

ШУМЕНСКИ УНИВЕРСИТЕТ
„ЕПИСКОП КОНСТАНТИН ПРЕСЛАВСКИ”
Факултет по математика и информатика
Катедра „Компютърни системи и технологии”

ТЕОДОРА ТИХОМИРОВА СТОЯНОВА

**АЛГОРИТМИ ЗА МОДЕЛИРАНЕ РАБОТАТА НА БЕЗЖИЧНИ
СЕНЗОРНИ МРЕЖИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на

ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователна и научна степен „доктор”

Професионално направление: 4.6 „Информатика и компютърни науки”

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Александър Петров Милев

ШУМЕН

2018

Дисертацията съдържа 134 стр., от които 27 фигури, 6 таблици. Използваната литература включва 101 литературни източници на български, руски и английски език. По темата на дисертацията са направени 4 публикации.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от разширен съвет на катедра „Компютърни системи и технологии” при Факултета по математика и информатика на Шуменски Университет „Епископ Константин Преславски”, проведен на 26.04.2018 г.

Докторантът работи в катедра „Компютърни системи и технологии” на Факултета по