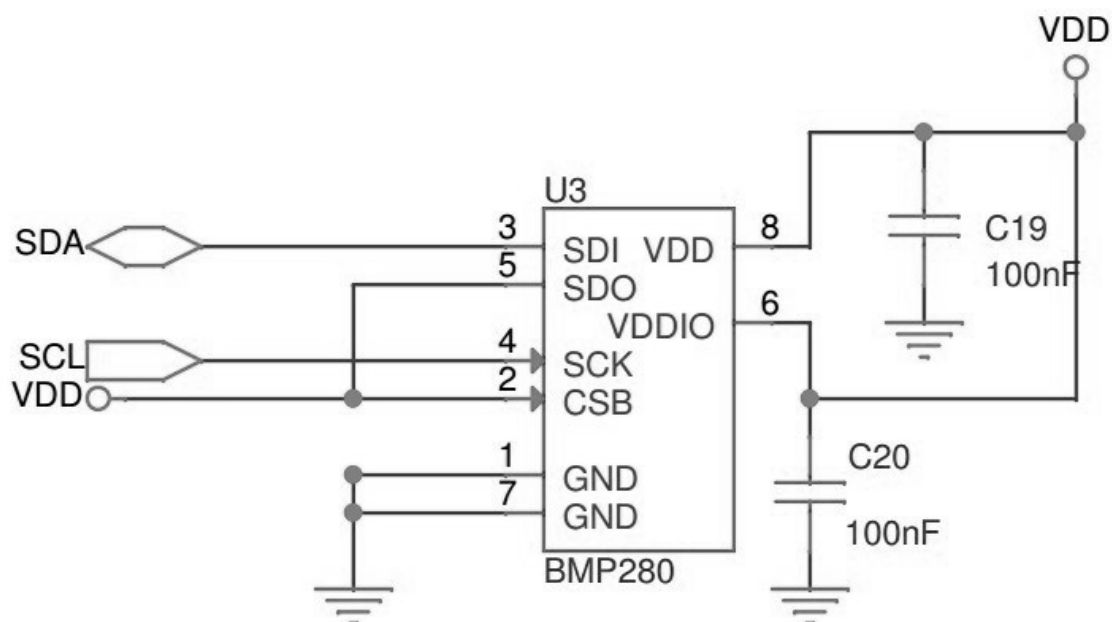
Таблица 13 Техническите параметри на BMP 280

Блок-схемата на избраният барометричен сензор е показана на фиг. 38:



Фиг. 38 Блок-схема на BMP 280

Въз основа на направеният избор на сензор за барометрично налягане в процеса на проектиране, както и въз основа на блок схемата от фиг.37 бе разработена следната принципна схема на сензорния блок, показана на фиг. 39



Фиг. 39 Принципна схема на сензор BMP280 на сензорния блок

1.1.4 Проектиране на захранващия блок

Въз основа на анализа от глава 1 и формулираните общи цели и задачи проектирането на захранващия блок на метеорологичната сензорна система е реализирано на база следното техническо задание:

- наличие на два независими един от друг източника на енергия за захранване на сензорния модул – акумулаторна батерия и соларен панел.
- капацитетът на акумулаторната батерия независимо от соларния панел да е достатъчен за работа на сензорният модул в продължение на минимум 1 месец без презареждане.
- комбинацията на двата източника на енергия да осигурява работа на сензорния модул в продължение на минимум 36 месеца.

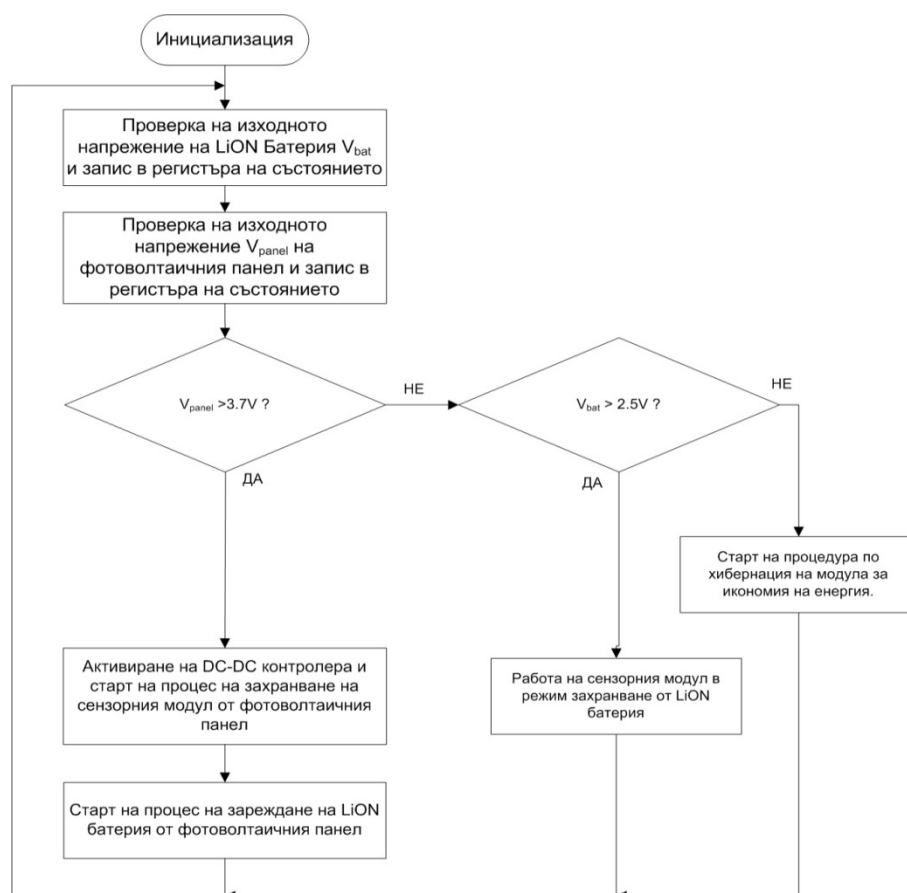
На база техническото задание в процеса на проектиране на захранващият блок бе взето решение той да се захранва от два независими източника на енергия: LiION акумулаторна батерия и фотоволтаичен панел от аморфен силиций..

При тестовите на NiCD, LiON, NiMH и Li-ion polymer акумулаторни батерии при различни температурни условия най-добри резултати показва LiON батерия с номинално напрежение 3.7V и капацитет 1200mAh и работна температура от -20°C до +60 °C

Направените проучвания и тестове на мини соларни панели показаха че фотоволтаичен модул базиран на поликристален панел от аморфен силиций с размери 35x35mm осигурява 70mA ток при напрежение 2V, което отговаря на консумацията при нормален режим на модула с коефициент на запас 1.2.

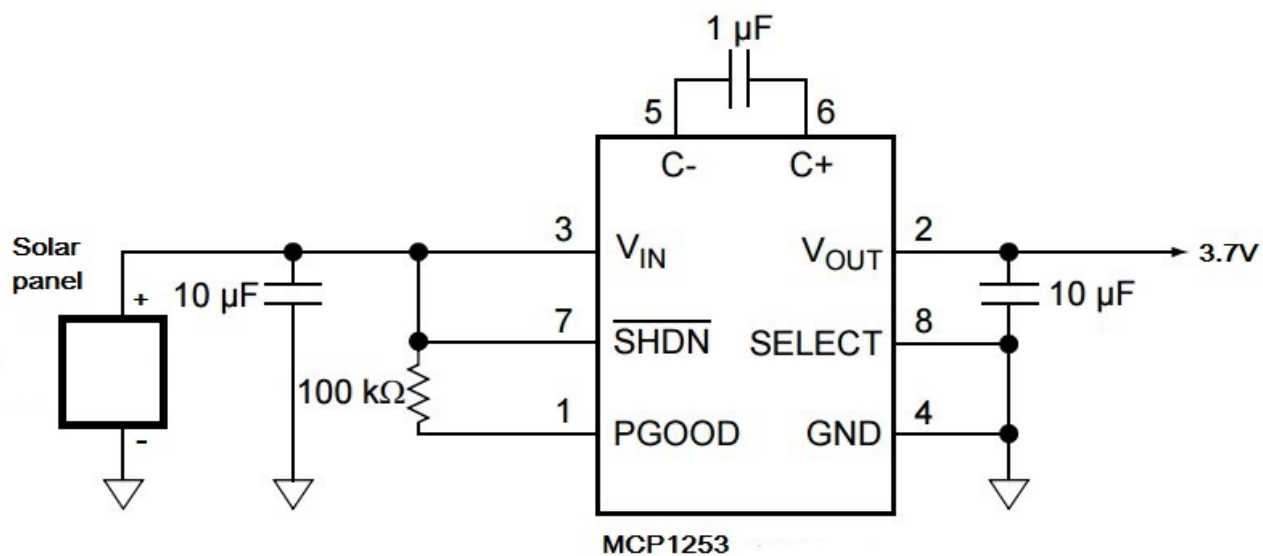
За осигуряване на съвместимост и възможност за презареждане на акумулаторната батерия от соларния панел е предвидено да се използва безиндуктивен DC-DC конвертор тип MCP1253, осигуряващ 3.7V изходно напрежение от 2V входно напрежение.

Блок-схемата за работата на захранващия модул е показана на фиг. 40



Фиг. 40 Блок-схема за работата на захранващият модул

Принципната схема на захранващият блок е показана на фиг.41



Фиг.41 Принципна схема на захранващия блок

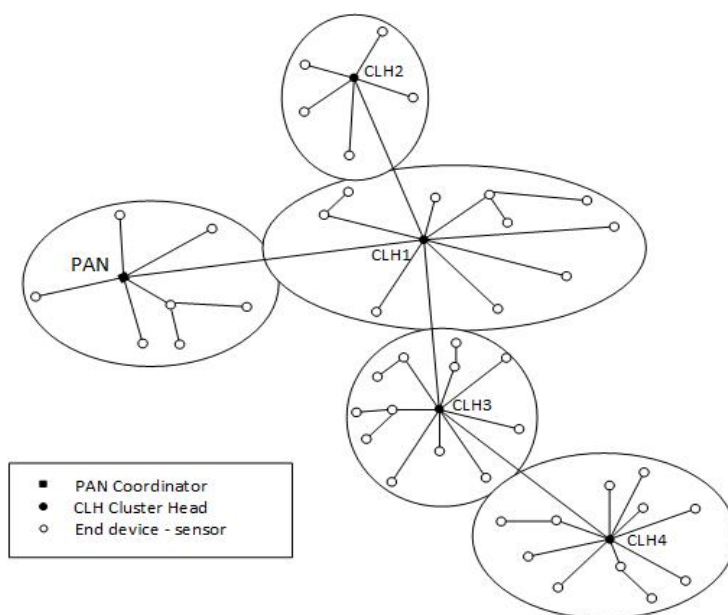
Особеност на схемата на захранващия блок е че същият може да работи в няколко режима в зависимост от наличието на светлина необходима за работата на соларния панел.

Управлението на тези режими се реализира чрез специализиран софтуерен алгоритъм в контролера за управление.

1.2 РАЗРАБОТКА НА СИСТЕМНАТА АРХИТЕКТУРА НА ФЪРМУЕРА НА БЕЗЖИЧНИЯ СЕНЗОРЕН МОДУЛ

1.2.1 Разработка на метод и алгоритъм на работа на сензорния модул в режим FFD и RFD.

Спецификацията 802.15.4 поддържа основно два вида устройства – FFD (Full Functional Device) и RFD (Reduced Functionality Device). Както е описано в раздел 1.4 всяко FFD може да работи в няколко режима - мрежов координатор (PAN) coordinator, локален координатор и като крайно устройство (сензорен модул за събиране на данни), докато RFD може да работи само като крайно устройство. С цел унификация и оптимизация на производствените разходи за нуждите на конкретната разработка бе решено сензорният модул да съответства и на двете спецификации (FFD и RFD). По подразбиране всеки сензорен модул в експерименталната мрежа работи в режим FFD, като има възможност софтуерно да се превключи в режим RFD. За разработваната сензорна мрежа е избрана клъстерна топология, която е специален случай на peer-to-peer топологията. За нуждите на експериментите необходими за тестване на алгоритмите описани в настоящия раздел е взето решение в експерименталната сензорна мрежа да се използва само сензорния модул от раздел 2.1 работещ основно в режим FFD. Превключването на сензорния модул в режим RFD е допустимо само в случай, че този модул е краен за мрежата или в случай на динамична реинициализация, когато запасът на енергия на въпросният модул по различни причини е минимален. Архитектура на cluster-tree топологията на експерименталната сензорна мрежа е показана на фиг.42



Фиг.42 Cluster-tree топология

По подразбиране PAN координатора на мрежата работи само в режим FFD.

Характеристики на режим FFD на разработеният сензорен модул

Алгоритмът за избор на един сензорен модул да работи в режим FFD или RFD е относително елементарен и се определя от съдържанието на routing таблицата на комуникационния модул на сензора.

Ако в рутинг таблицата фигурира само IP адреса на CH(Cluster Head) след процеса на AD НОС изграждането на клъстера, то съответната сензорна система превключва в режим RFD. В противен случай модула остава в режим FFD по подразбиране.

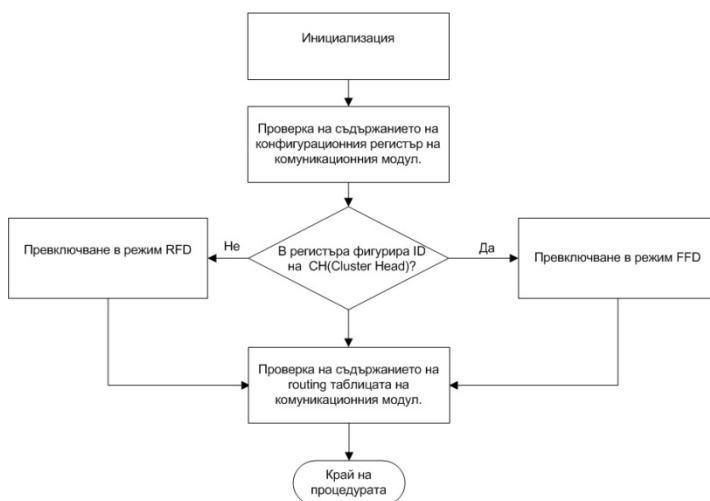
В режим FFD сензорният модул изпълнява функции на стандартна сензорна система и на координатор, ретранслиращ данните от RFD сензорните модули записани в routing таблицата му.

Характеристики на режим RFD на разработеният сензорен модул

Основната особеност на работа на сензорния модул в режим RFD е намалената консумация на енергия. В режим RFD сензора изразходва енергия само при предаване на данни през фиксиран интервал от време до CH (Cluster Head) координатора, а в останалото време изключва напълно всички свои функции с изключение на WatchDog таймера. Като правило RFD модула функционира в т.н. режим low duty cycle.

Характерна особеност на разработения алгоритъм на работа на сензорния модул е, че процеса на установяване на дадено устройство в режим FFD или RFD е динамичен и може да се променя в процеса на работа на мрежата.

На фиг. 43 е показан алгоритма на превключване на сензорния модул в режим FFD и RFD

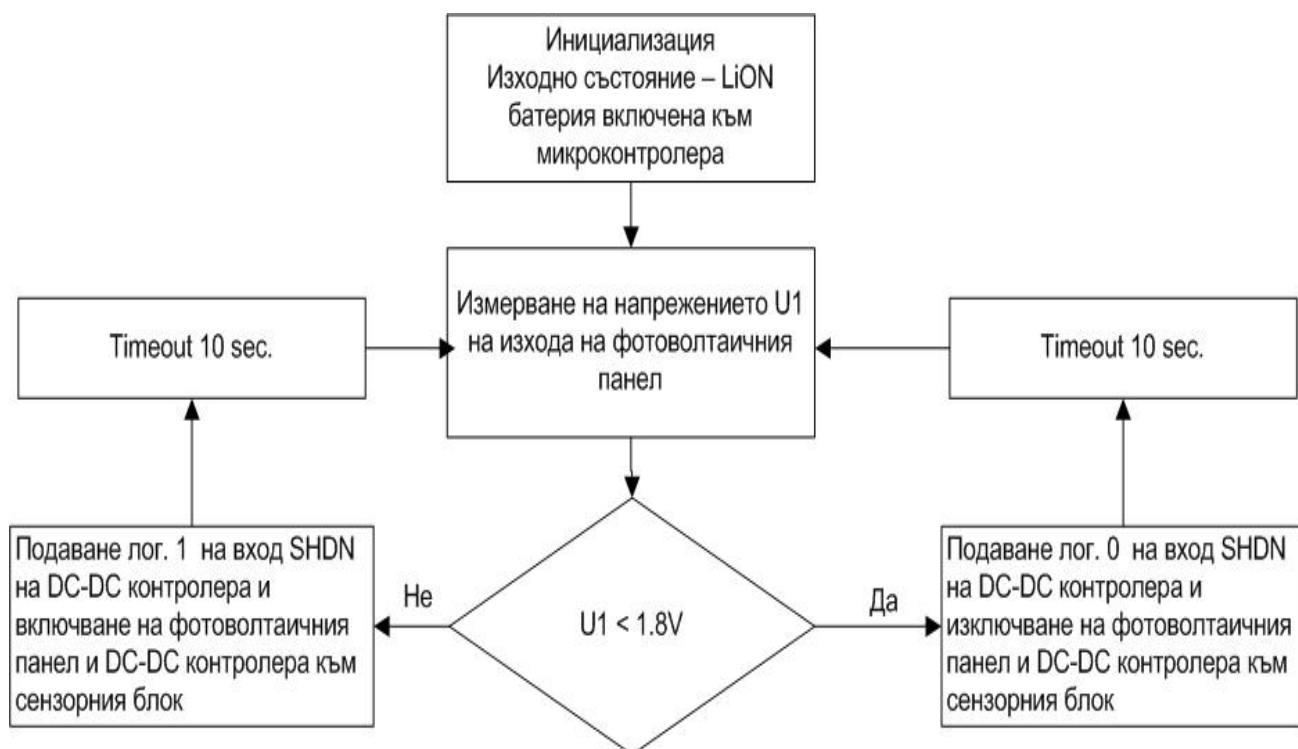


Фиг. 43 Блок-диаграма на алгоритма на превключване на сензорния модул в режим FFD и RFD

1.2.2 Алгоритъм за управление на захранващият блок.

Разработката на захранващият блок описана в т.2.1.4 предвижда два източника на захранване - фотоволтаичен панел и литиево-йонна акумулаторна батерия. Предвиден е и DC-DC блок с възможност за зареждане на акумулаторната батерия от фотоволтаичния панел, както и директно захранване на сензорния модул при наличие на слънчева светлина с цел да се пести ресурса на акумулаторната батерия.

Блок-диаграмата на алгоритъма на захранващият блок е показана на фиг. 44



Фиг. 44 Блок-диаграма на алгоритъма на захранващият блок

1.2.3 Алгоритъм за управление на комуникационния блок.

Хардуерната разработка на комуникационния блок е описана в т.1.1.5

Блок-диаграмата на алгоритъма на комуникационния блок е показана на фиг. 45



Фиг.45 Блок-диаграма на алгоритъма на работа на ZigBee комуникационен блок

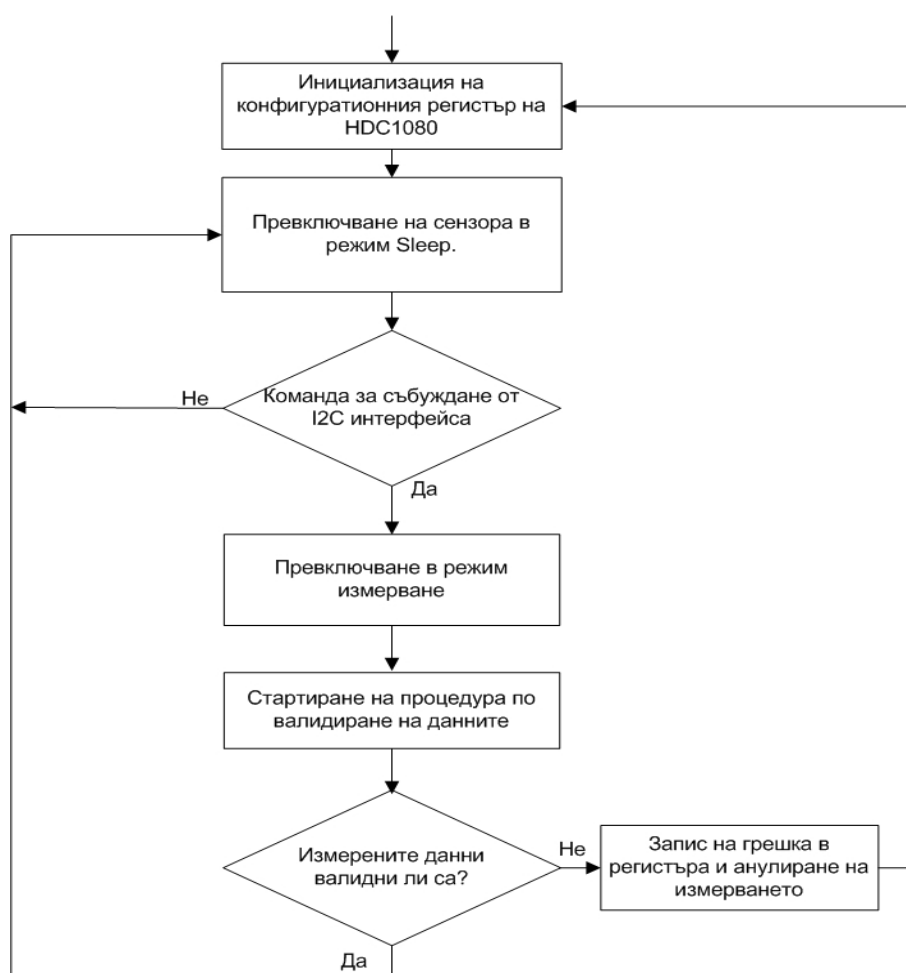
1.2.4 Алгоритъм за управление на сензорния блок.

Алгоритъм за управление на сензорите за температура и влажност на въздуха

Комбинираният сензор за измерване на температура и влажност HDC1080 на Texas Instruments комуникира основно през I²C интерфейс.

След инициализация на сензорния блок от централния процесор, в конфигурационния регистър на комбинирания сензор HDC1080 се въвеждат инициализиращи данни и сензора превключва в sleep режим с цел икономия на енергия. В този режим сензорът очаква команда за събуждане през I²C интерфейса. При получаване на такава команда сензорът се превключва от режим sleep в режим измерване. След завършване на измерването HDC1080 автоматично се връща в sleep режим.

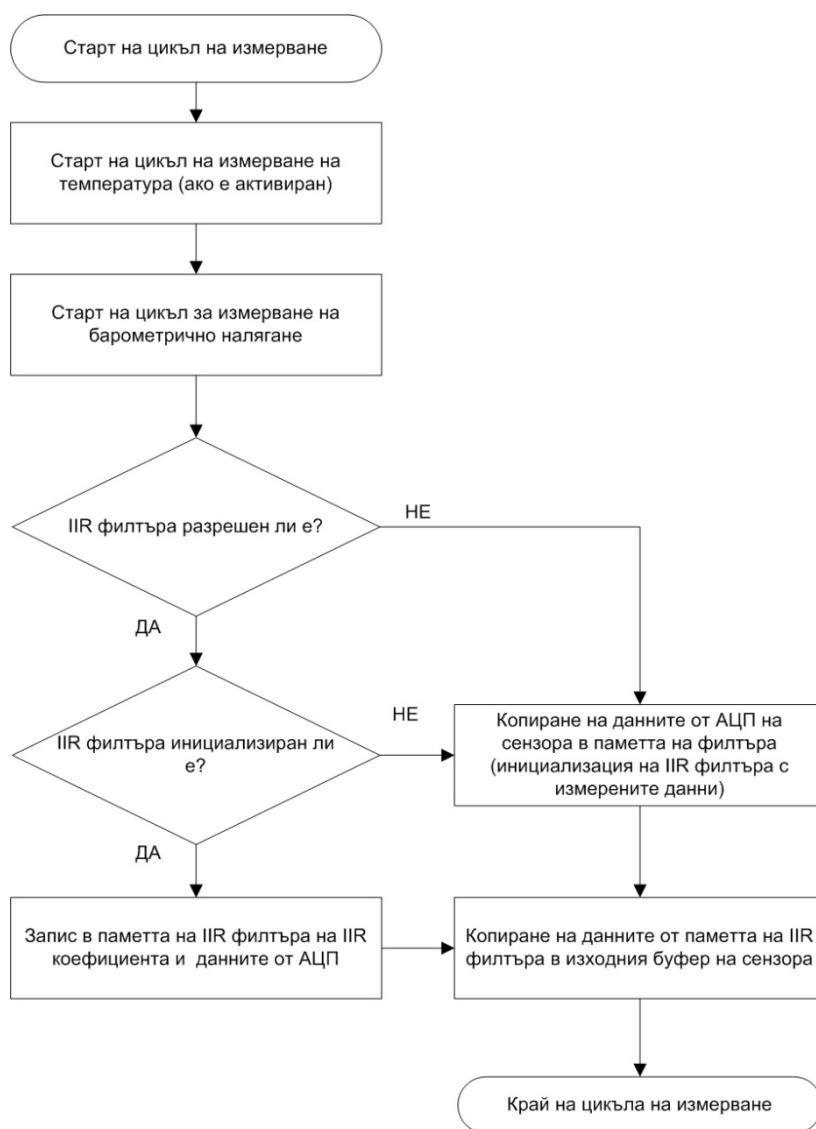
Алгоритъмът на работа на комбинирания сензор е показан на фиг. 46



Фиг.46 Блок-диаграма на алгоритъма на работа на комбинирания сензор за измерване на температура и влажност.

Работен цикъл на измерване на BMP280.

Цикълът на измерване на сензора за барометрично налягане BMP280 на BOSH се състои от последователни периоди на измерване на температурата и на барометричното налягане с избираемо семплиране. След периода на измерване на температура и налягане измерените данни се обработват с IIR (Infinite Impulse Response) филтър, изчистващ флукуациите при измерените стойности на барометричното налягане. Цикълът на измерване е илюстриран с диаграмата на фиг. 47



Фиг.47 Типичен цикъл на измерване при барометричен сензор BMP280

В зависимост от целите на измерването всеки режим (измерване на налягане и измерване на температура) може да бъде разрешен или забранен.

За целите на настоящата разработка модулът за измерване на температурата няма да се използва, тъй като блокът за измерване на температура на сензора HDC1080 е с по-голяма чувствителност. Въпреки това в хардуерната разработка на сензорния модул е предвидена възможност за активирането му чрез софтуерна команда в случай на отказ на температурния сензор на HDC1080.

При активиране на режима на измерване на барометрично налягане сензорът BMP280 извършва поредица измервания на налягането с цел редуциране на шума и повишаване на чувствителността. Режимът на работа (активен/неактивен) и количеството на поредицата измервания се управлява от контролния регистър 0xF4.

Аналогично ако е активиран и режим на измерване на температурата сензорът BMP280 извършва поредица измервания на околната температура с цел редуциране на шума и повишаване на чувствителността. Режимът на работа (активен/неактивен) и количеството на поредицата измервания също се управлява от контролния регистър 0xFC и регистър 0xF4.

Филтриране на измерванията

Сензорът BMP280 има вграден IIR филтър с цел подобряване на точността на измерването и редуциране на пикове получени от случайни флуктуации на налягането,, и/или температурата в обсега на измерване на сензора.

Процесът на филтриране на измерванията се извършва на база формула 10:

$$data_filtered = \frac{data_filtered_old \cdot (filter_coefficient - 1) + data_ADC}{filter_coefficient} \quad (10)$$

където

data_filtered - текущата филтрирана стойност на направеното измерване

data_filtered_old - предходната изчислена стойност

data_ADC - измерената стойност преди прилагане на формулата за филтриране

filter_koefficient - таблична стойност в зависимост от броя на измерванията.

Стойностите по подразбиране на filter_koefficient са дадени в Таблица 14

Коефициент IIR	Брой измервания (семпли)
IIR изключен	1
2	2
4	7
8	11
16	22

Таблица 14. Стойности на filter_koefficient в зависимост от конфигурирания брой измервания.

Резултатите от проведените експерименти с реални сензори показаха, че оптималната стойност на filter_koefficient и ODR (Output Data Rate) за нуждите на настоящата разработка е filter_koefficient = 4 и ODR = 7 съответстващи на време на измерване около 12ms. IIR филтърът се конфигурира чрез контролния регистър 0xF5

Шум при измерване

Нивото на шума зависи от броя на измерванията в един цикъл и от конфигурацията на IIR филтъра.

Режими на работа

Сензорът BMP280 може да работи в 3 основни режима:

- sleep mode - сензорът е в "спящ" режим, не измерва и консумира около 0.3μA
- forced mode - режим на единично измерване
- normal mode - режим на циклично измерване

Режимът на работа се определя от старшите 2 бита на регистъра 0xF4.

Спящ режим (Sleep mode)

Това е режимът по подразбиране на сензора, когато му се подаде захранване. Сензорът не извършва измервания, но всички регистри са достъпни за четене и писане. Консумацията на енергия в този режим е минимална - 0.3μA при VDD = 1.8V

Режим единично измерване

В този режим сензорът извършва само единично измерване на база записаната в регистрите конфигурация и след това влиза отново в sleep mode. Консумацията на енергия в този режим зависи от ODR (Output Data Rate) и конфигурацията на IIR филтъра.

Режим циклично измерване

В този режим сензорът прави периодични измервания. Периодът на измерване се определя от два програмируеми времеви интервала – активен (режим на измерване) и неактивен (standby). Активният интервал (режим на измерване) се определя от ODR и стойността на IIR филтъра. Неактивният интервал се определя от променливата t_{standby} .

Софтуерен алгоритъм на работа на сензора BMP280 използван в сензорния модул.

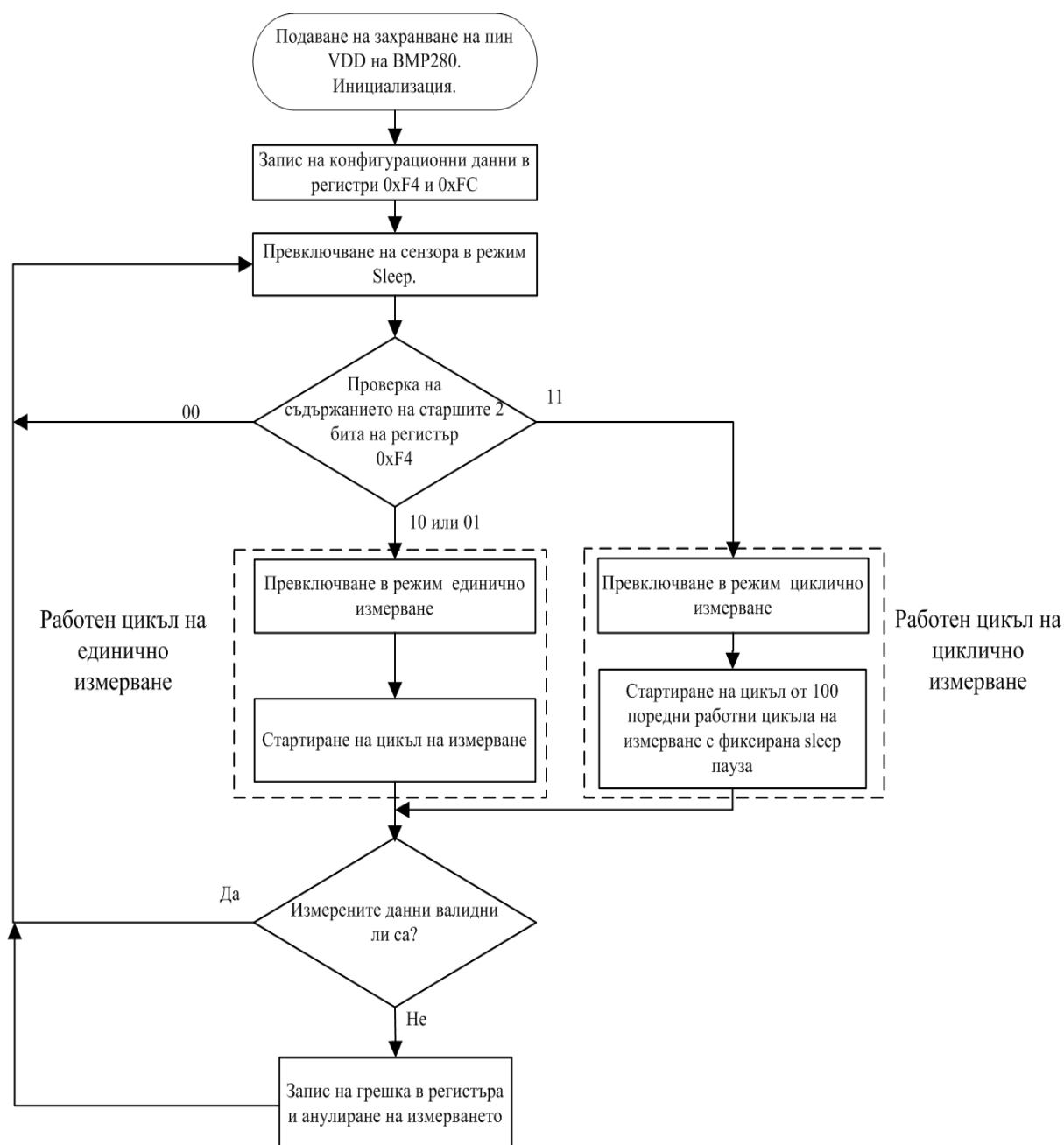
Алгоритъмът на работа на сензор BMP280 в режим измерване на барометрично налягане в сензорния модул е илюстриран на блок-схемата показана на фиг. 48

При подаване на захранване на сензор BMP280 ($>1.8V$ на пин VDD) се извършва първоначална инициализация на блоковете на сензора и запис на стойности по подразбиране в конфигурационните регистри. След това сензорът превключва в режим sleep и започва в цикъл да чете съдържанието на регистър 0xF4. През определен период от време микропроцесорния контролер на сензорния модул записва в регистъра стойност 10 и го превключва в режим единично измерване. След превключване към режим единично измерване се стартира работния цикъл на измерване, илюстриран на фиг.47. След завършване на работния цикъл резултатите от измерването се валидират и сензорът отново влиза в режим sleep с циклично четене на регистър 0xF4.

За по-голяма адаптивност в драйвера на сензора е предвиден и режим на циклично измерване на барометрично налягане, който се активира със запис 11 в старшите битове на конфигурационния регистър 0xF4.

Режимът на циклично измерване е аналогичен на режима на единично измерване с тази разлика, че при стартирането му се изпълняват 100 последователни цикъла на измерване, редуващи се със sleep периоди с фиксирана продължителност.

По време на измерването всички команди до сензора се игнорират и изпълняват след приключване на измерването



Фиг.48 Блок-схема на алгоритма на работа на сензор BMP280 в режим измерване на барометрично налягане.

1.3 Изводи

В резултат на направения избор на електронни компоненти, хардуерна архитектура и системна архитектура на фирмуера е създаден сензорен модул с интелигентни функции за мониторинг и техническа възможност за имплементиране на алгоритми за локално интегриране на метеорологични данни. На базата на разработката е направена заявка за патент No.112400/17.10.2016.

Разработеният сензорен модул притежава следните характеристики, отличаващи го от други съществуващи разработки:

1. Управляващ блок с възможност хардуерно да включва и изключва от захранващата шина, на функционални блокове и отделни възли, като външни за микроконтролера памети, комуникационния блок, избирателно един или няколко сензора, GPS блока и/или фотоволтаичния панел с DC-DC контролера с цел икономия на енергия.

2. Специално разработен иновативен интелигентен софтуерен алгоритъм управляващ консумацията на енергия от блоковете и възлите на сензорния блок с възможност за предвиждане на консумацията на енергия за бъдещ период и вземащ самостоятелно решение на тази база за начина на управление на захранващия, комуникационния, сензорния и GPS блокове.

Работата на алгоритъма може да се илюстрира със следния пример: в момент $t_0 = 23.30$ часа през нощта, софтуерният алгоритъм след сканиране на текущия капацитет на батерията преценява, че наличната в батерията енергия няма да е достатъчна за нормалната работа на модула, включваща периодично изпращане на данни от сензорите и след около 3 часа работа в този режим батерията ще бъде изтощена напълно.

На база предварително записаната в енергонезависимата памет информация за координатите от GPS модула и системната дата и време (година, месец, час, минута и секунда) системния софтуер знае приблизителния час на изгрева и залеза в конкретния географски район. Въз основа на тази информация се преценява, че най-рано след 7 часа ще има достатъчно светлина за фотоволтаичния панел а текущият капацитет на батерията е за 3 часа нормална работа и около 8 часа режим събиране на данни с изключен комуникационен блок. Софтуерният алгоритъм самостоятелно взема решение да спре предаването на данни, информира за това контролния център,

продължава периодично да събира данни от сензорите и предава всички данни от сензорите след 8 часа, когато има достатъчно енергия за комуникационния блок.

Образци на разработения сензорен модул са показани на снимки 1,2, 3 и 4.



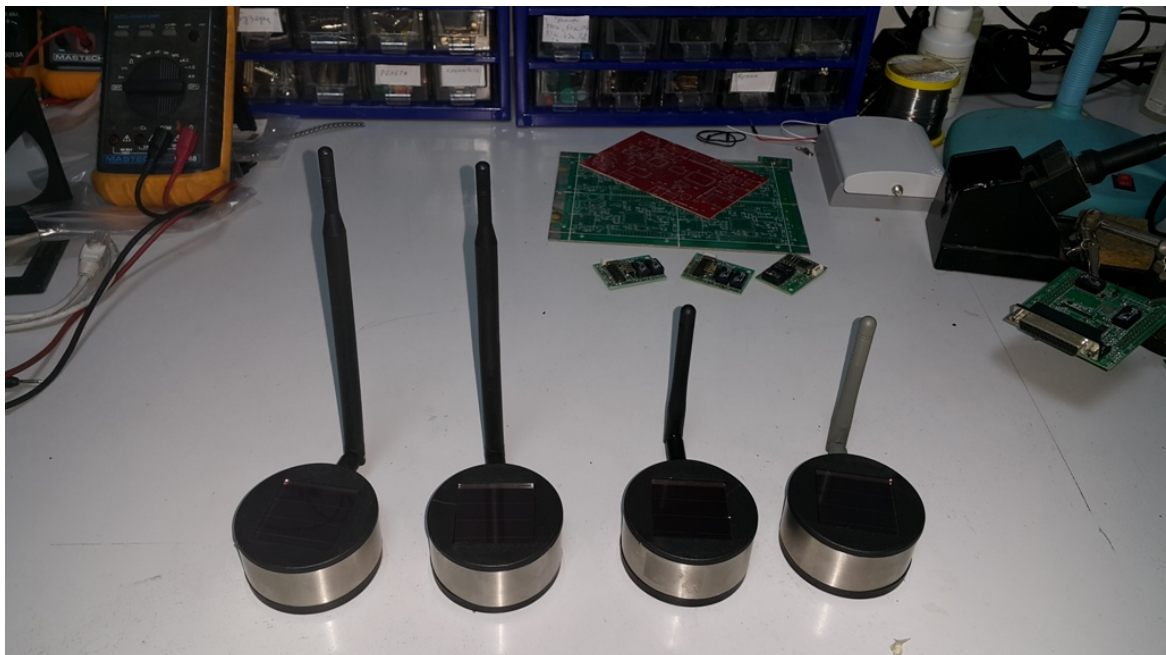
Сн.1



Сн. 2



Сн. 3



Сн.4 Фамилия експериментални сензорни модули

2. МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ЗА ИНТЕГРИРАНЕ НА ДАННИ ОТ ИНТЕЛИГЕНТНИ БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ И СИСТЕМИ.

2.1 Метод и алгоритъм базиран на филтър на Калман за интегриране на данни от интелигентни безжични сензорни мрежи.

Раздел 2.1 описва нов подход и алгоритъм, базиран на филтър на Калман за интегриране на сензорни данни, предназначен за интелигентни безжични сензорни мрежи (IWSN).

Основните резултати, представени в настоящия раздел са отразени в публикация 5 – „Alexander Alexandrov. "AD HOC Kalman filter based fusion algorithm for real-time Wireless Sensor Data Integration", Proc. of the Eleventh International Conference Flexible Querying Answering Systems 2015“ **SPRINGER Vol. 400**, ISBN 978-3-319-26153-9

Предложеният алгоритъм е предназначен за имплементиране в интелигентни безжични сензорни модули свързани в мрежа, описани като хардуерно решение и системна архитектура в глава 1. На базата на разработени функционални прототипи на тези сензорни модули е изградена експериментална интелигентна безжична сензорна мрежа за събиране на метеорологични данни.

Интегрирането на данни от няколко източника се дефинира като *data fusion* като в настоящият дисертационен труд се използва българският термин *интегриране на данни*. В литературата Holl и J.Linas [57][18] дефинират процеса на интегриране на данни като: "техники комбиниращи данни от няколко сензора и свързана с тях информация от бази данни за да се постигне по-голяма точност и достоверност в сравнение с данните получени от един сензор". Интегрирането на сензорни данни е „процес чрез който данните от няколко различни сензора се синтезират за да се изчисли и генерират повече данни, отколкото един сензор може да измери"[19] В общност интегрирането на сензорни данни е софтуерен процес, комбиниращ и интегриращ по специален алгоритъм данните от група сензори за да се подобри надеждността и достоверността на измерените данни.

Интегрирането на данни от няколко сензори коригира отклоненията и колебанията на измерените данни и редуцира съществено потока от данни, който се трансферира през мрежовите възли към приложението за съхранение и последваща обработка и анализ.

Това е важен процес в много приложения, например при анализа на загубите на енергия в различни области [5], [13]. Основното предизвикателство в интегрирането на сензорни данни е ефективно разделяне на полезния сигнал от шума придружаващ измерването.

В практиката са разпространени няколко техники за интегриране и агрегиране на данни от сензори. В зависимост от местоположението на процеса на интегриране на сензорни данни обработката на сензорни данни може да бъде централизирана, децентрализирана и смесена.

Терминът централизиран срещу децентрализиран процес се отнася до мястото, където се извършва интегрирането на данни.

При централизираното интегриране на сензорни данни, сензорните модули препращат всички измерени данни до централен център за обработка, общ за цялата мрежа или група от мрежи, където данните се анализират и обработват с алгоритми за интегриране и анализ.

При децентрализираното интегриране на сензорни данни, сензорните модули или група от сензорни модули поемат пълната отговорност за процеса на интегриране на данни. "В този случай, всеки сензор или платформа може да се разглежда като един интелигентен актив разполагащ в някаква степен със самостоятелност при вземането на решения." [19] В реалните сензорни мрежи съществуват множество комбинации от централизирани и децентрализирани системи.

Настоящата разработка се фокусира върху създаване на архитектура на йерархична децентрализирана система за интегриране на данни базирана на поетапно интегриране на данните чрез филтър на Калман. Интегрирането на данни се извършва локално в сензорни модули с интегрирани сензори за температура, влажност и атмосферното налягане и микропроцесорен блок за обработка на данни. Сензорните модули са обединени във формата на клъстери и на базата на всеки клъстер се формира т.н. „супер сензор“. В клъстерния координатор на този „супер-сензор“ се извършва втори процес на интегриране на сензорни данни. Крайният етап на интегриране на данни е в изнесена извън сензорната мрежа, SOA базирана софтуерна платформа описана в глава 3 с функционалност за интегриране на данни на ниво сензорни мрежи и системи от мрежи.

Преходни модели

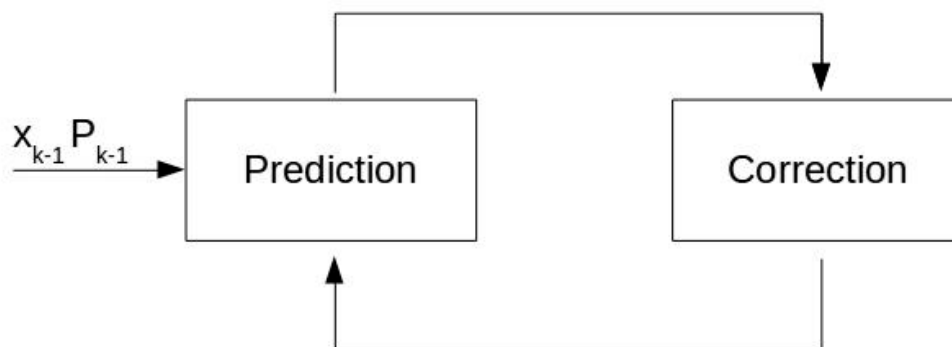
По принцип уравненията при филтъра на Калман се делят на две основни категории:

- уравнения за актуализация по време
- уравнения за актуализиране на измерване.

Уравненията за актуализация по време са отговорни за предсказване (във времето) на текущото състояние и за оценка на грешката за следващия интервал от време.

Уравненията за актуализация на измерване са отговорни за т.н. обратна връзка т.е. за включване на данните от ново измерване в априорната оценка за корекция на данните от следващото измерване. [26]

Уравненията за актуализация по време могат да се разглеждат като уравнения за предсказване на състоянието, докато уравненията за актуализация на измерване могат да се разглеждат като уравнения за корекция на измерването. Фигура 49 илюстрира процеса на предсказване и корекция по метода на филтъра на Калман.



Фиг.49 Процес на предсказване и корекция по метода на филтъра на Калман

Фазата на предсказване стартира с инициализиращото предположение $\hat{x}_{k-1}$ и ковариантния вектор P_{k-1} и се реализира с уравненията:

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k + Cw_k \quad (11)$$

$$z_k = H_k x_k + D_k v_k \quad (12)$$

където $\hat{x}_k$ предсказаната стойност, A е матрица на преходното състояние на процеса, B е входна матрица, C е преходна матрица на шума, u_k е дефинирана входна стойност, w_k дефинира нивото на шум, z_k е т.н. вектор на наблюдение (observation vector), v_k е променлива описваща измерения шум, H_k е матрица на вектора на наблюдение z_k и D_k е матрица описваща влиянието на шума при измерването.

Корекцията на измерването коригира предсказаната стойност чрез актуалното измерване за този времеви интервал.

Математическият апарат на филтъра на Калман е описан подробно в литературата [104][105][110].

При разработката на софтуерния алгоритъм в настоящия дисертационен труд фокусът е основно към процеса на актуализация на измерването.

За целта прилагаме модификация на филтъра на Калман познат в литературата [110] като разширен филтър на Калман (Extended Kalman filter). Уравненията описващи процеса на предсказване и корекция при разширения филтър на Калман са показани по-долу:

$$G_k = \frac{P_k H_k}{H_k P_k H_k^t + R_k} \quad (13)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + G_k (z_k - H_k \cdot \hat{x}_{k-1}) \quad (14)$$

$$P_k = (1 - G_k H_k) \cdot P_k \quad (15)$$

При тези изрази G_k е т.н. коефициент на Калман, P_k е ковариантния вектор на грешката, H_k е матрица на вектора на наблюдение z_k и R_k е ковариационна матрица. Инициализиращата фаза при разширения филтър на Калман започва с изчисляване на коефициента на Калман G_k (формула 13). Следващата стъпка е получаване на стойността на реално измерване и на база на стойността това измерване да се генерира предсказание за следващото състояние чрез добавяне на корекция (формула 14). Последната стъпка е изчисляване на бъдещата грешката на следващото измерване чрез формула (15).

Този рекурсивен принцип е една от най-съществените особености на филтъра на Калман, изискващ минимални изчислителни ресурси за софтуерната реализация на алгоритъма. На практика интегрирането на данни по метода на филтъра на Калман се реализира чрез рекурсивно генериране на корекция на бъдещо измерване на база на предходно измерване.

В разглежданите уравнения всяка от измерените грешки в ковариантната матрица R_k може да се измери преди стартиране на процеса на интегриране на данни по метода на филтъра на Калман. На практика в настоящата разработка софтуерният алгоритъм предвижда няколко off-line измервания преди стартиране на процеса с цел да се дефинира вариацията на измерената грешка.

Във всички случаи разработеният софтуерен алгоритъм предвижда модификация на параметъра R_k . Може да се отбележи че в случаите където R_k е константа и двете вариращи стойности - ковариантната грешка P_k и коефициента на Kalman G_k се стабилизират относително бързо около някаква стойност. При този случай е предвидено параметъра R_k да се прекомпилира чрез стартиране на филтъра преди започване на реалното измерване.

При разработката на софтуерният алгоритъм, базиран на разширения филтър на Калман са взети предвид редица съществуващи разработки подобряващи производителността на работа на алгоритъма.

Последните изследвания касаещи интегрирането на данни по метода на филтъра на Калман са концентрирани основно на специфичните особености на пространствено разпределените безжични сензори [26][105][110] и относително ограничената им способност за измерване и комуникация[104]. Поради редица причини тези изследвания са фокусирани основно на анализ на оптимални стратегии на интегриране на данни и алгоритми, увеличаващи производителността на дадена сензорна мрежа без да се вземат в пред вид ограничения капацитет на захранване на тези модули

Предишните изследвания могат да се разделят основно в две групи:

- алгоритми за интегриране на данни с цел увеличаване на обхвата на измерване
- алгоритми за интегриране на данни с цел повишаване на производителността.

Тези две групи разработки са описани по-долу.

Редица изследвания [46][19][74] увеличават покритието на сензорите чрез разработка на алгоритми за апроксимиране на резултатите на пространствено разпределени сензори [105][110]. Друга група алгоритми [26] са проектирани с цел оптимизиране на обхванатата от сензорите площ - т.е. покриване на максимална площ с минимален брой сензори. Други изследвания [19][105] за разработка на алгоритми за увеличаване на покритието са основани на вероятностни сензорни модели. Експерименталните резултати на [18] показват, как може да се разшири обхвата на група пространствено разпределени сензори чрез групирането им и интегриране на измерените от тях данни.

Теоретични разработки изследващи покритието на големи безжични мрежи са публикувани в [19][26][105][110]. Оптимизация базирана на интегриране на данни на ad-hoc безжични мрежи е разгледана в [32].

Текущата разработка разглежда основно оптимизирането на процеса на интегриране на данни от сензори с ограничен енергиен ресурс.

В контраст от публикациите по-горе, основната цел на настоящата разработка е да подобри надеждността на измерените от сензорите данни, да оптимизира на тази база обхванатата от сензорите площ и в същото време да минимизира консумацията на енергия от сензорните модули. Реализацията на тези цели може да се постигне на база оптимизиране на интервала на измерване чрез анализ на матрицата H_k на вектора на наблюдение z_k , при процеса на интегриране на данни чрез разширения филтър на Калман.

Описание на метода

Разработеният за целите на дисертационния труд метод за интегриране на данни се състои от йерархично децентрализирани процедури за поетапна интеграция на данни.

На първо ниво (локално в сензорния модул) измерените от сензорите данни се интегрират на база разширен филтър на Калман, на второ ниво вече интегрираните данни от сензорните модули в рамките на клъстера се интегрират допълнително на база Централна Гранична Теорема и уравнения на Fraser-Potter. На трето последно ниво сензорните данни на ниво клъстер се обработват в SOA базирана софтуерна платформа за анализ, интеграция и съхранение на сензорни данни на ниво сензорни мрежи и системи от мрежи.

Описание на алгоритъма

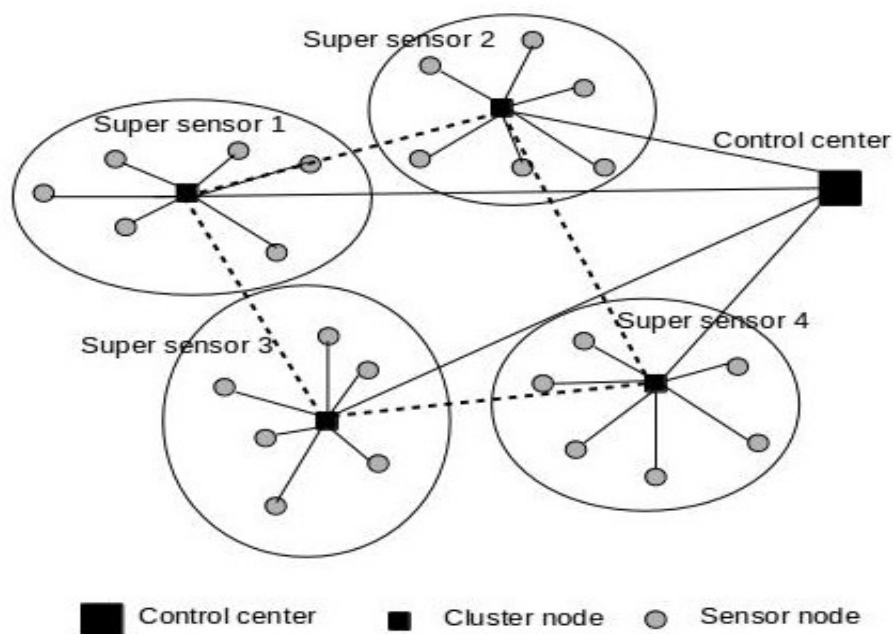
Една от основните задачи на този алгоритъм е подобряване на съотношението на сигнал / шум на измерваните величини и подобряване на надеждността на измерените данни.

Паралелно с процеса на интегриране на данни се анализира матрицата на вектора на наблюдение и по определени критерии, базирани на стойността на предвижданите от филтъра на Калман стойности и реално измерените стойности от сензорите се управлява интервала от време между две измервания на сензори. Целта е оптимизиране на консумацията на енергия при запазване на относително ниско ниво на грешката при измерване (т.е. предварително дефинирано ниво на сходимост на вариациите на измерените данни).

Сензорният модул на който се имплементира разработения алгоритъм е описан в глава 1 на дисертацията. Това е безжичен сензорен модул базиран на комуникационния протокол 802.15.4 ZigBee, разполагащ със сензори за измерване на температура, влажност на въздуха и барометрично налягане. В конкретния случай за нуждите на експеримента и проверката на алгоритъма в паметта на микроконтролера на група модули групирани в клъстери е имплементирана софтуерна реализация на филтъра на Калман, интегриращ получените от сензорите данни. Разработеният алгоритъм е проектиран да управлява експерименталната група от сензорни модули, които са част от безжична сензорна мрежа с клъстерна топология изградена на база на стандарта 802.15.4. Всеки сензорен възел е оборудван с батерийно захранване с контрол на капацитета на батерията и сензори за GPS координати, температура, влажност и атмосферното налягане. За нуждите на разработката и тестването на алгоритъма соларния блок на сензорния модул е изключен.

Комуникацията между възлите и клъстерния координатор се извършва от комуникационния блок с интегриран ZigBee протокол. Първичната обработка на сензорните данни се извършва от вградения в сензорния модул микроконтролер.

Всеки клъстер се състои от сензорни възли и клъстерен координатор (CH-cluster head) както е показано на фиг. 50



Фиг. 50 Интелигентна сензорна мрежа за интегриране на данни с клъстерна топология

Разработеният алгоритъм за интегриране на сензорни данни групира сензорните възли от един клъстер на мрежата в група наречена "супер-сензор". Енергията на супер-сензора е сумата от енергията на всички сензорни възли в нея.

Разстоянието между два супер сензора е максималното разстояние между два сензорни възела, принадлежащи към различни клъстери на мрежата .

Процесът на децентрализираното интегриране на сензорни данни се реализира в рамките на един "супер-сензор".

Както е показано на фиг. 51, първата степен на процеса на интегриране на сензорни данни се реализира в сензорните модули по метода на разширения филтър на Калман. Непосредствено след завършване на цикъла на обработка на направените измервания, интегрираните на първо ниво данни се изпращат на клъстерния координатор, където се извършва второ ниво интегриране на сензорни данни с входни параметри $\hat{x}_1$ до $\hat{x}_6$



Фиг.51 Процес на интегриране на сензорни данни в клъстерния координатор

На базата на тези входни параметри се формира критерий x_n базиран на Централната Гранична Теорема(Central Limit Theorem) и уравненията на Fraser-Potter за изглаждане с фиксирани интервали.

$$x_n = \sigma_n^2 (\sigma_1^{-2} \cdot \hat{x}_1 + \sigma_1^{-2} \cdot \hat{x}_2 + \dots + \sigma_6^{-2} \cdot \hat{x}_6) \quad (16)$$

където

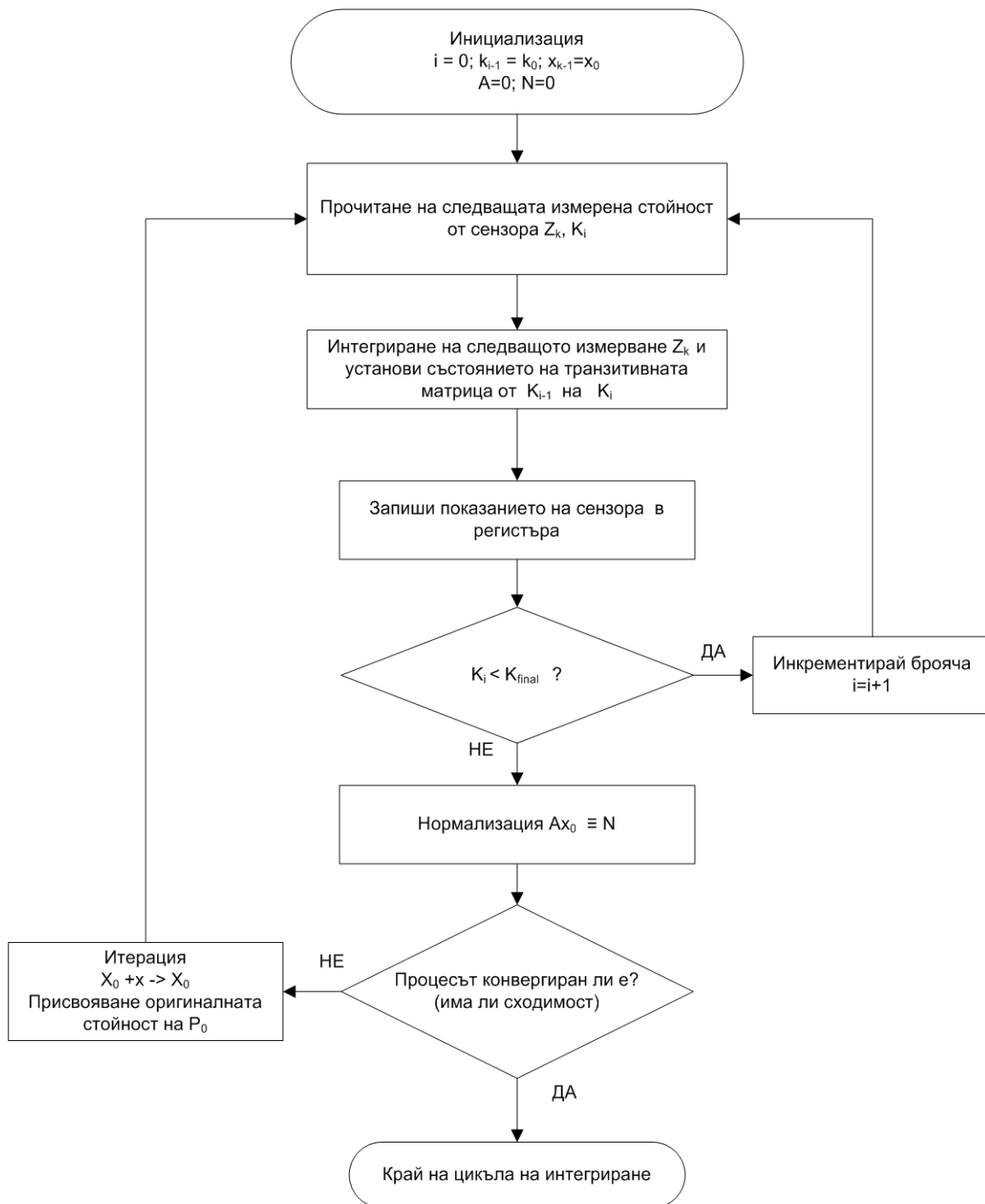
$$\sigma_n^2 = (\sigma_1^{-2} + \sigma_1^{-2} + \dots + \sigma_6^{-2}) \quad (17)$$

е вариация на комбинираното предвиждане на измерената стойност.

Софтуерното решение на алгоритъма за интегриране на данни е реализирано на C++ за сензорите на сензорния модул описан в глава 1 на дисертацията:

- сензор за измерване на температура и влажност HDC1080 на Texas Instruments
- сензор за барометрично налягане BMP280 на BOSCH

Блок-схемата на софтуерния алгоритъм базиран на филтър на Калман е показана на фиг.52:



Фиг.52 Блок схема на алгоритъма за интегриране на сензорни данни.

Разработените софтуерни библиотеки имплементирани в сензорните модули реализират интегриране на данни по метода на филтъра на Калман. Интегрираните данни се изпращат във вид на вектор на измерването, включващ GPS данни от текущото местоположение на сензорния модул.

По подразбиране всички сензори се намират в low-state (sleep) режим и се активират само в момента на извършване на измерването.

Във фърмуера на сензорния модул е предвиден и алгоритъм на анализ на капацитета на хранващия блок, позволяващ сензорният блок да се изключи за определен интервал от време с цел запазване на комуникационните възможности на сензорния модул като цяло.

Разработените софтуерни библиотеки позволяват унифициране на алгоритъма за измерване и интегриране на сензорни данни с цел имплементирането му в различни сензорни модули.

2.2 МЕТОД И АЛГОРИТЪМ ЗА ФОРМИРАНЕ НА КЛЪСТЕРИ В AD НОС ИНТЕЛИГЕНТНИ БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ

2.2.1 Разработка на метод и алгоритъм за формиране на клъстер

Методиката по която се формират клъстери в една сензорна мрежа е важен процес касаещ надеждността на сензорната мрежа като цяло, както и точността и надеждността на измерените и интегрирани в рамките на клъстера данни.

Текущата разработка е базирана на т.н. WCA алгоритъм (Weighted Clustering Algorithm) за анализ на съседните за сензорния модул комуникационни устройства и други сензори и формиране на тази база ad hoc cluster.

Алгоритъмът WCA е базиран на идеи предложени от M.Chatterjee et al. [77] A.Zabian et al. [5] и M. Lehsaini et al [82].

В настоящият дисертационен труд оригиналната версия на алгоритъма е променена и подобрена с въвеждане на нови параметри и уравнения, отразяващи качеството на връзката при комуникация между съседни възли.

При стартиране на алгоритъма за създаване на ad hoc клъстер в процесорния блок са заложили следните предварителни условия:

- всички сензорни модули комуникират един с друг на един и същ честотен канал. В режим ad hoc клъстеринг не се допуска сензорния модул да превключва на други честотни канали освен основния, предварително дефиниран във фърмуера на сензорния модул.
- всеки сензорен модул предварително е определил своите GPS координати чрез активиране на GPS сензора си.
- всеки сензорен модул предварително е определил моментното си енергийно ниво чрез вградения датчик за нивото на батерията.
- при формирането на клъстера се допуска да има само един клъстерен координатор СН (Cluster Head)
- в процеса на избор на клъстерен координатор на мрежата се допуска всеки сензор да система комуникира със своите съседи директно.

Методът за формиране на клъстер се състои от 3 последователни фази: фаза на откриване (discovery phase), фаза на присвояване на роли и фаза на мониторинг на състоянието. За реализацията на този метод са разработени софтуерни алгоритми осъществяващи конкретните процедури за всяка от посочените фази.

Фаза на откриване

Във фазата на откриване се стартира процес на откриване на съседни възли чрез изпращане на broadcast съобщения. На база получените отговори с информация за GPS координатите и силата на измерения от модула RSSI (Received Strength Signal Indicator) приет радиосигнал, на отговарящия сензорен възел се прави анализ и се калкулира т.н коефициент на тегло за всеки сензорен модул[6]. Коефициентът на тегло за всеки модул се изчислява на база брой съседни модули, които могат да се достигнат с един хоп и силата на приетия от сигнал .

За разлика от оригиналният WCA алгоритъм се въвежда нов ключов за научния принос параметър характеризиращ качеството на връзката LQI (Link Quality Indicator) между два съседни възела. При направените изследвания на реална безжична сензорна мрежа се оказва, че не винаги разстоянието между два възела е пропорционално на качеството на комуникацията между тях. В редица случаи връзката между два възела намиращи се на относително голямо разстояние един от друг е по-надеждна и изразходва по-малко енергия при обмен на данни в сравнение с връзката между възли намиращи се в непосредствена близост един от друг, но разделени от радио екранираща преграда или попадащи в зона с голям радиошум.

Параметрите въз основа на които се изчислява коефициентът на тегло K_{weight} на всеки сензорен възел N_i са следните:

- C_i характеризира броя на съседните възли намиращи се в обсега на възел N_i

$$C_i = |N(i)| = \sum_{j \in N(i), i \neq j} \{dist(i, j) < S_{range}\} \quad (18)$$

изразът $dist(i, j)$ характеризира дистанцията между два възела намиращи се в обсега на комуникация.

S_{range} е коефициент характеризиращ максималното разстояние на което комуникационен възел може да обменя данни с друг възел от мрежата и зависи от конкретната хардуерна имплементация на мрежовия възел.

- D_i характеризира средната сума от дистанциите между възел N_i и съседните възли j .

За всеки възел D_i се изчислява съгласно [1]. [2]

$$D_i = \frac{1}{C_i} \sum_{j \in N(i)} \{dist(i, j)\} \quad (19)$$

- M_i е коефициент характеризиращ мобилността на даден мрежов възел т.е. вероятността даден мрежов възел да променя своето местоположение във времето T .

$$M_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{(X_t - X_{t-1})^2 + (Y_t - Y_{t-1})^2} \quad (20)$$

където е (X_t, Y_t) и (X_{t-1}, Y_{t-1}) са GPS координатите на възела в момент t и $t-1$.

- $E_{current}$ характеризиращ моментното количество енергия с което разполага възел N_i

В общия случай

$$E_{current} = E_i - (E_{rx} \cdot t_1 + E_{tx} \cdot t_2 + E_{comp} \cdot t_3 + E_{sensor} \cdot t_4) \quad (21)$$

където:

E_i е първоначалното количество енергия с което разполага възелът;

E_{rx} - количеството енергия което се изразходва в режим на приемане на възела;

E_{tx} - количеството енергия което се изразходва в режим на предаване на възела;

E_{comp} - количеството енергия което се изразходва от микроконтролерният блок за управление на дейностите по формиране на клъстер;

E_{sensor} - количеството енергия което се изразходва в от сензорите за изчисляване на местоположение на възела;

$t_1 - t_4$ са интервалите от време през които всеки един блоковете на възел консумира енергия (E_{rx} , E_{tx} , E_{comp} и E_{sensor});

- K_{i_link} характеризиращ качеството на връзката между два възела. Този коефициент е се изчислява по формулата:

$$K_{i_link} = K_{tx_j} + \frac{1}{C_i} \sum_{i=0}^j K_{i_RSSI} \quad (22)$$

където K_{tx} е коефициент отчитащ мощността на излъчения от възела N_i сигнал, а K_{RSSI} е коефициент отчитащ силата на приетия сигнал излъчен от съседен възел N_j

Коефициентът K_{i_link} отчита качеството на комуникационната среда между два възела и позволява оптимизиране на процеса на създаване на клъстер.

Тегловният коефициент на възел N_i се изчислява съгласно формулата:

$$P_i = \omega_1 C_i + \omega_2 D_i + \omega_3 M_i + \omega_4 E_{i_current} + \omega_5 K_{i_link} \quad (23)$$

Фаза на присвояване на роли

След процеса на изчисляване на първия клъстерен координатор процедурата се повтаря с останалите възли, които все още не са част от вече избран клъстер до пълно изграждане на мрежата.

2.2.2 Софтуерен алгоритъм

The diagram illustrates a peer-to-peer network topology with two nodes, Възел 1 and Възел 2, represented as circles. A horizontal dashed arrow labeled REQ_ID points from Възел 1 to Възел 2. A curved dashed arrow labeled JOIN_CH points from Възел 1 to Възел 2. A curved dashed arrow labeled ACK_ID points from Възел 2 back to Възел 1. Three dashed arrows labeled REQ_ID point away from Възел 1 towards the left. One dashed arrow labeled ACK_ID points away from Възел 2 towards the right.

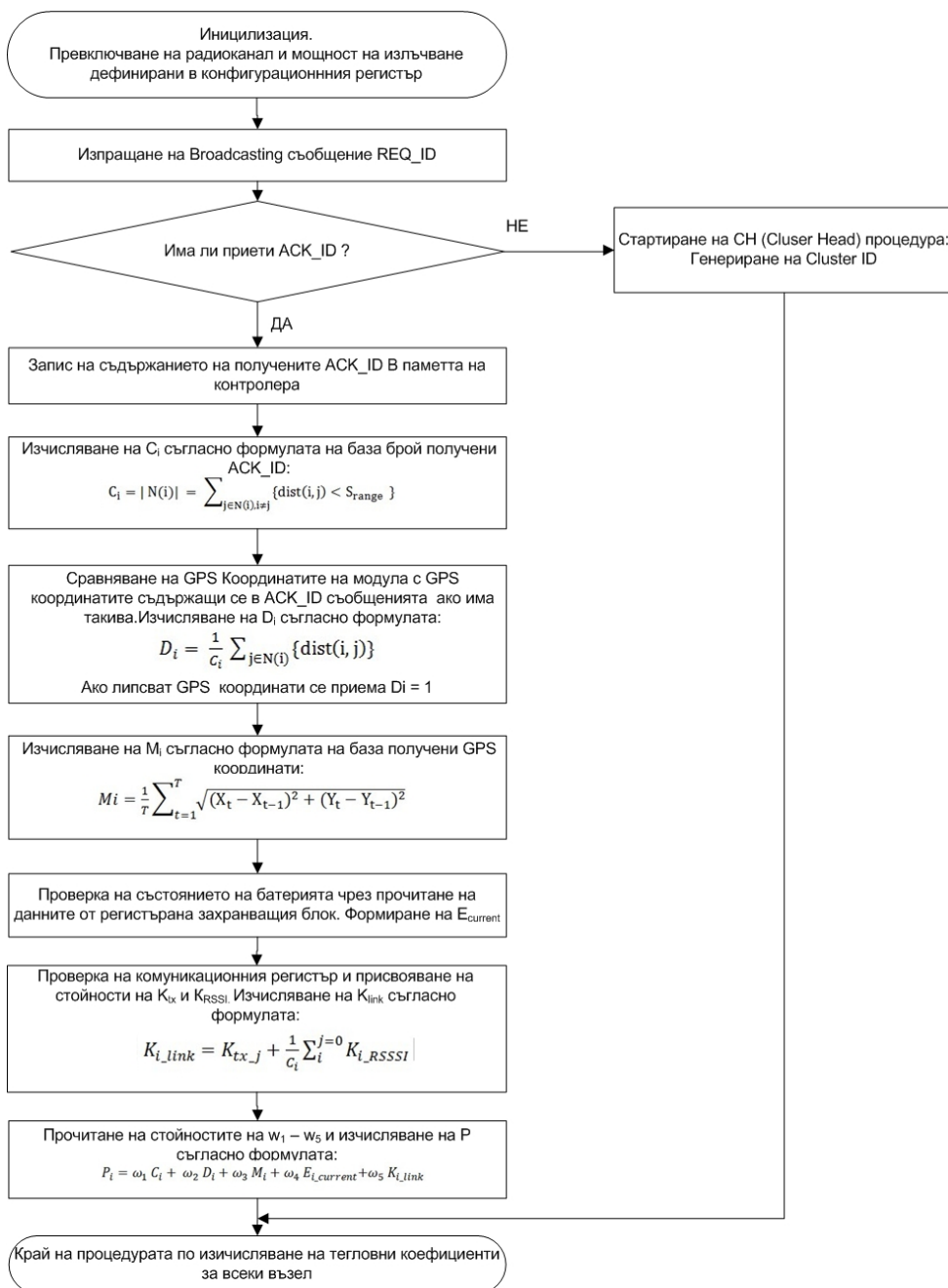
Етап-1 Фаза откриване. Изчисляване на параметри на възел

ACK_ID съобщението се изпраща само като отговор на REQ_ID съобщение и съдържа, ID кода на отговарящия модул, координатите на модула и поле за тегловния коефициент P което на първия етап е празно. При конкретната разработка на сензорния

модул REQ_ID и ACK_ID, съобщенията съдържат и информация за GPS координатите на предаващия, респективно приемащия модули и код информиращ за силата на предадения/приетия сигнал.

С цел по-голяма универсалност на предлагания алгоритъм се приема че REQ_ID и ACK_ID обменят само данни за ID кода на модулите, намиращи се в обсега на комуникация.

Съгласно тези допускания е формиран следния софтуерен алгоритъм за изчисляване на параметри на възел показан на фиг. 54:



Фиг.54 Алгоритъм за изчисляване на параметри на мрежов възел

Етап-2 Фаза присвояване на роли

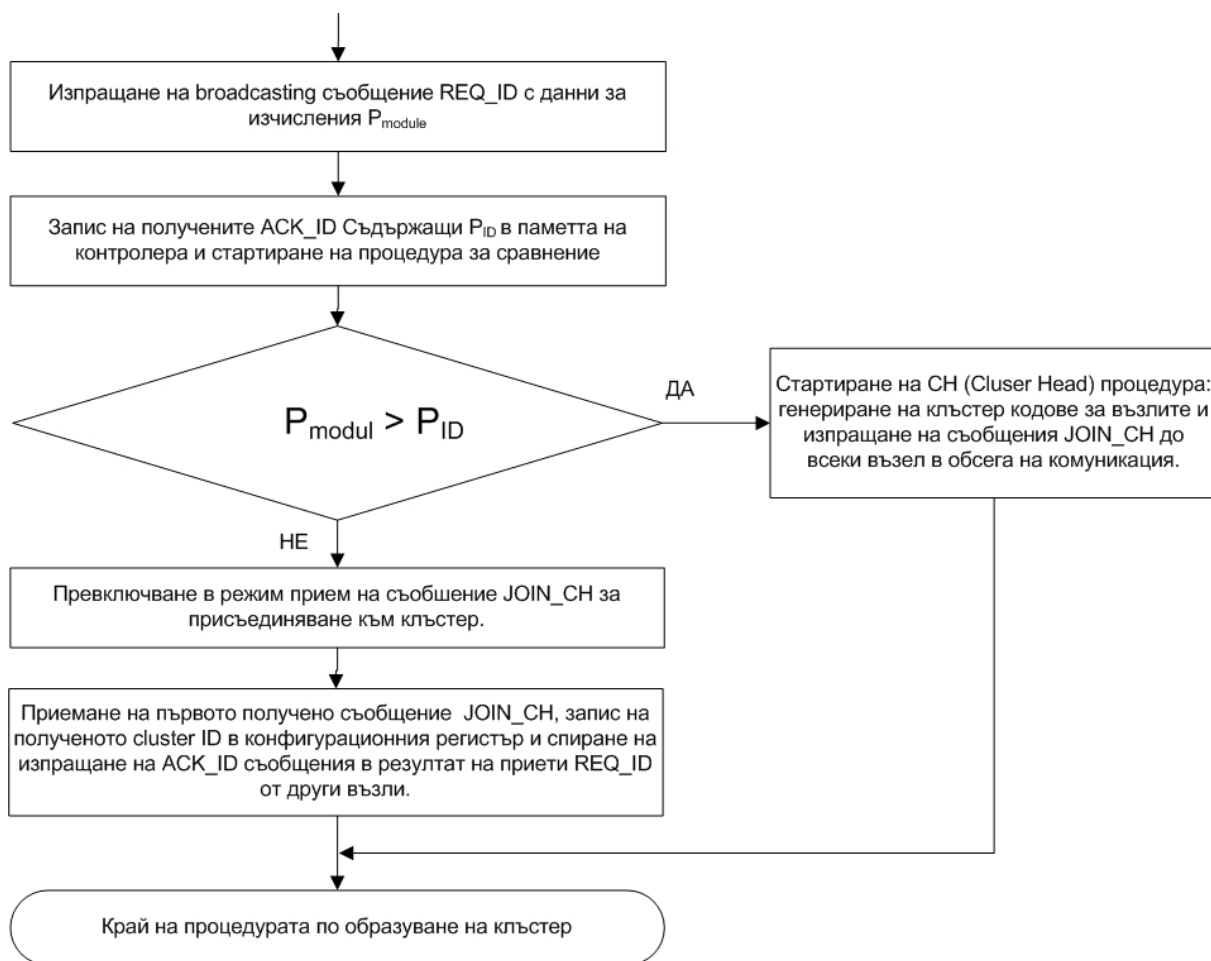
На този етап се използват основно 2 типа пакети за комуникация: JOIN_CH и ACK_CH

JOIN_CH е съобщение, което се изпраща индивидуално до всеки възел в обсега на комуникация от възела с изчислен най-голям тегловен коефициент, който си присвоява ролята на клъстерен координатор (CH-Cluster Head). Това съобщение съдържа генериран от клъстерния координатор ID код с който приемащия съобщението възел се присъединява към новосформирания клъстер.

ACK_CH е съобщение изпращано като отговор на ACK_CH с което се потвърждава присъединяването на възела към клъстерния координатор.

След изпращането на това съобщение възелът спира да отговаря на други REQ_ID съобщения, изпращани от други възли.

Процедурата по присвояване на роли е реализирана като софтуерен алгоритъм, блок-схемата на който е показана на фиг. 55:



Фиг. 55 Блок-схема на процеса на присвояване на роли

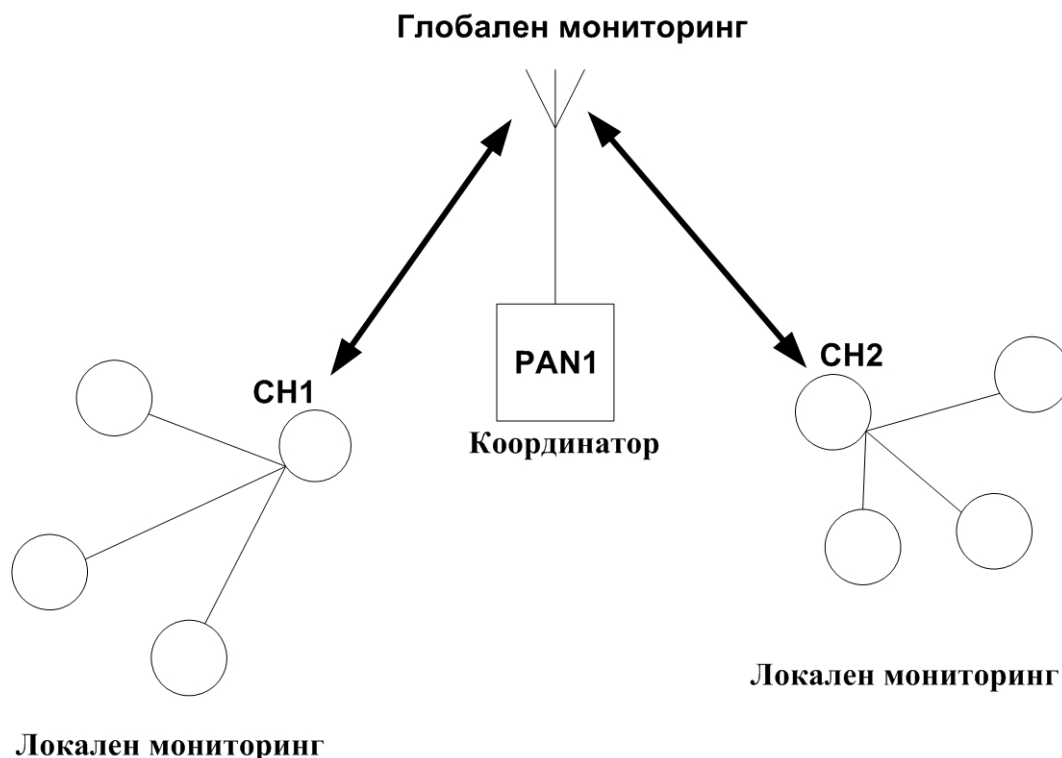
Етап -3 Фаза на мониторинг

Мониторингът в безжичните сензорни мрежи с ad hoc функционалност е важна фаза от работата на тези мрежите. На база резултати от мониторинга на една сензорна мрежа при нужда се извършва адаптивно преконфигуриране на сензорната мрежа и преразпределение на ролите на комуникационните възли. [116]

Във фазата на мониторинг се анализират основно 5 ситуации водещи до адаптивно преконфигуриране:

- изчерпване на батерията на възел близо до критичен минимум;
- добавяне на нов сензорен модул в мрежата;
- преместване на сензорен модул (типична ситуация при мобилните мрежи);
- отказ на сензорен модул;
- критична промяна на качеството на връзката (LQ - Link quality) между съществуващ клъстерен координатор и възли от клъстера;

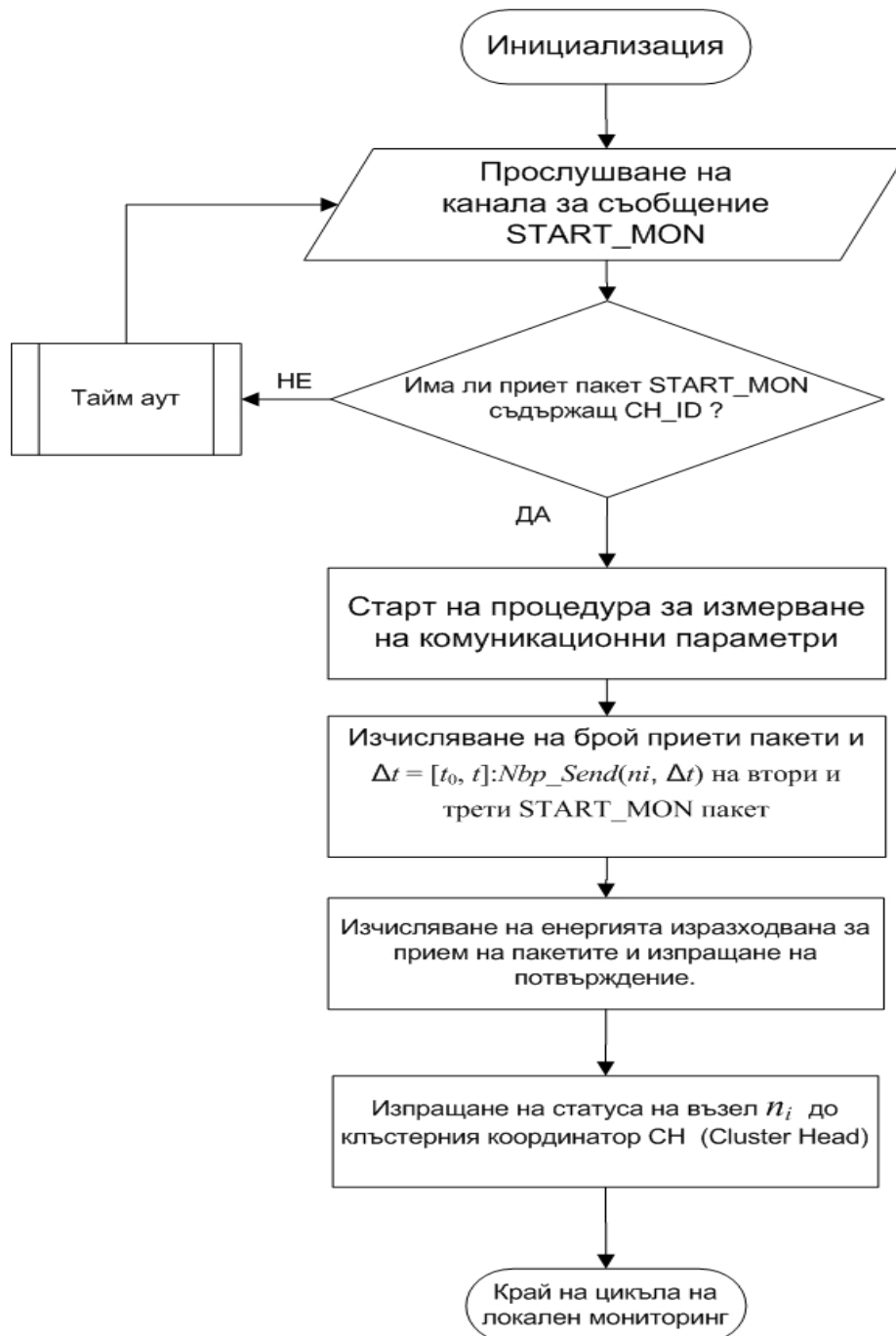
Мониторингът се извършва на две нива - на ниво клъстер (local monitoring) и на ниво мрежа(global monitoring). Подобен подход се използва от Da Silva и др. [38] и Benahmed и др. [56].



Фиг. 56 Фази на мониторинг.

Алгоритъм на фаза мониторинг

Блок-схемата на софтуерният алгоритъм реализиращ работните процеси на фаза мониторинг изпълняван от възел n_i е показан на фиг. 57:



Фиг. 57 Блок-схема на алгоритъма за локален мониторинг

Всеки клъстерен координатор CH_i стартира периодично процедура на мониторинг към възлите, принадлежащи на неговия клъстер чрез изпращане на специална поредица broadcasting съобщения START_MON, състояща се от 3 пакета(START_MON1и START_MON2

Всеки възел n_i ($i < j$) от клъстера i при получаване на първия пакет START_MON стартира своя процедура по изчисляване на параметрите на връзката както следва:

- брой пакети изпратени от CH_i до n_i и времеви интервал между тях $\Delta t =$

$[t_0, t]: Nbp_Send(n_i, \Delta t);$

- закъснението между два последователни пакета:

$$Delay(n_i, t) = Arrival_{p_Ti} - Arrival_{p_Ti-1} \quad (24);$$

- енергията консумирана от възел n_i за приемане на пакетите и изпращане на потвърждение

$$E_c(n_i, \Delta t) = E_r(n_i, t_0) - E_r(n_i, t_1) \quad (25);$$

Δt е времеви интервал $[t_0, t_1];$

$E_r(n_i, t_0)$ енергийното ниво на възел n_i във време t_0 ;

$E_r(n_i, t_1)$ енергийното ниво на възел n_i във време t_1 ;

$E_c(n_i, \Delta t)$ енергията консумирана от възела n_i за време Δt ;

След всяко изчисление на комуникационните и енергийни параметри възел n_i изпраща своя статус до клъстерния координатор CH_i .

Статусът на всеки възел съдържа следната информация:

$$I_d, Nbp_{send}(n_i, \Delta t); Nbp_{received}(n_i, \Delta t); Delay(n_i, t); E_c(n_i, \Delta t) \quad (26)$$

Съобщенията получени като отговор от START_MON се записват в паметта на клъстерния координатор CH_i за последващ анализ.

- Ако даден възел n_i не отговори на три последователни цикъла на START_MON той се счита за изчезнал.

След приключване на 3 последователни START_MON цикъла, всеки клъстерен координатор CH_i изпраща резултатите от локалния мониторинг на PAN координатора на мрежата или до контролния сървър в зависимост от конкретната имплементация на сензорната мрежа.

Процесът на формиране на клъстери приключва с тази фаза.

Фазата на мониторинг се изпълнява циклично през предварително дефинирани интервали по време на работа на мрежата.

2.3 МЕТОД И АЛГОРИТЪМ ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ НА КОНСУМАЦИЯТА НА ЕНЕРГИЯ ОТ СЕНЗОРЕН МОДУЛ ПО ВРЕМЕ НА ПРОЦЕСА НА ИЗМЕРВАНЕ И ПРЕДАВАНЕ НА ДАННИ В СЕНЗОРНА МРЕЖА

За целите на експеримента по реализация и тестване на метода и алгоритъма за оптимизация на консумацията на енергия е използван сензорния модул описан в глава 1 на настоящия дисертационен труд.

Както бе отбелязано в глава 1 сензорният модул е с гъвкава архитектура и в зависимост от целите на експеримента може да работи в няколко режима на работа:

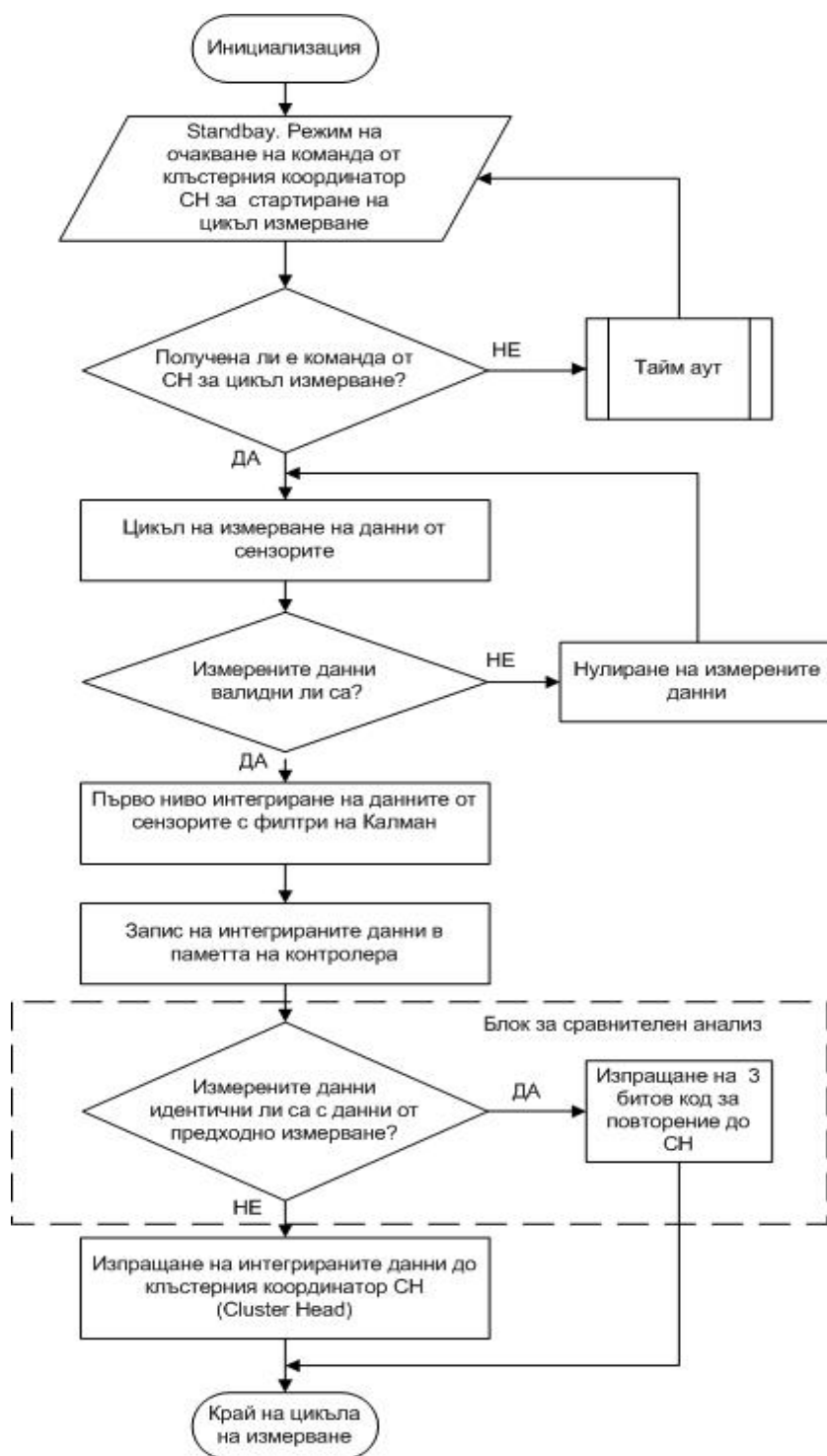
- периодично събиране, обработка, анализ и предаване на данни от датчиците в сензорния блок по команда от клъстерния координатор;
- събиране, обработка, анализ и предаване на данни от сензорния модул при промяна на измерените данни от някой от над предварително дефиниран праг;
- събиране, обработка, анализ и предаване на данни от сензорния модул при промяна на местоположението на сензора или при излизане на същия от предварително дефиниран район;
- комбинация от два или повече по-горе описани критерии за обработка и анализ на данни;

Описаните по-горе режими на работа се активират в зависимост от задачите, които са поставени на сензорния модул и позволяват гъвкаво адаптиране при промяна на околната среда в обсега на измерване на сензорите. Предлаганият метод и алгоритъм за оптимизация на консумацията на енергия може да работи при всички режими на работа на сензорния модул, описани по-горе.

Съществена новост на разработения алгоритъм е блокът за сравнителен анализ на интегрираните данни. Въз основа на решение на този блок, сензорният модул самостоятелно решава дали да изпрати вече измерените и интегрирани данни от сензорите или да изпрати код с който да информира клъстерния координатор или контролния център, че текущо измерените данни от сензорите са идентични в рамките на инструменталната грешка с предходни изпратени до него данни от тези сензори.

Това позволява съществено редуциране на енергията, необходима на комуникационния блок на сензорния модул, подобрява автономността му и води до намаляване на комуникационния трафик и икономия на енергия от клъстерния координатор, необходима за второ ниво интегриране на данни.

Алгоритмът на работа на интелигентния сензорен модул в режим на измерване е показан на блок диаграмата на фиг. 58



Фиг. 58 Алгоритъм на работа на интелигентния сензорен модул в режим на измерване

При стартиране (режим инициализация) модулът измерва еднократно текущите си GPS координати, калибрира датчиците от сензорния блок спрямо параметрите на околната среда и влиза в режим очакване на команда от клъстерния координатор.

Показаният на фиг. 58 работен алгоритъм на сензорния модул стартира по подразбиране и включва следните основни етапи, циклично повтарящи се след приключване на режима на инициализация:

- влизане в режим standby, включващ режим циклично прослушване на радиоканала за команди от клъстерния координатор;
- стартиране на цикъл измерване при наличие на команда от клъстерния координатор СН (Cluster Head);
- валидиране на данните от сензорите. При наличие на грешка при измерването нулира данните от сензора и повтаря измерването;
- първи етап (ниво) на интегриране на измерените от сензорите данни с филтри на Калман съгласно алгоритъма описан в глава 2.1;
- запис на интегрираните данни в енергонезависимата памет на сензорния модул;
- стартиране на процес на сравнителен анализ на текущо измерените и интегрирани данни с данни записани в паметта на модула от предходния цикъл измерване;

Ако направеният анализ покажи че новите данни са идентични (отклонението е в рамките на допустимата грешка) се генерира 3 битов код за идентичност на данните, който се изпраща вместо стандартния пакет с данни до клъстерния координатор.

Ако данните не са идентични, те се изпращат до клъстерния координатор за второ ниво интегриране и/или конвергенция базирана на Central Limit Theorem и Fraser-Potter обработка.

След приключване на цикъла по измерване, валидиране, интегриране, сравнителен анализ и изпращане на данните, сензорния модул влиза в режим standby с изключение на случаите, когато по команда от контролния център е стартирал режим за циклично измерване на данни.

2.4 МЕТОД ЗА ОПТИМИЗАЦИЯ НА КОНСУМАЦИЯТА НА ЕНЕРГИЯ ОТ СЕНЗОРЕН МОДУЛ НА НИВО КОМУНИКАЦИЯ В СЕНЗОРНА МРЕЖА С КЛЪСТЕРНА ТОПОЛОГИЯ.

За целите на разработката и тестването на метода е използван сензорния модул, описан в глава 1 на настоящия дисертационен труд. Предлаганият нов метод за оптимизация на консумацията на енергия се отнася до сензорни мрежи, използващи за комуникация протокол 6LoWPAN.

Стандартът и едноименният протокол 6LoWPAN са сравнително нови и осигуряват IPv6 базирана комуникация на low-power безжични устройства. В конкретният случай 6LoWPAN RFC дефинира мрежовия слой на IP базирани безжични мрежи, които използват IEEE 802.15.4 физически и medium access слоеве. Разработката на 6LoWPAN е реализирана за да подобри комуникацията между малки мрежови системи като безжичните сензорни мрежи. При стандартния IPv6 размера на пакета е 1280 октета, което е прекалено много за пакета на 802.15.4 протокола и има нужда от фрагментиране[5][91][92].

Друг основен проблем е че базовият IP routing протокол не може да работи с ефективно с устройства в намиращи се в sleeping режим. На практика 6LoWPAN се използва като допълнителен слой за адаптиране между MAC и мрежовия слой. Така се осигурява компресиране на размера на хедъра на пакета при запазване на основната IPv6 функционалност.

Тъй като 6LoWPAN протокола не осигурява никакъв специфичен алгоритъм за икономия на енергия при обмен на данни, най-простото и ефективно решение в конкретния случай е използване на 6LoWPAN базирани устройства използващи маркери (beacon-enabled IEEE 802.15.4 протокол) [91][122]. На практика въпреки че MAC слоя теоретично може да работи като с изпращане на маркери (beacons) така и в режим без изпращане на маркери, болшинството от разработените до момента 6LoWPAN имплементации поддържат само режим без изпращане на маркери, като маркери се използват само за откриване на FFD или RFD устройства и асоцииране на същите към мрежата. Основната причина да не се имплементира режим на изпращане на маркери в 6LoWPAN спецификацията е че IP протокола и в частност 6LoWPAN очаква линка винаги да е активен [61].

В конкретната разработка, за осигуряване на псевдо непрекъснатост на безжичните IP базирани линкове се използва т.н. duty-cycling техника, чрез която се постига илюзията за горните слоеве (мрежов и апликационен слой), че приемника винаги е активен и

линка е в т.н. up state, докато на практика устройството е изключено от мрежата през по-голямата част от времето.

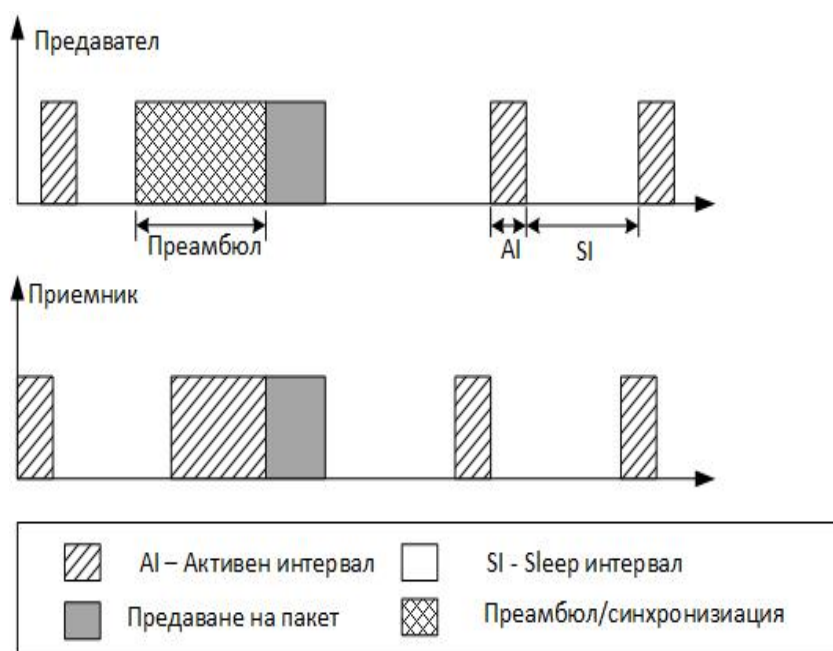
Терминът Duty cycle (Dc) дефинира съотношението в проценти между периода на активност на един електрически сигнал спрямо целият период на сигнала и математически DC се изразява чрез формулата:

$$Dc = \frac{T}{P} \cdot 100 \quad (27)$$

където DC е duty cycle в проценти, T е времето през което сигнала е активен а P е целият период на сигнала.

Освен duty-cycling техника в предлаганата разработка, експерименталната 6LoWPAN базирана сензорна система използва и т.н. Low Power Listening (LPL) технология [9], която позволява на мрежовите устройства да достъпват радио канала в напълно разпределен и асинхронен режим.

Графично представяне на LPL е показано на фиг. 59



Фиг.59 Графично представяне на технология LPL

Алгоритъмът на работа на LPL технологията е следният: всеки сензор периодично се събужда, включва си приемника и проверява ефира за активност. Ако няма активност приемника се изключва и сензора влиза отново в спящ режим. В противен случай устройството остава активно, докато приеме пакета от данни или в случай на конфликт до края на timing цикъла.

Тъй като конфликтите между пакетите при радио комуникацията влошават енергийната ефективност на устройството, изборът на подходящ честотен канал е от съществено значение. Въпреки това, този начин на работа е успешно адаптиран и при устройства работещи в среда с високо ниво на радио шум.

За избягване на загуба на пакети докато устройството се намира в спящ режим размерът на синхронизиращата поредица преди предаване на пакет т.н. преамбюл трябва да е толкова дълъг, колкото интервала между два последователни LPL цикъла.

Анализ и оптимизация на работата на сензорния модул с протокол 6LoWPAN в зависимост от мрежовите параметри

Съгласно описания в раздел 2.3 метод и алгоритъм на работа, сензорния модул се намира основно в sleeping mode с цел намаляване на консумацията на енергия.

При конкретната разработка основно внимание е обърнато на оптимизация на LPL параметрите на модула.

Основните LPL параметри дефиниращи един цикъл на предаване на данни са Sleep Interval (SI) и Activity Interval (AI). Както се вижда от фиг. 59 един LPL цикъл е съставен от AI следван от SI. В конкретната хардуерна имплементация параметъра SI се дефинира от програмируем таймер и поради това се приема като конфигурируем параметър подлежащ на анализ и оптимизация [59]. В същото време AI е базиран на заявките на предаващите устройства и няма възможност да се променя в големи граници. В момента, в който се излъчи пакет по време на AI, приемната страна се активира до приемане на целия пакет. Поради тази причина целият трафик в сензорната мрежа зависи от цикъла (Duty Cycle – DC) на предаващите възли в мрежата [73].

За един 6LoWPAN възел изпращащ периодично информация с определена скорост DC може да се контролира чрез оптимизация на продължителността на SI и на скоростта на предаване на пакетите [91]. При средно натоварена мрежа средният интервал между пакетите трябва да е по-голям от един LPL цикъл.

Вследствие на това един DC на една LPL мрежа може да се изчисли като:

$$Dc = \frac{AI + Tr.N_{pps}}{AI + SI} \quad (28)$$

където AI и SI са продължителността на активния интервал (интервал на излъчване) и sleepeng интервала съответно. T_p е времето за предаване на пакета и Nppc е средният номер на пакетите в един LPL цикъл.

При средно натоварване би трябвало $N_{ppc} \ll 1$

Съответно

$$T_{ps} = T_{pre} + T_{pkt} + D_{tx} \quad (29),$$

където T_{pre} е продължителността на преамбюла, който е еквивалентен на SI, T_{pkt} е времето за предаване на пакета а D_{tx} е хардуерно закъснение, което е около 20ms за конкретния безжичен модул.

Параметърът N_{ppc} може да се получи от израза:

$$N_{ppc} = \frac{AI + SI}{T_{send}} \quad (30)$$

където T_{send} е периода на изпращания пакет.

Като заместим T_p и N_{ppc} във формула (28) за DC се получава израз на DC на един 6LoWPAN възел като функция на параметрите на мрежата:

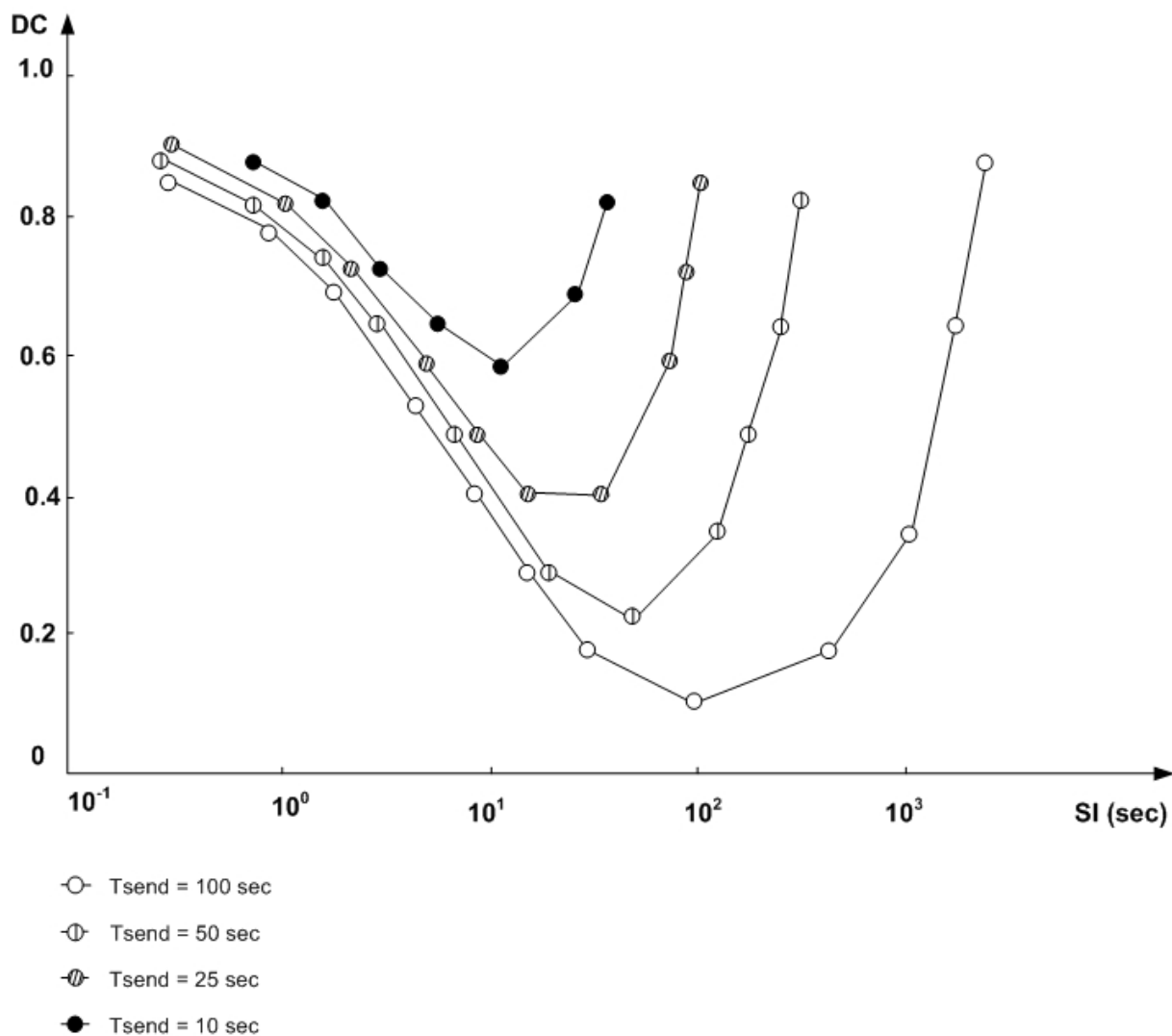
$$D_c = \frac{AI}{SI + AI} + \frac{SI + T_{pkt} + D_{tx}}{T_{send}} \quad (31)$$

След изследване на уравнение (31) се оказва се, че DC се изменя нелинейно и има глобален минимум и има възможност за оптимизация на консумираната енергия за даден сензорен модул чрез промяна на SI. Оптималният SI може да минимизира DC и може да се изчисли чрез намиране на първата производна на ф-ла 31. :

$$SI = \sqrt{AI \cdot T_{send} - AI} \quad (32)$$

Виждаме че оптимизацията на SI оказва влияние на DC, който става относително по-малък при намаляване на периода на предаване на пакети. Това показва че при LPL, когато скоростта на пакетите е голяма може да се постигне по-голяма ефективност на предаване на данни при едно и също натоварване на мрежата.

Резултатите от експериментите направени с реална сензорна мрежа базирани на описания по-горе метод за оптимизация са показани на фиг. 60



Фиг. 60 Резултатите от експериментите базирани на метода за оптимизация

Както се вижда от фиг.60 оптимизацията на SI (Sleeping Interval) оказва влияние на DC (Duty Cycle). Например при Tsend = 50sec. и SI = 82 sec. DC е от порядъка на 0.21 което представлява глобален минимум за това ниво на натоварване на мрежата. Всяка промяна на стойността на SI различна от посочената по-горе при константен Tsend води до увеличаване на DC и от там повишен разход на енергия за предаване на единица информация.

Това означава, че при всяко ниво на натоварването на мрежата в определени граници може да се намери оптимален SI при който се изразходва най-малко енергия за предаване на единица информация.

Конкретната разработка е приложима основно при сензорни мрежи с клъстерна топология, използващи протокол 6LoWPAN. С известни модификации предлаганият метод може да се използва и при мрежи с дървовидна топология.

2.5 Изводи

Раздел 2.1 описва процеса на разработване на подобрен метод и софтуерен алгоритъм за интегриране на сензорни данни, базиран на филтъра на Калман. В отличие на публикувани в литературата алгоритми за интегриране на сензорни данни, новата разработка реализира двустепенен процес на интегриране на данни – локално в самия сензорен модул и групово на ниво клъстер.

Новост при разработката на предлагания софтуерен алгоритъм е включеният в него блок за анализ на матрицата на вектора на наблюдение. На основание на определени критерии, базирани на стойността на предвижданията от филтъра на Калман стойности и реално измерените стойности от сензорите, алгоритъмът променя динамично интервала от време между две измервания на сензори с цел оптимизиране на консумацията на енергия при запазване на относително ниско ниво на грешката при измерване. Един от основните научни приноси в предлаганата разработка е и идеята за поддържане на постоянно ниво на сходимост на грешката, чрез динамична промяна на интервала на измерване.

Представеният нов метод и софтуерен алгоритъм дава възможност информацията от различни сензори да се комбинира и интегрира в реално време. Първата степен на интегриране на данни с филтри на Калман се реализира локално в интелигентните сензорни модули описани в глава 1 на настоящия дисертационен труд, а втората в клъстерния координатор. Такава йерархична структура дава по-голяма адаптивност и надеждност на системата като цяло и позволява добавяне на нови клъстери по време на ad hoc формирането на сензорната мрежа.

Приносът е отразен в публикация 5 – „Alexander Alexandrov. "AD HOC Kalman filter based fusion algorithm for real-time Wireless Sensor Data Integration", Proc. of the Eleventh International Conference Flexible Querying Answering Systems 2015“ **SPRINGER Vol.400**, ISBN 978-3-319-26153-9

Предложеният метод не изисква централизирано управление при реконфигуриране на мрежата. В случай на отказ на сензорен модул, клъстерният координатор към който е включен модула ще реконфигурира локално клъстера и цялата сензорна мрежа ще продължи да работи.

Раздел 2.2 описва съществено подобрение на т.н.. WCA алгоритъм (Weighted Clustering Algorithm), предложен от M.Chatterjee et al. [77] A.Zabian et al . [5] и M. Lehsaini et al[82]. и дефиниран в предходни публикации. На базата на тези разработки

е разработен нов алгоритъм, отличаващ се с принципно нова функционалност, водеща до формиране на клъстери с приоритет на качеството на свързаност между възлите, а не клъстери формирани на база разстояние между възлите. Този принос в алгоритъма редуцира съществено риска от разпадане на мрежата при отказ на някой от формираните клъстерни координатори.

В отличие от класическия WCA алгоритъм е въведен нов параметър K_{i_link} отчитащ не разстоянието между два съседни възела, а качеството на комуникацията между тях. Допълнителна особеност при новия алгоритъм е и критерия за избор на СН - в отличие от WCA, тук за клъстерен координатор се избира възелът с най-голям коефициент на тежест с цел намаляване на броя на СН възлите и увеличаване на броя на членовете на клъстера.

Тези нови компоненти подобряват съществено работата на алгоритъма за избор на клъстерни координатори и формиране на клъстери при ad hoc безжични сензорни мрежи. В следствие на тях се дава възможност за съществено оптимизиране на процеса на маршрутизация на пакети между клъстерните координатори и PAN координатора.

В раздел 2.3 е описана разработката на нов метод и софтуерен алгоритъм за оптимизация на консумацията на енергия от сензорни модули по време на процеса на измерване, интегриране на данни и предаване на интегрираните данни до контролния център.

В отличие на публикувани в литературата алгоритми за оптимизация на консумацията на енергия по време на измерване и интегриране на измерените данни, новата разработка съчетава процеса на оптимизацията на консумираната от сензорния модул енергия с локален процес на интегриране на данни, базиран на филтър на Калман, явяващ се част от процеса на вземане на решение.

Ключов принос в новия метод е въведения блок за анализ на локално интегрирани данни и интелигентен адаптивен алгоритъм, позволяващ на модула самостоятелно да вземе решение дали да изпрати данните до клъстерния координатор или само да генерира код указващ, че новите интегрирани данни са идентични в рамките на допустимата инструментална грешка с предходни вече изпратени сензорни данни. Това позволява съществено намаляване на трафика в мрежата и редуциране на процесорна мощност и консумация на енергия за обработка на сензорни данни, по същество идентични с предходни сензорни данни.

На база получените резултати може да се направи извода, че предлаганият метод за оптимизация дава възможност за икономия на енергия при обмен на данни между сензорния модул и координатора на мрежата, както и в режим на маршрутизация на данни между отделните възли на сензорната мрежа.

Раздел 2.4 разглежда нов метод за оптимизация на работата на сензорни модули свързани в мрежа, използващи комуникационен протокол 6LoWPAN. Методът е базиран на оптимизация, основаваща се на динамична промяна на SI (Sleeping Interval) в зависимост от текущото натоварване на мрежата и води до реална икономия на енергия.

При направените сравнителни експерименти между две сензорни мрежи с еднаква топология и съставени от по 10 идентични сензорни модула описани в глава 1, модулите от експерименталната сензорна мрежа с имплементиран метод за динамична оптимизация на SI, съхраниха средно 8-10% повече енергия в сравнение с модулите от мрежата без имплементиран алгоритъм.

Съдържанието на раздел 2.4 е отразено в публикация 2 – „Alexandrov, A., V. Monov, ZigBee smart sensor system with distributed data processing, Proc. of the 7-th IEEE Conference Intelligent Systems-2014“ **SPRINGER Vol. 323**, ISBN 978-3-319-11309-8 и частично в публикация 3 - Alexander Alexandrov " POWER OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR PERIMETER DEFENCE WIRELESS SEISMIC SENSORS" Institute of Defence, Proc. of the 7th International Scientific Conference HEMUS 2014.

3. SOA БАЗИРАНА СОФТУЕРНА ПЛАТФОРМА ЗА ИНТЕГРИРАНЕ НА ДАННИ ОТ СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ

3.1 РАЗРАБОТКА НА СОФТУЕРНА АРХИТЕКТУРА НА SOA БАЗИРАНА СОФТУЕРНА ПЛАТФОРМА ЗА ИНТЕГРИРАНЕ НА ДАННИ ОТ СЕНЗОРНИ СИСТЕМИ.

В този раздел се разглежда архитектурата на нов тип софтуерна платформа за интегриране на данни от интелигентни безжични сензорни системи.

Съдържанието на раздела е отразено в публикация No.1 Alexandrov, A., V. Monov, Implementation of a service oriented architecture in smart sensor systems integration platform, Proc. of the Third International Conference on Telecommunications and Remote Sensing – ICTRS'14, 26-27 june 2014, Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg, DOI 10.5220/0005422101140120, ISBN 978-989-758-033-8, pp. 114-118, 2014.

Комбинирането на данни от различни сензорни системи дава възможност да се коригира девиацията и флуктуациите на измерените данни.

Това е важен процес в много приложения, например в управлението на енергийни ресурси [15], [41]. Основното предизвикателство при интегрирането на сензорни данни е ефективно разделяне на сигнала от сензора от флуктуациите и шума придружаващи измерването. В съвременните сензорни мрежи и системи интегрирането на данните играе значителна роля в процеса на обработката на данните от тях. Процесът на интегриране на данни може да включва съчетаване на сензорни данни от различни източници с цел увеличаване на надеждността и точността на получената информация[128][139].

Основната цел на направената разработка е ефективно интегриране на данни от хетерогенни сензорни мрежи и системи. Този въпрос вече е разглеждан в литературата, например Samaras и др. [120] и Delicato и др. [29]). Поради една или друга причина тези решения са насочени към реализация на ориентиран към услугите мидълуер (middleware), работещ директно със сензорните възли на мрежата чрез директна инсталация на ориентирани към услуги протоколни стекове като например DPWS [97][51].

Основният недостатък на този подход е необходимостта от внедряване на сложен web базиран механизъм по генериране и валидиране на XML съобщения в относително маломощни по отношение на процесорна мощ и памет устройства, като сензорни

модули, които са и с ограничен енергиен ресурс. За да се преодолеят тези ограничения, авторите предлагат да се използват предварително дефинирани XML съобщения, което е за сметка на загубата на гъвкавост и адаптивност на предлаганата от тях софтуерна платформа. Друг основен проблем при използването на web услуги в такъв род устройства е наличие на латентност и съществена енергоемкост на решението. Priyantha и др. [102].

За разлика от горните изследвания предлаганият подход се фокусира в изграждане на мощна платформа, към която са свързани различни по вид и характер хетерогенни сензорни мрежи и системи от мрежи.

Такова решение не е ново. Съществува подобно решение разработено от Gil Martinez Abarca и др. [40], което позволява отдалечено управление на фърмуера на мрежови възли през Интернет от Kansal и др. [41] за peer to peer инфраструктура за обмен на сензорни данни през Интернет. Трябва да се отбележи че тези решения са подчертано универсални и поради тази причина не решават типични проблеми на безжичните сензорни мрежи, като управление на енергийни ресурси и QoS (Quality of Service) решения при обработката на сензорните данни.

Съществува решение предложено от Moeller и Sleman [89], за интегриране на безжични сензорни мрежи в други съществуващи IP базирани мрежи. Тяхната работа е насочена специално към решения на т.н. "умен" дом и в тяхното решение е разработена абстракция само на ниво единичен сензор, т.е. приложенията за да могат да комуникират с тези сензори трябва да разполагат с предварително въведена в софтуера техническа конфигурация за мрежата и адресите на сензорите,

Предлаганият подход е на ниво абстракция на сензорни мрежи и системи от мрежи. Това позволява приложенията обслужващи заявки да не се интересуват от конкретната имплементация на дадена мрежа или от протоколите по които комуникират сензорните модули помежду си. Този подход напълно се различава от системи тип TinyDB [86], които са проектирани за извличане на данни от сензорни мрежи, но на практика не предоставят услуги свързани с интегриране на извлечените данни и/или анализ на качеството(QoS) на получените данни. Този тип системи използват техники на събиране на данни на ниско ниво (low level techniques) и по-скоро могат да се разглеждат като функционално разширение на конкретна сензорна мрежа [120]. Поради тази причина такъв род решения са полезни като интерфейс на конкретна сензорна мрежа за обмен на данни. Предлаганата в дисертационния труд платформа за интегриране и управление на данни, която е независима от дизайна (топология,

стандарти за комуникация и др.) на сензорните мрежи свързани с нея, до голяма степен е освободена от описаните по-горе недостатъци.

Описание на архитектура на SOA-базирана софтуерна платформа за интегриране на данни от интелигентни сензорни системи.

Предлаганата софтуерна платформа за интегриране на данни от сензорни системи е базирана на SOA (Service Oriented Architecture) [124][125] и използва Apache технологии и езикът на високо ниво WSDL (Web Service Definition Language). Блоковете с услуги реализирани в софтуерната платформа са достъпни чрез използване на стандартни интернет протоколи и по специално SOAP (Simple Object Access Protocol). Част от тези услуги са новоразработени приложения, а други са реализирани само като обвивка на вече съществуващи интерфейси и протоколи за комуникация със сензорни мрежи. Всеки блок с услуги в SOA платформата може да изпълнява една или повече роли в процеса на интегриране на сензорни данни като:

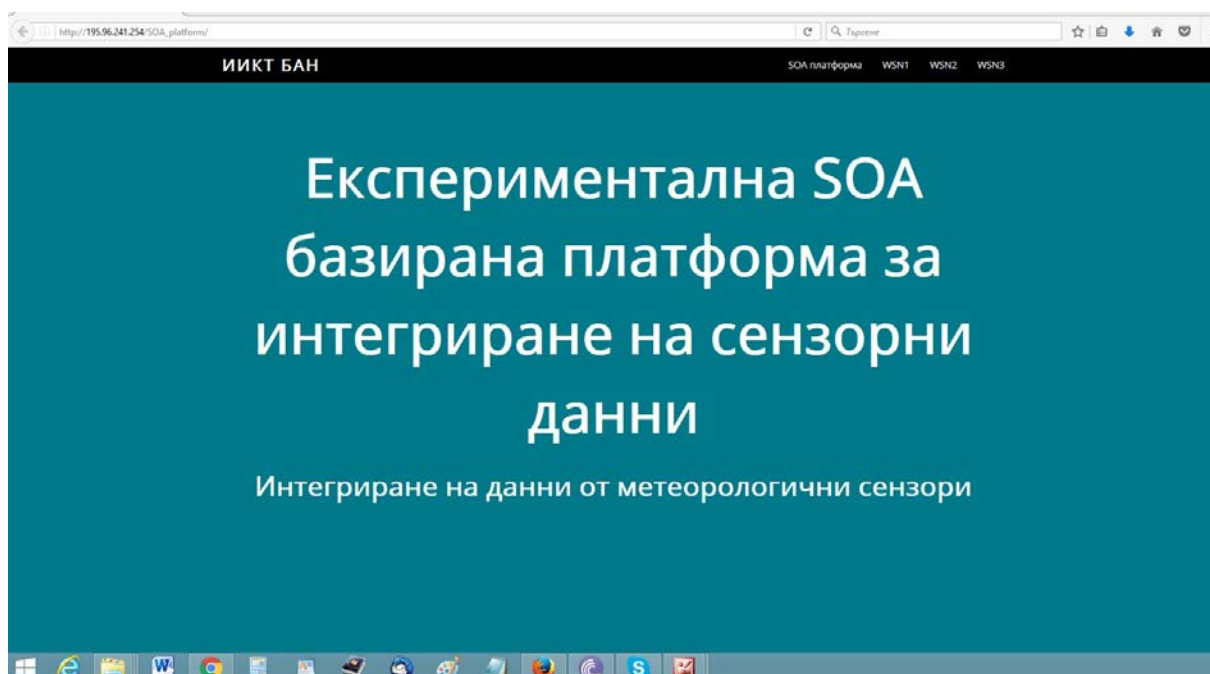
Доставчик на услуга

Доставчикът на услуги е софтуерно приложение, проектирано като back end web интерфейс и осигурява достъп до информация, записана в регистъра на услугата. В зависимост от заявките за информация и/или данни, доставчикът на услуги изпраща искания за информация или необработени данни към съответните центрове за обработка и съхранение на данни. Исканията за информация към доставчика на услуги се формират чрез специално разработена спецификация на XML наречена UDDI (Universal Description Discovery and Integration) в която се дефинират адреса на центъра за информация, типа и спецификацията на исканата информация).

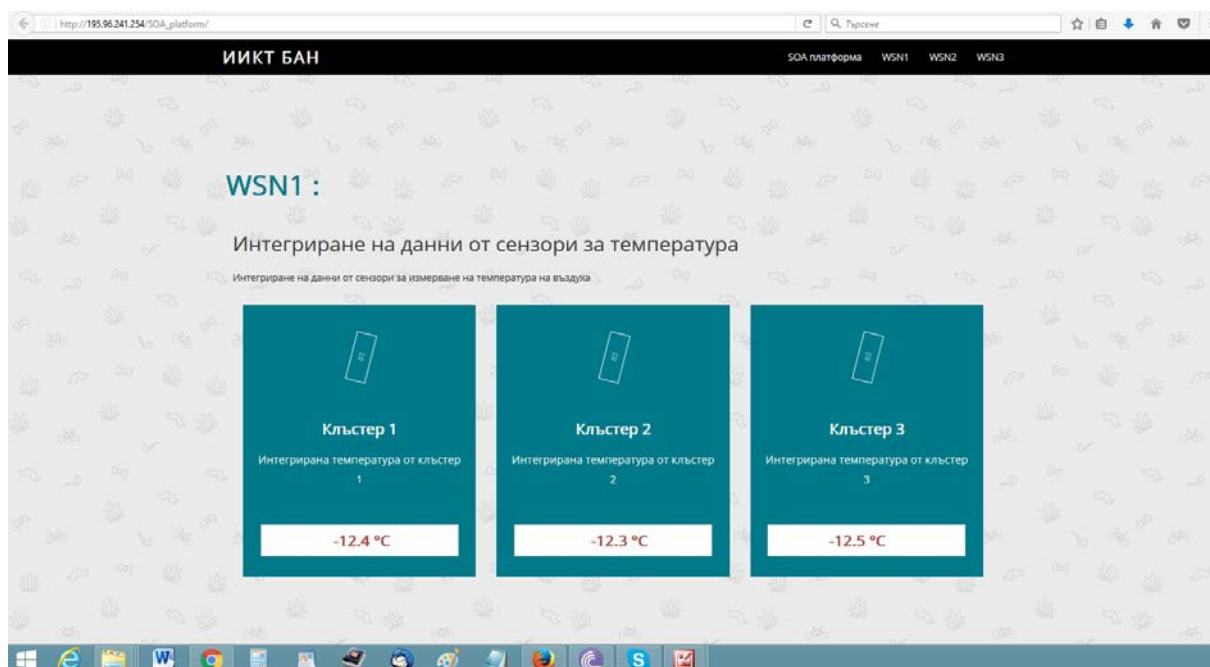
Потребител на услуга

Потребителят на услуга е софтуерно приложение проектирано като web client. Основната задача на това приложение е на база регистрирани типове данни да изпрати заявка за услуга към доставчика на услуги. Един потребител на услуги в зависимост от характеристиките на информацията може да изпрати заявка до един или няколко доставчика на услуги.

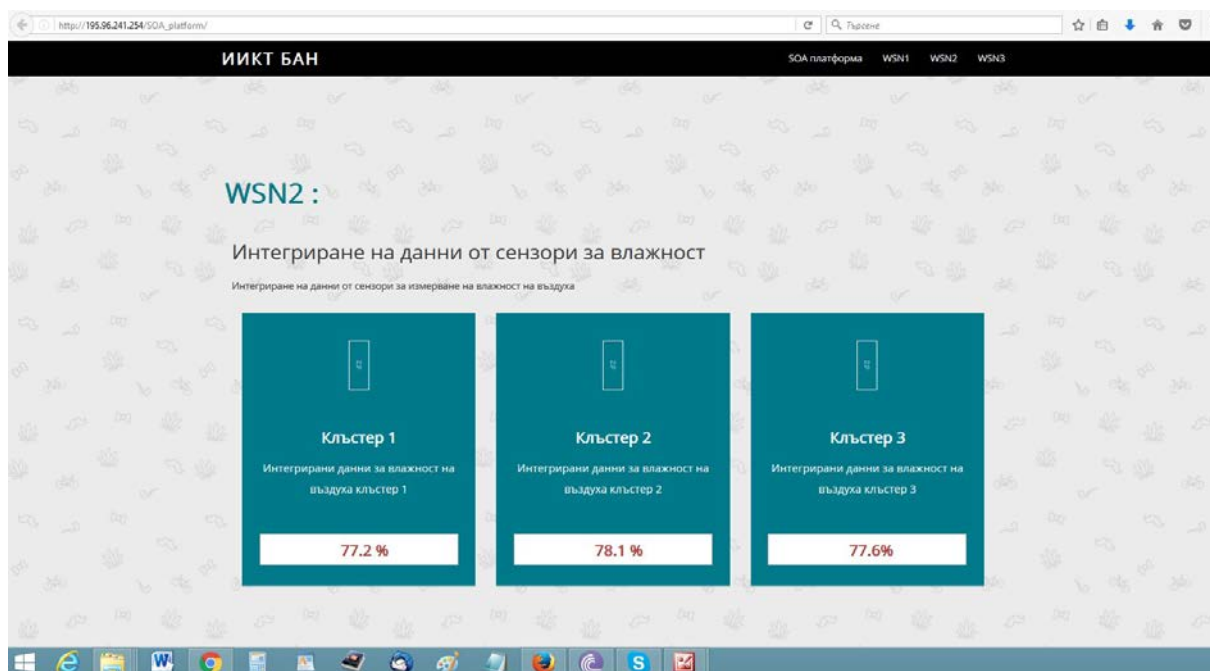
На снимки 5, 6, 7 и 8 са показани екрани на графичния интерфейс на „Потребителя на услуга“ web client с визуализирани резултати от заявки за интегрирани сензорни данни по клъстери за температура, влажност на въздуха и барометрично налягане.



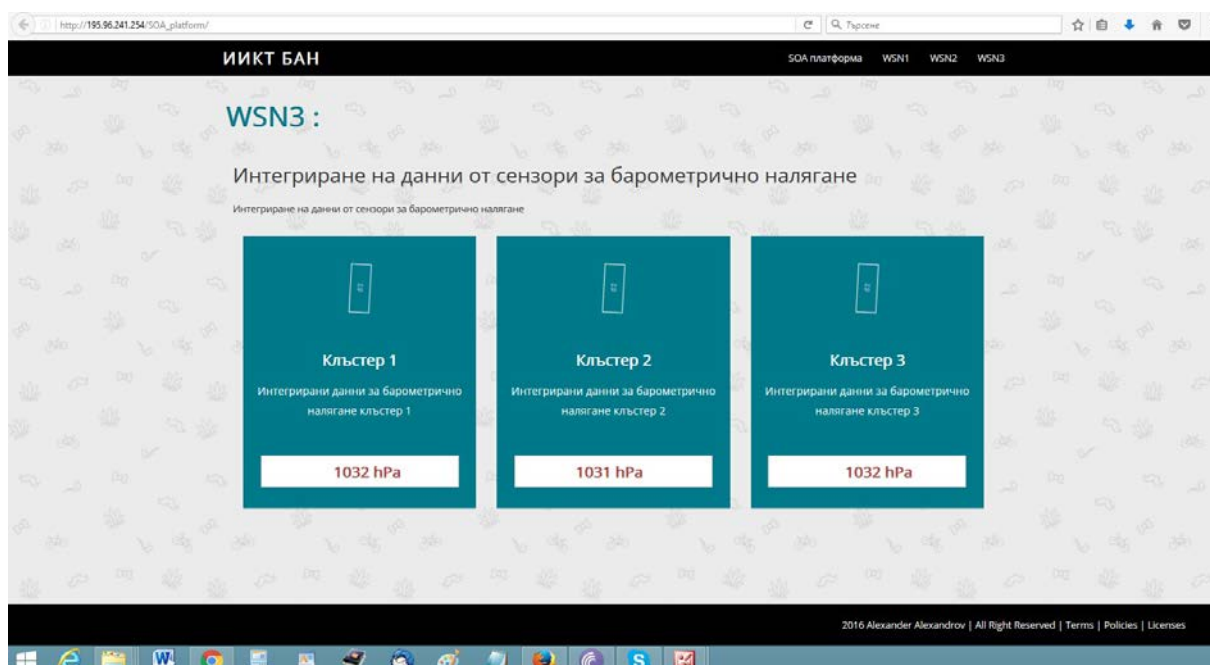
Сн.5 Екран на заглавната страница на експерименталната SOA платформа



Сн.6 Визуализирани резултати от заявки за интегрирани сензорни данни по клъстери за температура.



Сн.7 Визуализирани резултати от заявки за интегрирани сензорни данни по клъстери за влажност.



Сн.8 Визуализирани резултати от заявки за интегрирани сензорни данни по клъстери за барометрично налягане.

В предлаганата платформа за интегриране на сензорни данни, всички блокове с услуги са изградени на база протокол SOAP и и технологията RPC (Remote Procedure Call). Тези стандарти публикувани и като Recommendation ver. 1.2 на W3C (World Wide Web Consortium) през 2003г. [15] осигуряват добра междуплатформена съвместимост.

Протокол SOAP (Simple Object Access Protocol)

Протокол SOAP използван в блок „Потребител на услуга“ е протокол за обмен на структурирана информация в изпълнение на уеб услуги в областта на компютърните мрежи. Протоколът обменя съобщения в XML формат и е базиран на протоколи от приложно ниво, най-вече на HTTP(Hypertext Transfer Protocol) и SMTP(Simple Mail Transfer Protocol).

RPC (Remote Procedure Call)

Процедура RPC използвана в блок „Доставчик на услуга“ е стандартизирана процедура позволяваща на една компютърна програма да се обърне към друга подпрограма или процедура, намираща се в друго адресно пространство, (например на друг компютър в споделена мрежа) без програмистът изрично да укаже параметри за това дистанционно взаимодействие. При OOP (Object Oriented Programing) RPC се нарича метод за дистанционно обръщение.

Основната цел на разработената SOA базирана софтуерна платформа е да се интегрират различни хетерогенни сензорни мрежи на базата на различен хардуер и използвани различни комуникационни технологии в една интегрирана интелигентна сензорна система (ISSS).

Тази концепция ни позволява пълно интегриране на данните от сензорите и възможността за обмен на данни между сензорните мрежи, включени в платформата както и между интелигентни сензорни модули от различни мрежи.

Вграденият в софтуерната платформа 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) интерфейс позволява директна адресация до всеки сензорен модул, поддържащ този стандарт (специфициран в RFC6282) и пряк обмен на данни между софтуерната платформа и сензорния модул.

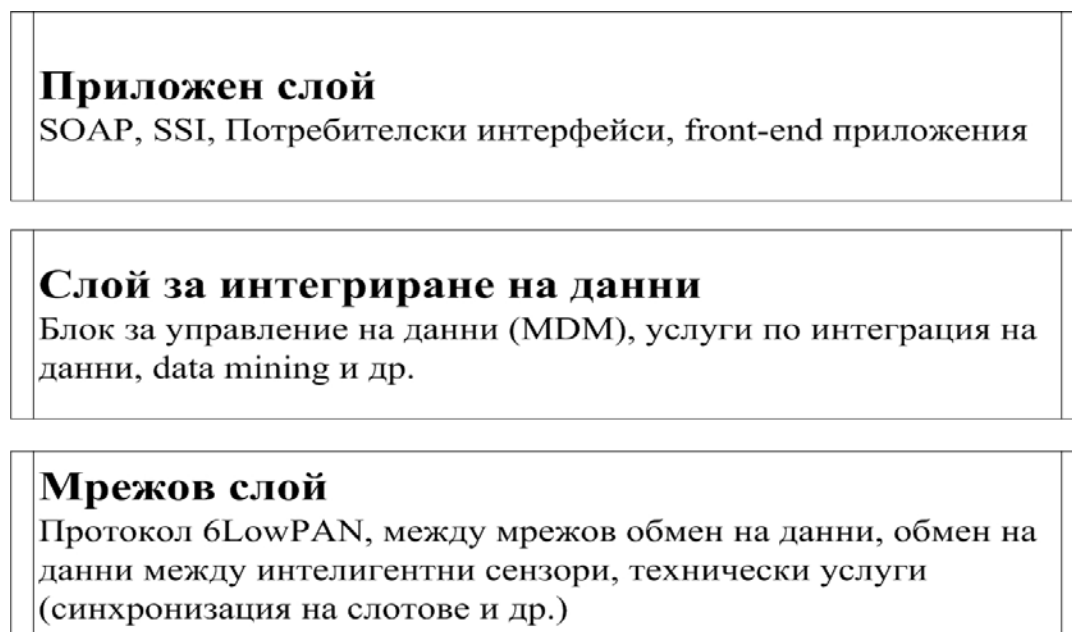
Въз основа на тази технология, разработената платформа осигурява възможност за изграждане на виртуални сензорни мрежи и системи. (VSS-Virtual Sensor System).

В технологично отношение дизайнът на софтуерната разработка е базиран на фреймуърка (framework) WSO2 Carbon SOA. Фреймуъркът на WSO2 включва вграден регистър, SOA базиран блок за управление на потребителите, вградени софтуерни услуги за сигурност, групиране и кеширане на данните, както и вътрешен фреймуърк за потребителски интерфейс (GUI - Graphical User Interface).

В настоящата версия на предлаганата софтуерна платформа, са дефинирани 3 слоя:

1. Приложен слой
2. Слой за интегриране на данни
3. Мрежов слой

Блоковата схема на фиг.61 илюстрира разпределението на задачите между така дефинираните слоеве



Фиг. 61 SOA архитектура на дефинираните слоеве в софтуерната платформа

Приложен слой.

Приложният слой на разработваната платформа се основава главно на SOAP с XML формат на данните. Допълнително в приложния слой са интегрирани RPC базирани протоколи за комуникация и SSI(Simple Sensor Interface). Протоколът на SSI ("Simple Sensor Interface") е комуникационен протокол, проектиран за пренос на данни между компютри или потребителски терминали и интелигентни сензори.

Слой за интегриране на данни

Слоят за интегриране на данни в зависимост от нивото на интегриране на получените от сензорните мрежи данни използва различни методи и алгоритми за интегриране.

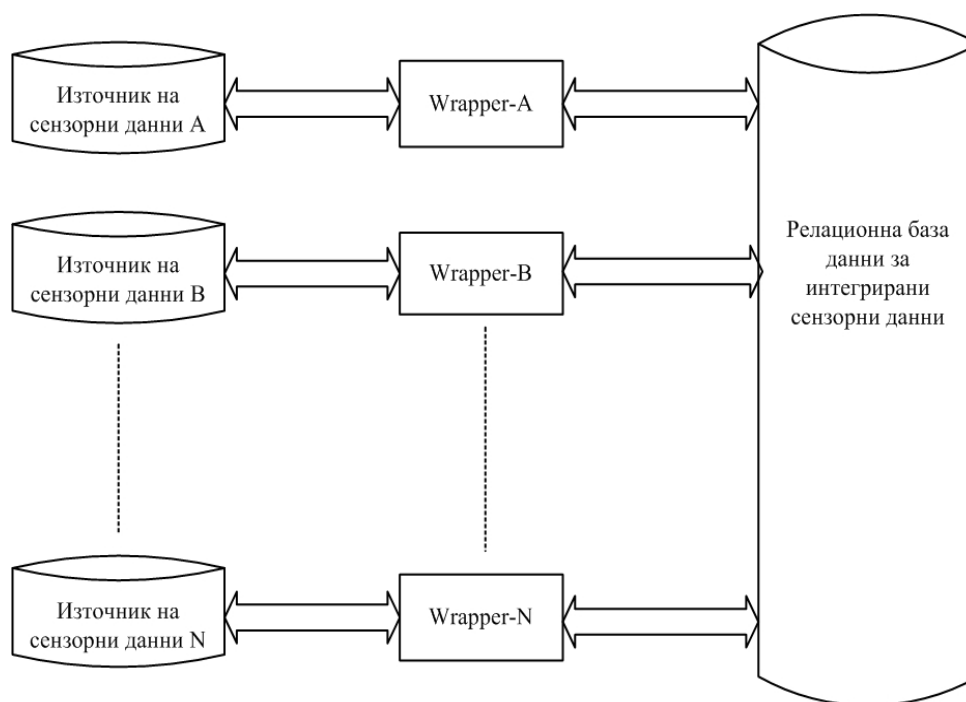
Основната функционалност на слоя за интегриране на данни е блокът за управление на данните.

Блокът за управление на данни (MDM - Master Data Management) се състои от набор софтуерни модули, които осигуряват методи и алгоритми за интегриране на данни с последващ анализ, класифициране и логическа обработка на вече интегрираните данни.

Основният метод използван за интегриране на данни в MDM е метода и софтуерния алгоритъм на филтъра на Калман описан в раздел 3.1 на настоящия дисертационен труд.

Блокът MDM разполага с вътрешна база данни, структурирана по параметризирани източници от данни.

Блок-схемата на MDM е показана на фиг. 62.



Фиг. 62 Блок-схема на блока за управление на данни MDM

Мрежов слой.

Основната задача на мрежовия слой е да се осигури функционални и процедурни средства за прехвърляне на групи от данни с променлива дължина от сензорни мрежи и/или интелигентни сензорни модули до слоя за интегриране на данни.

Софтуерната имплементация на мрежовия слой е проектирана да поддържа следните групи от протоколи:

- **Протокол IPv6 / 6LoWPAN.** 6LoWPAN е акроним на IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks. Концепцията за 6LoWPAN произлиза от идеята, че "интернет протокол може и трябва да се прилага дори за най-малките устройства," [39] и че устройства с ограничени изчислителни възможности за обработка трябва да бъдат в състояние да участват в Интернет на нещата (IoT - Internet of Things) [122] [123]. Спецификацията на база разработен от група 6LoWPAN IETF е RFC 6282.

- **Протокол ICMPv6 (Internet Control Message Protocol version 6)** Протоколът ICMPv6 е имплементация на протокола за управление на интернет съобщения (ICMP) за Интернет протокол версия 6 (IPv6), дефинирани в RFC 4443 [123].

ICMPv6 е неразделна част от IPv6 и извършва отчитането на грешки и диагностични функции (например ping) и има фреймуърк за разширяване на функционалността му при бъдещи промени на RFC 4443.

Към този протокол са имплементирани няколко разширения касаещи комуникацията със сензорни модули и сензорни мрежи:

NDP (Neighbour Discovery Protocol) е протокол предназначен за откриване на мрежови възли и представлява разширение на функциите на ARP (Address Resolution Protocol)

Протокол SEND (Secure Neighbour Discovery) - представлява разширение на NDP и се използва при комуникация в мрежи с криптирана комуникация между възлите.

Протокол MRD (Multicast Router Discovery) - специално проектиран за откриване на multicast рутери, използвани за синхронизация на възлите на сензорните мрежи или при конфигуриране на AD HOC мрежи.

- **ZigBee 3.0 група от протоколи** - по специално ZigBee IP, ZigBee Green Power 1.0 и ZigBee Gateway 1.0

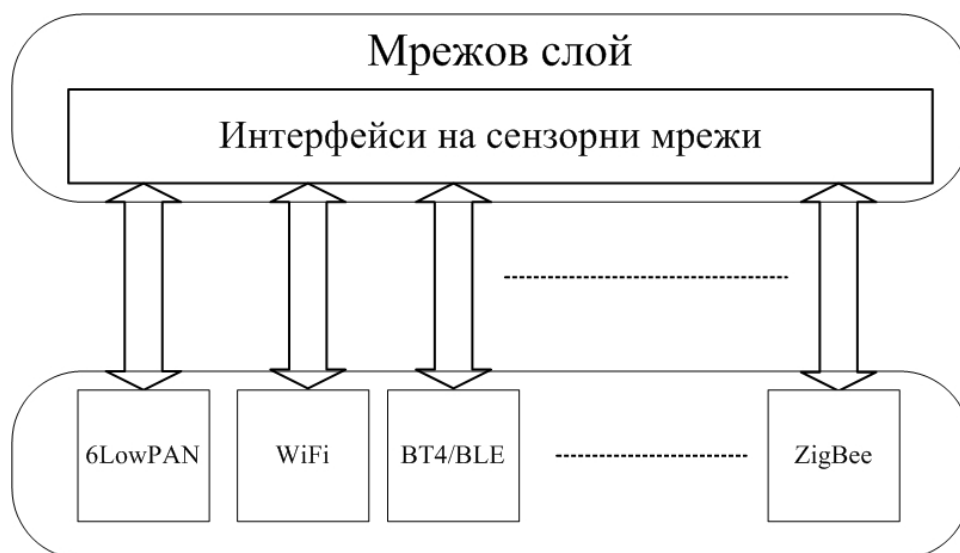
В процес на бъдещо развитие на софтуерната платформа, което е извън обхвата на настоящия дисертационен труд е внедряването на WiFi и Bluetooth BT4/BLE интерфейси за комуникация с WiFi и Bluetooth базирани сензорни мрежи.

Основните компоненти на платформата са:

- сървър на приложения, използващ собствен дизайн на модифициран WCO2 Carbon фреймуърк;
- база данни сървър с MySQL RDBMS;
- шлюзови сървъри свързани с интерфейси за достъп до хетерогенни сензорни мрежи или интелигентни сензорни модули;
- софтуерни интерфейси, поддържащи 802.15.4 ZigBee 3.0 протоколи, 6LoWPan, WiFi 802.11/bgn и BT4 / BLE протоколи за обмен на данни;

Структурата на платформата е отворена и може лесно да бъде обновена с различна функционалност в зависимост от специфичните изисквания.

На фиг. 63 е показана функционална блок схема на мрежовия слой на SOA базираната софтуерна платформа за интегриране на сензорни данни.



Фиг.63 Функционална блок схема на мрежовия слой на SOA базирана платформа

На съществуващият етап от разработка е осъществена тестова комуникация и интегриране на данни с реални безжични сензорни мрежи базирани на протоколи 6LowPAN и IEEE802.15.4 ZigBee.

Разработката на комуникационни интерфейси работещи с WiFi и BT4/BLE базирани сензорни модули и мрежи е предмет на бъдещи разработки и е извън обхвата на настоящия дисертационен труд.

За целите на експерименталните изследвания, разработената SOA базирана софтуерна платформа за интегриране на сензорни данни е инсталирана на специализиран хардуер, намиращ се в блок 2 на ИИКТ-БАН.

На снимки 9 и 10 е показана експерименталната хардуерна система на която е инсталирана SOA базираната софтуерна платформа състояща се от два двуканални широколентови радио трансивърни блока на фирмата Kongsberg Норвегия, GPS приемници, радио модеми, application server, сървър за база данни и web сървър за „Потребителя на услуги“ описан в раздел 3.1



Сн.9 и 10 Експериментална WSO2 Carbon SOA базирана платформа за интегриране на сензорни данни

3.2 Изводи

Раздел 3.1 на настоящия дисертационен труд описва архитектура на SOA-базирана софтуерна платформа, разработена за интегриране на данни от интелигентни сензорни мрежи и системи. Предвидени са софтуерни услуги за управление на различни хетерогенни сензорни мрежи или група от интелигентни сензорни модули в сензорна система, която осигурява необходимата оперативна съвместимост.

Предимство на разработените услуги е че дават възможност за лесно интегриране на хетерогенни сензорни мрежи.

Платформата е хардуерно независима и разработчиците на базата на предлаганите услуги могат лесно да получат достъп до данните от всеки интелигентен сензорен модул или сензорна мрежа, без да имат нужда от информация относно вида и топологията на сензорната мрежа или вида на използваните вътрешно мрежови комуникационни протоколи.

Процесът на интегриране на данни е прозрачен и географски независим. Чрез предлаганата отворена архитектура на SOA базирана софтуерна платформа се дава възможност за изграждане на услуги по виртуализация и формиране на виртуални сензорни мрежи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключителните раздели на предходните глави на дисертационния труд бяха описани и анализирани главните резултати, получени в резултат от изследванията, представени в съответните глави. В качеството на обобщаващо заключение, от тези резултати следва извода, че поставената цел и задачи на дисертацията са изцяло постигнати.

В останалата част на този раздел са представени списък на публикациите по дисертацията, забелязани цитирания на трудове по дисертацията, апробация на резултатите и основни научни и научно-приложни приноси.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Alexandrov, A., V. Monov, Implementation of a service oriented architecture in smart sensor systems integration platform, Proc. of the Third International Conference on Telecommunications and Remote Sensing – ICTRS'14, 26-27 June 2014, Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg, DOI 10.5220/0005422101140120, ISBN 978-989-758-033-8, pp. 114-118, 2014.
2. Alexandrov, A., V. Monov, ZigBee smart sensor system with distributed data processing, Proc. of the 7-th IEEE Conference Intelligent Systems, Warsaw Poland, Vol. 2, pp. 259-268, September 24-28, 2014., In: Advances in Intelligent Systems and Computing, **SPRINGER** Vol. 323, ISBN 978-3-319-11309-8, DOI: 10.1007/978-3-319-11310-4_23.
3. Alexander Alexandrov " Power optimization algorithms for perimeter defense wireless seismic sensors" Institute of Defence, Proc. of the 7th International Scientific Conference HEMUS 2014 May 29-30, Plovdiv.
4. Alexander Alexandrov, "Comparative analysis of IEEE 802.15.4 based communication protocols used in wireless intelligent sensor systems" Proc. of the International conference RAM 2014 November 5-7 Sofia, ISSN 1314-4634, p.51-54
5. Alexander Alexandrov. "AD HOC Kalman filter based fusion algorithm for real-time Wireless Sensor Data Integration", Proc. of the Eleventh International Conference Flexible Querying Answering Systems 2015 October 26-28 2015, Warsaw, Poland **SPRINGER** Vol.400, ISBN 978-3-319-26153-9, DOI: 10.100/978-3-319-26154-6, pp.151-160

6. Заявка за патент за изобретение „Метод и устройство за интегриране на данни от метеорологични сензори“, с No. 112400/17.10.2016 и автори А. Александров, В. Монов
ПАТЕНТНО ВЕДОМСТВО НА РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ

ЗАБЕЛЯЗАНИ ЦИТИРАНИЯ НА ТРУДОВЕ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Публикация No. 1 от списъка с публикации по темата на дисертацията

Alexandrov, A., V. Monov, Implementation of a service oriented architecture in smart sensor systems integration platform, Proc. of the Third International Conference on Telecommunications and Remote Sensing – ICTRS'14, 26-27 June 2014, Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg, DOI 10.5220/0005422101140120, ISBN 978-989-758-033-8, pp. 114-118, 2014.

е цитирана в:

Atanasova, T. “Smart buildings, fog computing”, IoT, Proc. of the Int. Conference „Telecommunications, Informatics, Energy and Management TIEM'15“, Bitola, Republic of Macedonia, University of Telecommunication and posts, Vol. II, 2015 pp. 110-114, ISSN 2367-8437.

2. Публикация No. 2 от списъка с публикации по темата на дисертацията

Alexandrov, A., V. Monov, ZigBee smart sensor system with distributed data processing, Proc. of the 7-th IEEE Conference Intelligent Systems, Warsaw Poland, Vol. 2, pp. 259-268, September 24-28, 2014., In: Advances in Intelligent Systems and Computing, SPRINGER Vol. 323, ISBN 978-3-319-11309-8, DOI: 10.1007/978-3-319-11310-4_23.

е цитирана в:

Doukovska, L., S. Koynov. Possibilities for applications of the model-based predictive control in thermal power plants, Proceedings of the International Conference Robotics, Automation and Mechatronics RAM 2014, 5-7 November 2014, Sofia, Bulgaria, pp.5-11, ISSN 1314-4634.

АПРОБАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Резултати, включени в дисертацията са докладвани на:

- Third International Conference on Telecommunications and Remote Sensing – ICTRS'14, 26-27 June 2014, Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg
- 7-th IEEE Conference Intelligent Systems, Warsaw Poland, September 24-28, 2014
- Международна конференция “Автоматика и информатика”, 1-3 Октомври 2014, София
- International conference “Robotics, Automation and Mechatronics” RAM 2014, November 5-7 2014, Sofia
- Eleventh International Conference Flexible Querying Answering Systems 2015 October 26-28 2015, Warsaw, Poland

ОСНОВНИ НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработен е иновативен безжичен сензорен модул (хардуер и системен софтуер) за мониторинг и интелигентна обработка на метеорологични данни.

Ключово предимство на разработения сензорен модул е способността му да възстановява и оптимизира изразходваната по време на работа енергия чрез вграден соларен панел и специализирани хардуерни и софтуерни адаптивни алгоритми за управление. Модулът е в състояние самостоятелно да взема решения относно минимизиране на енергийните си разходи чрез промяна на параметрите си на комуникация въз основа на получени данни от сензори и анализ на комуникационния трафик.

Разработката е в процедура на патентоване – заявка за **патент No. 112400/17.10.2016**

2. Разработен е нов метод за йерархично-децентрализирано интегриране на сензорни данни с използване на разширен филтър на Калман (Extended Kalman filter). В отличие от публикувани в литературата методи за интегриране на сензорни данни, предлаганият метод реализира двунивов процес на интегриране, като на първо ниво се осъществява интегриране на сензорните данни чрез филтър на Калман, а на второ ниво се осъществява интегриране на данните в клъстерния координатор. Разработени са софтуерни алгоритми, реализиращи съответните процедури на двете нива на метода. Ключов принос в разработката е въведеният блок за анализ на локално интегрирани данни и интелигентен адаптивен алгоритъм, позволяващ на модула самостоятелно да вземе решение дали да изпрати вече обработените на първо ниво данни до клъстерния координатор или само да генерира код, че новите данни са идентични в рамките на инструменталната грешка с предходни вече изпратени сензорни данни. В редица случаи предлаганият метод и реализиращите го алгоритми позволяват съществено намаляване на трафика в мрежата и редуциране на консумацията на енергия за обработка на сензорни данни, чрез отказ от повторна обработка на сензорни данни, по същество идентични с предходни такива.

3. Разработен е метод и реализиращите го софтуерни алгоритми за формиране на ad hoc интелигентна безжична сензорна мрежа с клъстерна топология. Методът включва 3 основни фази – фаза на откриване, фаза на присвояване на роли и фаза на мониторинг за анализ на състоянието на формираната сензорна мрежа.

На база на т.н. WCA алгоритъм (Weighted Clustering Algorithm), описан в предходни публикации е разработен нов подобрен алгоритъм във фаза 1 на метода, отличаващ се с функционалност, водеща до формиране на клъстери с приоритет на качеството на свързаност между възлите, което редуцира съществено риска от разпадане на мрежата при отказ на някой от формираните клъстерни координатори. В отличие от класическия WCA алгоритъм е въведен нов параметър Ki_link отчитащ не разстоянието между два съседни възела а качеството на комуникацията между тях. Допълнителна особеност при новия алгоритъм е критерия за избор на СН - в отличие от WCA, тук за клъстерен координатор се избира възелът с най-голям коефициент на тежест с цел намаляване на броя на СН възлите и увеличаване на броя на членовете на клъстера. Тези нововъведения подобряват съществено работата на алгоритъма за изборна клъстерни координатори и формиране на клъстери при ad hoc безжични сензорни мрежи. Това позволява да се оптимизира съществено процеса на маршрутизация на пакети между клъстерните координатори и PAN координатора.

Предложеният метод е тестван успешно в реални условия чрез имплементация в група експериментални сензорни модули реализирани на база разработката описана в глава 1 на настоящия дисертационен труд.

4. Разработен е нов метод и алгоритъм за оптимизация на консумацията на енергия от сензорен модул по време на процеса на измерване и предаване на данни в сензорна мрежа. Съществена новост на разработените метод и алгоритъм е блокът за сравнителен анализ на интегрираните данни. Въз основа на решение на този блок, сензорният модул самостоятелно решава дали да изпрати вече измерените и интегрирани данни от сензорите или да изпрати код с който да информира клъстерния координатор или контролния център, че текущо измерените данни от сензорите са идентични в рамките на инструменталната грешка с предходни изпратени до него данни от тези сензори.

Ако данните не са идентични, те се изпращат до клъстерния координатор за второ ниво интегриране и/или конвергенция базирана на Central Limit Theorem и Fraser-Potter обработка.

5. Разработен е метод за оптимизация на енергийна консумация на сензорен модул по време на предаване на данни и/или маршрутизация на пакети с данни в мрежа.

Предлаганият нов метод променя динамично т.н. SI (Sleep Interval) в зависимост от текущото натоварване на мрежата, което води до съществена икономия на енергия и увеличаване на автономността на батерийно захранвани безжични устройства, включително безжични сензорни модули.

6. Разработена е архитектура на софтуерна платформа използваща SOA (Service Oriented Architecture) за интегриране на данни от интелигентни сензорни мрежи и системи. В платформата са предвидени софтуерни услуги за управление на различни хетерогенни сензорни мрежи или групи от интелигентни сензорни модули в сензорна система, която осигурява необходимата оперативна съвместимост. Предимство на разработените услуги е че дават възможност за лесно интегриране на хетерогенни сензорни мрежи и осигуряване на лесен достъп до данните за разработчиците на приложения.

Платформата е хардуерно независима и разработчиците на приложения, на базата на предлаганите услуги могат лесно да получат достъп до данните от всеки интелигентен сензорен модул или сензорна мрежа, без да имат нужда информация относно вида и топологията на сензорната мрежа или вида на използваните комуникационни протоколи.

Процесът на интегриране на данни е прозрачен и географски независим. Чрез предлаганата отворена архитектура на SOA базирана софтуерна платформа се дава възможност за изграждане на услуги по виртуализация и формиране на виртуални сензорни мрежи.

От изброените постигнати резултати в дисертационния труд, резултати 2 и 5 имат принос с научен характер, а резултати с номера 1, 3, 4 и 6 имат принос с научно-приложен характер.

ДЕКЛАРАЦИЯ ЗА ОРИГИНАЛНОСТ

Декларация за оригиналност на резултатите

Декларирам, че настоящата дисертация съдържа оригинални резултати, получени при проведени от мен научни изследвания (с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител).

Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени, са надлежно и подробно цитирани в библиографията.

Настоящата дисертация не е прилагана за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис:.....

Александър Александров

БЛАГОДАРНОСТИ

Изказвам специални благодарности на научният ми ръководител доц. д-р Владимир Монов - Ръководител секция "Моделиране и оптимизация" към Института по Информационни и Комуникационни Технологии при Българската Академия на Науките

Реализацията на настоящият дисертационен труд би била невъзможна без неговите ценни съвети и съдействие.

БИБЛИОГРАФИЯ

- 1 A. Dahane, N. Berrached, and B. Kechar, "Energy Efficient and Safe Weighted Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks," *Procedia Computer Science*, vol. 34, pp. 63-70, 2014.
- 2 A. Duda, G. Harsanyi, Y. Haddad and G. Bernard, "Estimating Global Time in Distributed Systems," *Proceedings of the 7th International Conference on Distributed Computing Systems*, Berlin, Vol. 18, 1987.
- 3 A. Perrig, R. Szewczyk, J.D. Tygar, V. Wen, and D.E. Culler, "SPINS: security protocols for sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 8, no. 5, pp. 521-534, 2002.
- 4 A. Sheth, C. Hartung, and R. Han, "A decentralized fault diagnosis system for wireless sensor networks," in *Proceedings of IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference*, Washington, DC, 2005.
- 5 A. Zabian, A. Ibrahim, and F. Al-Kalani, "Dynamic head cluster election algorithm for clustered Ad-Hoc networks," *Journal of Computer Science*, vol. 4, no. 1, pp. 42-50, 2008.
- 6 A. Zabian, A. Ibrahim, and F. Al-Kalani, "Head clustering election algorithm for Ad-Hoc networks," *Journal of Computer Science*, vol. 5, no. 1, pp. 42-50, 2009.
- 7 A.A. Abbasi, and M. Younis, "A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 30, no. 14, pp. 2826-2841, 2007.
- 8 A.H. Hussein, A.O. Abu Salem, and S. Yousef, "A flexible weighted clustering algorithm based on battery power for Mobile Ad hoc Networks," in *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2008)*, Cambridge, UK, 2008, pp. 2102-2107.
- 9 Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramanian, Y., Cyirci, E.: A survey on sensor networks. *IEEE Commun. Mag.* 40(8), 102–114 (2002)
- 10 Amine Dahane, Abdelhamid Loukil, Bouabdellah Kechar "Energy Efficient and Safe Weighted Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks" 1877-0509 © 2014 Elsevier B.V

- 11 APR. da Silva, MH. Martins, BP. Rocha, AA. Loureiro, LB. Ruiz, and HC. Wong, "Decentralized intrusion detection in wireless sensor networks," in Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Quality of Service & Security in Wireless and Mobile Networks, Montreal, Canada, 2005, pp. 16-23.
- 12 Aschenbrenner, J.R.: Open systems interconnection. IBM Syst. J. 25(3/4), 369–379 (1986) Elahi, A., Gschwender, A.: ZigBee Wireless Sensor and Control Network. Prentice Hall, NJ (2009)
- 13 B. Poirier, R. Roy and M. Dagenais, "Accurate Offline Synchronization of Distributed Traces Using Kernel-Level Events," ACM SIGOPS Operating Systems Review, Vol. 44, No. 3, July 2010, pp. 75-87.
- 14 B. Sun, C. Gui, Y. Song, and C. Hu, "Stable clusterhead selection algorithm for ad hoc networks," International Journal of Future Generation Communication and Networking, vol. 6, no. 3, pp. 95-105, 2013.
- 15 Bacchanalian, H., Toggle, 2003. Migrating to a service oriented architecture, IBM Developer Works, pp. 117-121
- 16 Blasch, E. (2006) "Sensor, user, mission (SUM) resource management and their interaction with level 2/3 fusion" International Conference on Information Fusion. <http://defensesystems.com/articles/2009/09/02/c4isr1-sensor-fusion.aspx>
- 17 Blasch, E., Plano, S. (2003) "Level 5: User Refinement to aid the Fusion Process", Proceedings of the SPIE, Vol. 5099.
- 18 Blasch, E., Steinberg, A., Das, S., Llinas, J., Chong, C.-Y., Kessler, O., Waltz, E., White, F. (2013) "Revisiting the JDL model for information Exploitation," International Conference on Information Fusion.
- 19 C. Brown, H. Durrant-Whyte, J. Leonard, B. Rao, and B. Steer, "Distributed data fusion using Kalman filtering: a robotics application," in Data, Fusion in Robotics and Machine Intelligence, M. A. Abidi and R. C. Gonzalez, Eds., pp. 267–309, 1992.
- 20 C. E. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Adhoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing", <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>.
- 21 C. Hsin, and M. Liu, "Self-monitoring of wireless sensor networks," Computer Communications, vol. 29, no. 4, pp. 462-476, 2006.

- 22 C. Karlof, and D. Wagner, "Secure routing in wireless sensor networks: attacks and countermeasures," *Ad Hoc Networks*, vol. 1, no. 2, pp. 293-315, 2003.
- 23 C. Li, Y. Wang, F. Huang, and D. Yang, "A novel enhanced weighted clustering algorithm for mobile networks," in *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom'09)*, Beijing, China, 2009, pp. 1-4.
- 24 Castalia official site [Online];
Available: <https://castalia.forge.nicta.com.au/index.php/en/index.html>.
- 25 CE. Perkins, and P. Bhagwat, "Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 24, no. 4, pp. 234-244, 1994.
- 26 D. L. Hall and J. Llinas, "An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 1, pp. 6–23, 1997. An Introduction to the Kalman Filter, Greg Welch and Gary Bishop, Department of Computer Science University of North Carolina, UNC-Chapel Hill, TR 95-041, July 24, 2006
- 27 D. Martins, and H. Guyennet, "Security in wireless sensor networks: a survey of attacks and countermeasures," *International Journal of Space-Based and Situated Computing*, vol. 1, no. 2, pp. 151-162, 2011.
- 28 D. Mechta, S. Harous, M. Djoudi, and A. Douar, "A collaborative learning environment for a biology practical work," in *Proceedings of the 12th International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services (iiWAS2010)*, Paris, 2010, pp.389-394.
- 29 Delicato, F., Pires, P., Pinnez, L., Fernando, L., L. da Costa, L., 2003. A flexible web service based architecture for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 23rd International Conference on, Distributed Computing Systems Workshops*, pp. 730–735.
- 30 E. D. Pinedo-Frausto and J. A. Garcia-Macias, "An experimental analysis of Zigbee networks", in *IEEE Conf. on Local Computer Networks*, Oct. 2008, pp. 723–729.
- 31 E. Ekici, Y. Gu, and D. Bozdag, "Mobility-based communication in wireless sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 7, pp. 56-62, 2006.

- 32 E. P. Blasch and S. Plano, "JDL level 5 fusion model "user refinement" issues and applications in group tracking," in Proceedings of the Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XI, pp. 270–279, April 2002.
- 33 E. Toscano and L. Lo Bello, "Multichannel Super-frame Scheduling for IEEE 802.15.4 Industrial Wireless Sensor Networks", IEEE Trans. Ind. Informat. available on line http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?Arnumber=6009195
- 34 Eighth ACIS International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications, Montreal, 2010.
- 35 Einicke, G.A. (2012). Smoothing, Filtering and Prediction: Estimating the Past, Present and Future. Rijeka, Croatia: Intech. ISBN 978-953-307-752-9.
- 36 Elmenreich, W. (2002). Sensor Fusion in Time-Triggered Systems, (PDF). Vienna, Austria: Vienna University of Technology. p.173.
- 37 Elmenreich, W. (2001). Sensor Fusion in Time-Triggered Systems, PhD Thesis (PDF). Vienna, Austria: Vienna University of Technology. p. 273.
- 38 EN. Huh, and TH. Hai, in Lightweight Intrusion Detection for Wireless Sensor Networks, Rijeka, Croatia: INTECH Open Access Publisher, 2011.
- 39 G. Mulligan, "The 6LoWPAN architecture", in Proc. 4Th workshop on Embedded networked sensors, EmNets '07,2007, p. 78–82, USA. ACM.
- 40 Gil-Martinez-Abarca, J., Macia-Perez, J.F., Marcos- Jorquera, D., Gilart-Iglesias, V., 2006. Wake on lan over internet as web service, In Proceedings of the ETFA '06 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 1261 – 1268.
- 41 Grosky, W., Kansal, A., Nath, S., Liu, J., Zhao, F., 2007. Senseweb: An infrastructure for shared sensing. Multimedia, IEEE, 14(4), pp. 8 –13
- 42 Gross, Jason; Yu Gu; Matthew Rhudy; Srikanth Gururajan; Marcello Napolitano (July 2012). "Flight Test Evaluation of Sensor Fusion Algorithms for Attitude Estimation". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 48 (3): 2128–2139. doi:10.1109/TAES.2012.6237583.

- 43 Gutierrez, J.A., Callaway, E.H., Barrett, R.L.: Low-Rate Wireless Personal Area Networks, Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4. IEEE Press, New York (2004) Hossen, M.S.,
- 44 H. Chan and A. Perrig, "ACE: An Emergent Algorithm for Highly Uniform Cluster Formation," Wireless Sensor Networks, Vol. 2920, January 2004, pp. 154
- 45 H. Dai and R. Han, "TSync: A Lightweight Bidirectional Time Synchronization Service for Wireless Sensor Networks," ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review Archive, Vol. 8, No. 1, January 2004, pp. 125-139.
- 46 H. F. Durrant-Whyte and M. Stevens, "Data fusion in decentralized sensing networks," in Proceedings of the 4th International Conference on Information Fusion, pp. 302–307, Montreal, Canada, 2001.
- 47 H. Ghamgin, MS. Akhgar, and MT. Jafari, "Attacks in Wireless Sensor Network," Journal of Applied Sciences Research, vol. 7, no. 7, pp. 954-960, 2011.
- 48 H. Kim, "An efficient clustering scheme for data aggregation considering mobility in mobile wireless sensor networks," International Journal of Control and Automation, vol. 6, no. 1, pp. 221-234, 2013.
- 49 H. Kim, D. Kim and S. Yoo, "Cluster-Based Hierarchical Time Synchronization for Multi-Hop Wireless Sensor Networks," 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Vol. 2, April 2006, pp. 318-322.
- 50 Haghighat, M. B. A., Aghagolzadeh, A., & Seyedarabi, H. (2011). Multi-focus image fusion for visual sensor networks in DCT domain. Computers & Electrical Engineering, 37(5), 789-797.
- 51 I. Samaras, G. Hassapis, and J. Gialelis, "A modified DPWS protocol stack for 6LoWPAN-based wireless sensor networks," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 1, pp. 209–217, Feb. 2013.
- 52 I. Khalil, S. Bagchi, and NB. Shroff, "LITEWORP: a lightweight countermeasure for the wormhole attack in multihop wireless networks," in Proceedings of International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN2005), Yokohama, Japan, 2005, pp. 612-621.
- 53 I. Khalil, S. Bagchi, and NF. Shroff, "MOBIWORP: mitigation of the wormhole attack in mobile multihop wireless networks," Ad Hoc Networks, vol. 6, no. 3, pp. 344-362, 2008.

- 54 II. Er, and WKG. Seah, "Mobility-based d-hop clustering algorithm for mobile ad hoc networks," in Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Atlanta, GA, 2004, pp. 2359-2364.
- 55 J. Elson, L. Girod and D. Estrin, "Fine-Grained Network Time Synchronization, Using Reference Broadcasts," Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Vol. 36, No. SI, Winter 2002, pp. 147-163.
- 56 J. L. Crowley and Y. Demazeau Principles and Techniques for Sensor Data Fusion Signal Processing, Volume 32, Issues 1–2, May 1993, Pages 5–27
- 57 J. Llinas, C. Bowman, G. Rogova, A. Steinberg, E. Waltz, and F. White, "Revisiting the JDL data fusion model II," Technical Report", DTIC Document, 2004.
- 58 J. Llinas; C. Bowman; G. Rogova; A. Steinberg; E. Waltz; F. White (2004). Revisiting the JDL data fusion model II. International Conference on Information Fusion. CiteSeerX: 10.1.1.58.2996.
- 59 J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile low power media access for wireless sensor networks", in Proc. 2nd intl conf. on embedded networked sensor systems, SenSys'04, 2004, p. 95–107, USA. ACM.
- 60 J. V. Greunen and J. Rabaey, "Lightweight Time Synchronization for Sensor Networks," Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications, 2003, pp. 11-19.
- 61 J. W. Hui and D. E. Culler, "IPv6 in Low-Power Wireless Networks", Proceedings of the IEEE, vol. 98, no. 11, pp.1865–1878, Nov. 2010.
- 62 John G. Webster, Halit Eren" Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition" ISBN 9781439848838 January 29, 2014 by CRC Press
- 63 Jon S. Wilson " Sensor Technology Handbook" ISBN: 978-0-7506-7729-5, June 2015, pages 1-6
- 64 Joshi, V., Rajamani, N., Takayuki, K., Prathapaneni, N., Subramaniam, L. V., (2013). Information Fusion Based Learning for Frugal Traffic State Sensing. Proceedings of the Twenty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence.

- 65 JY. Yu, and PHJ. Chong, "A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 7, no. 1, pp. 32-48, 2005.
- 66 K. Benahmed, H. Haffaf, and M. Merabti, "Monitoring of wireless sensor networks," in Sustainable Wireless Sensor Networks, In W. Seah, YK. Tan (eds.), Rijeka, Croatia: InTech, 2010.
- 67 K. Benahmed, M. Merabti, and H. Haffaf, "Distributed monitoring for misbehaviour detection in wireless sensor networks," Security and Communication Networks, vol. 6, no. 4, pp. 388-400, 2013.
- 68 K. Kolchakov, V. Monov, "An algorithm for non – conflict schedule with diagonal activation of joint sub matrices", Proc. of 17-th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks (DCCN-2013), Moscow, October 07-10, 2013, pp. 180-187. Springer Handbook of Robotics Editors: Siciliano, Bruno, Khatib, Oussama (Eds.) ISBN 978-3-540-23957-4
- 69 K. Römer, "Time Synchronization and Localization in Sensor Networks," Ph.D. Thesis, No. 16106, ETH Zurich, Switzerland, June 2005.
- 70 K. Wong, T. Wolf, S. Gorinsky, and J. Turner, "Teaching experiences with a virtual network laboratory," ACM SIGCSE Bulletin, vol. 39, no. 1, pp. 481-485, 2007.
- 71 KA. Darabkh, SS. Ismail, M. Al-Shurman, IF. Jafar, E. Alkhader, and MF. Al-Mistarihi, "Performance evaluation of selective and adaptive heads clustering algorithms over wireless sensor networks," Journal of Network and Computer Applications, vol. 35, no. 6, pp. 2068-2080, 2012.
- 72 Kabir, A.F.M.S., Khan, R.H., Azfar, A.: Interconnection between 802.15.4 devices and IPv6: impleications and existing approachs. Int. J. Comput. Sci. 7(1), 19–31 (2010)
- 73 Kushalnagar, N., Montenegro, G., Schumacher, C.: IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPANs): Overview, assumptions, problem statement, and goals. RFC4919, Internet Engineering Task Force (2007)
- 74 L. Chen, M. J. Wainwright, M. Cetin, and A. S. Willsky, "Data association based on optimization in graphical models with application to sensor networks," Mathematical and Computer Modelling", vol. 43, no. 9-10, pp. 1114–1113, 2006

- 75 L. M. Sichitiu and C. Veerarittiphan, "Simple, Accurate Time Synchronization for Wireless Sensor Networks," IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'03), Vol. 2, March 2003, pp. 1266-1273.
- 76 Lewis, F.L.: Smart environments: Technology, protocol and applications. In: Cook, D.J., Das, S.K. (eds.) Wireless Sensor Networks, 1st edn, pp. 13–46. Wiley, New York (2004)
- 77 M. Chatterjee, SK. Das, and D. Turgut, "A weight based distributed clustering algorithm for mobile ad hoc networks," in Proceedings of the 7th International Conference on High Performance Computing (HiPC2000), Bangalore, India, 2000; pp. 511-521.
- 78 M. Chatterjee, SK. Das, and D. Turgut, "WCA: a weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks," Cluster Computing, vol. 5, no. 2, pp. 193-204, 2002.
- 79 M. Chatterjee, SK. Das, and D. Turgut, "WCA: a weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks," Cluster Computing, vol. 5, no. 2, pp. 193-204, 2002.
- 80 M. Chawla, J. Singhai, and JL. Rana, "Clustering in mobile ad hoc networks: a review," International Journal of Computer Science and Information Security, vol. 8, no. 2, pp. 293-301, 2010.
- 81 M. Jabbarifar, A. S. Sendi, H. Pedram, M. Dehghan and M. Dagenais, "L-SYNC: Larger Degree Clustering Based Time-Synchronisation for Wireless Sensor Network,"
- 82 M. Lehsaini, H. Guyennet, and M. Feham, "An efficient cluster-based self-organisation algorithm for wireless sensor networks," International Journal of Sensor Networks, vol. 7, no. 1, pp. 85-94, 2010.
- 83 M. Lehsaini, H. Guyennet, and M. Feham, "An efficient cluster-based self-organisation algorithm for wireless sensor networks," International Journal of Sensor Networks, vol. 7, no. 1, pp. 85-94, 2010.
- 84 M. Maroti, B. Kusy, G. Simon and A. Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol," Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys, November 2004.
- 85 M. Sha, G. Hackmann, and C. Lu, "Energy-Efficient Low Power Listening for Wireless Sensor Networks in Noisy Environments", Technical Report 2011-61, 2011.

- 86 Madden, S.R., Franklin, M.J., Hellerstein, J.M., Hong, W., 2011. TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks. *ACM Trans. Database Syst.*, 30(1), pp. 122–173.
- 87 Maybeck, S. (1982). *Stochastic Models, Estimating, and Control*. River Edge, NJ: Academic Press.
- 88 Md. Mamun-Or-Rashid, C. S. Hong and C. Hyung, “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)*, July 2005, pp. 340-345.
- 89 Moeller, R., Sleman, A., 2008. Wireless networking services for implementation of ambient intelligence at home. In *Proceedings of the 7-th International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems, ICCDCS*, pp. 1 –5.
- 90 MS. Islam, and SA. Rahman, "Anomaly intrusion detection system in wireless sensor networks: security threats and existing approaches," *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 36, no. 1, pp. 1-8, 2011.
- 91 Mulligan, G., 2007. The 6LoWPAN architecture, In *Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors, EmNets '07*, ACM.
- 92 N. Kushalnagar, G. Montenegro, D. E. Culler, and J. W.Hui, “Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks”, <http://tools.ietf.org/html/rfc4944>.
- 93 N. Xiong; P. Svensson (2002). "Multi-sensor management for information fusion: issues and approaches". *Information Fusion*. p. 3(2):163–186.
- 94 Network. In: *SigComm Conference on IPv6 (IPv6’07)*, Kyoto, Japan ZigBee: ZigBee specification, version 1.0. Available at (2004) ZigBee: ZigBee stack advanced user guide, JN-UG-3045 Revision 1.2, 6 Mar 2008
- 95 Nicopolitidis, P., Obaidat, M.S., Papadimitriou, G.I., Pomportsis, A.S.: *Wireless Networks*. Wiley, New York (2003)
- 96 O. Younis, M. Krunz and S. Ramasubramanian, “Clustering in Wireless Sensor Networks: Recent Developments and Deployment Challenges,” *IEEE Network Magazine*, Vol. 20, No. 3, May 2006, pp. 20-25.

- 97 OASIS Standard, 2009.Devices profile for web services (DPWS) version 1.1.
- 98 Omnet official site [Online]; Available: <http://www.omnetpp.org>.
- 99 P. Berwal, "Security in wireless sensor networks: issues and challenges," in Proceedings of the 8th International Conference Advanced Communication Technology (ICACT2006), Phoenix Park, Korea, 2006, pp. 1048-1054.
- 100 P. Berwal, "Security in wireless sensor networks: issues and challenges," International Journal of Engineering and Innovative Technology, vol. 3, no. 5, pp. 192-198, 2013.
- 101 Piri, Daniel (2014). "Sensor Fusion in Nanopositioning". Vienna, Austria: Vienna University of Technology. p. 140.
- 102 Priyantha, N.B., Kansal, A., Goraczko, M., Zhao, F., 2008. Tiny web services: design and implementation of interoperable and evaluable sensor networks. In SenSys '08: Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems, pp. 253–266, ACM, New York.
- 103 R. Agarwal, R. Gupta, and M. Motwani, "Review of weighted clustering algorithms for mobile ad hoc networks," Computer Science & Telecommunications, vol. 33, no. 1, pp. 71-78, 2012.
- 104 R. C. Luo, C.-C. Yih, and K. L. Su, "Multisensor fusion and integration: approaches, applications, and future research directions,"IEEE Sensors Journal", vol. 2, no. 2, pp. 107–119, 2002.
- 105 R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems "Journal of Basic Engineering", vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960.
- 106 RA. Shaikh, H. Jameel, S. Lee, S. Rajput, and YJ. Song, "Trust management problem in distributed wireless sensor networks," in Proceedings of 12th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, Sydney, 2006, pp. 411-414.

- 107 S. Basagni, "Distributed Clustering Algorithm for Ad Hoc Networks," International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks (ISPA'99), 1999, pp. 310-315.
- 108 S. Ganeriwal, and MB. Srivastava, "Reputation-based framework for high integrity sensor networks," in Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Security of Ad Hoc and Sensor Network (SASN2004), Washington, DC, 2004; pp. 66-77.
- 109 S. Ganeriwal, R. Kumar and M. B. Srivastava, "Timing-Sync Protocol for Sensor Networks," Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2003, pp. 138-149.
- 110 S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems," in Proceedings of the International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, vol. 3, 1997.
- 111 S. Kaplantzis, A. Shilton, N. Mani, and YA. Sekercioglu, "Detecting selective forwarding attacks in wireless sensor networks using support vector machines," in Proceedings of 3rd International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information (ISSNIP2007), Melbourne, Australia, 2007; pp. 335-340, IEEE.
- 112 S. Marchesani, L. Pomante, M. Pugliese, and F. Santucci, "A middleware approach to provide security in IEEE 802.15. 4 wireless sensor networks," in Proceedings of International Conference on Mobile Wireless Middleware, Operating Systems and Applications (Mobilware), Bologna, Italy, 2013, pp. 85-93.
- 113 S. Marti, TJ. Giuli, K. Lai, and M. Baker, "Mitigating routing misbehavior in mobile ad hoc networks," in Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Boston, MA, 2000, pp. 255-265.
- 114 S. Mehta, P. Sharma, and K. Kotecha, "A survey on various cluster head election algorithms for MANET," in Proceedings of 2011 Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE), Ahmedabad, India, 2011; pp. 1-6.
- 115 S. N. Gelyan, A. N. Eghbali, L. Roustapoor, S. A. Yahyavi, F. Abadi and M. Dehghan, "Scalable Lightweight Time Synchronization, Protocol for Wireless Sensor Network," International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks, Beijing, December 2007, pp.536-547.
- 116 S. Sasidharan, F. Pianegiani, and D. Macii, "A protocol performance comparison in modular WSNs for data center server monitoring", in Intl Symp. on Industrial Embedded Systems (SIES), July 2010, pp. 213–216. IEEE.

- 117 S. Soro, and WB. Heinzelman, "Cluster head election techniques for coverage preservation in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 5, pp. 955-972, 2009.
- 118 S. Taneja, and A. Kush, "A Survey of routing protocols in mobile ad hoc networks," *International Journal of Innovation, Management and Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 279-285, 2010.
- 119 SA. Camtepe, and B. Yener, "Key distribution mechanisms for wireless sensor networks: a survey," Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York: in Technical Report, pp. 05-07, 2005.
- 120 Samaras, I.K., Gialelis, J.V., Hassapis, G.D., 2009. Integrating wireless sensor networks into enterprise information systems by using web services. In *SENSORCOMM '09: Proceedings of the Third International Conference*, pp. 785-791
- 121 Schurgers, C., Srivastava, M.B.: Energy efficient routing wireless sensor networks. In: *Military Communications Conference on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*, vol. 1, pp. 357–361
- 122 Shelby, Z., Bormann, C., 2011. 6LoWPAN: The wireless embedded Internet - Part 1: Why 6LoWPAN?, *EE Times*.
- 123 Shelby, Z., Bormann, C.: 6LoWPAN—The Wireless Embedded Internet. Wiley, New York (2009) Wang, R.C., Chang, R.S., Chao, H.C.: Internetworking between ZigBee/802.15.4 and IPv6/802.3
- 124 SOAP Specifications -World Wide Web Consortium:
<http://www.w3.org/TR/2001/WD-soap12-20010709/>.
- 125 Svelte, A. T., 2010. *Cloud Computing: A Practical Approach*. McGraw Hill.
- 126 T. Atanasova, T. Tashev, "Analysis and Evaluation of Energy Losses in Living Environment on the Basis of Cognitive-Expert Classification", *Problems of engineering cybernetics and robotics*, vol. 64, pp. 11-18, 2011.
- 127 T. Kavitha, and D. Sridharan, "Security vulnerabilities in wireless sensor networks: a survey," *Journal of Information Assurance and Security*, vol. 5, no. 1, pp. 31-44, 2010.

- 128 TH. Hai, EN. Huh, and M. Jo, "A lightweight intrusion detection framework for wireless sensor networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 10, no. 4, pp. 559-572, 2010.
- 129 The Network Simulator (ns-2) [Online]; Available: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
OPNET official site [Online];
Available: <http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html?redirect=opnet>.
Tcl SourceForge Project [Online];
Available: <http://tcl.sourceforge.net/>.
- 130 V. Geetha, PV. Kallapur, and S. Tellajeera, "Clustering in wireless sensor networks: performance comparison of LEACH & LEACH-C protocols using NS2," *Procedia Technology*, vol. 4, pp. 163-170, 2012.
- 131 W. Choi, and M. Woo, "A distributed weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks," in *Proceedings of Advanced International Conference on Telecommunications and International Conference on Internet and Web Applications and Services (AICT-ICIW'06)*, Guadeloupe, French Caribbean, 2006, pp. 73-73.
- 132 W. Stallings, in *Cryptography and Security Network: Principles and Practices*, 5th ed, Harlow: Pearson Education, 2010. ISBN 10: 0-13-609704-9
- 133 X. Liu, "A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 12, no. 8, pp. 11113-11153, 2012.
- 134 Y. Huang, A. Pang, and H. Hung, "A comprehensive analysis of low-power operation for beacon-enabled IEEE 802.15.4 wireless networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 11, pp. 5601–5611, Nov. 2009.
- 135 Y. Wang, X. Wu, J. Wang, W. Liu, and W. Zheng, "An OVSF code based routing protocol for clustered wireless sensor networks," *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, vol. 5, no. 3, pp. 117-128, 2012.
- 136 Y. Weiss and W. T. Freeman, "On the optimality of solutions of the max-product belief-propagation algorithm in arbitrary graphs," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47, no. 2, pp. 736–744, 2001.
- 137 Y. Yu, and L. Zhang, "A secure clustering algorithm in mobile ad hoc networks," in *Proceedings of 2012 IACSIT Hong Kong Conferences (IPCSIT 29)*, 2012; pp. 73-77.

- 138 ZigBee Specification, ZigBee Document 053474r17 Version, pp. 1–576, 2008.
- 139 Z. A. Akhand and M. A. Bauer, Managing Quality-of-Service in Internet Applications Using Differentiated Services, Journal of Network and Systems Management, Vol. 10, No. 1, 2002.
- 140 Texas Instruments USA MSP430F449 datasheet.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f449.pdf>
- 141 З. Каракехайов „Сензорни мрежи“ ISBN: 978-954-438-903-1
- 142 З. Монов, З. Каракехайов „Дистрибутивни сензорни мрежи“ Международна конференция Созопол 2006, стр. 9-14
- 143 М. Илиев, Й. Александров „Анализ на безжични мултимедийни сензорни мрежи“ Научни трудове на Русенския Университет – 2010, том 49, серия 3.2
- 144 С. Иванов „Разработване на комуникационни модули за сензорни мрежи“
Международна научна конференция UNITECH 2010, Габрово, 19-20 ноември 2010
- 145 В.А. Ангелова, Н.Д.Христов, П.Х.Петков “Петурбационен и числен анализ на филтъра на Калман“ Международна конференция „АВТОМАТИКА И ИНФОРМАТИКА“ 5-6 1993г.
- 146 Alexandrov, A., V. Monov, Implementation of a service oriented architecture in smart sensor systems integration platform, Proc. of the Third International Conference on Telecommunications and Remote Sensing – ICTRS’14, 26-27 june 2014, Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg, DOI 10.5220/0005422101140120, ISBN 978-989-758-033-8, pp. 114-118, 2014.
- 147 Alexandrov, A., V. Monov, ZigBee smart sensor system with distributed data processing, Proc. of the 7-th IEEE Conference Intelligent Systems, Warsaw Poland, Vol. 2, pp. 259-268, September 24-28, 2014., In: Advances in Intelligent Systems and Computing, SPRINGER Vol. 323, ISBN 978-3-319-11309-8, DOI: 10.1007/978-3-319-11310-4_23.

148 Alexander Alexandrov " Power optimization algorithms for perimeter defense wireless seismic sensors" Institute of Defence, Proc. of the 7th International Scientific Conference HEMUS 2014 May 29-30, Plovdiv.

149 Alexander Alexandrov, "Comparative analysis of IEEE 802.15.4 based communication protocols used in wireless intelligent sensor systems" Proc. of the International conference RAM 2014 November 5-7 Sofia, ISSN 1314-4634, p.51-54

150 Alexander Alexandrov. "AD HOC Kalman filter based fusion algorithm for real-time Wireless Sensor Data Integration", Proc. of the Eleventh International Conference Flexible Querying Answering Systems 2015 October 26-28 2015, Warsaw, Poland SPRINGER Vol.400, ISBN 978-3-319-26153-9, DOI: 10.100/978-3-319-26154-6, pp.151-160

151 Alexander Alexandrov "Methods for optimization of ZigBee based autonomous sensor systems" Proc. of the International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS 2014 October 1-3 2014, Sofia, Bulgaria ISSN 1313-1850, pp.183-186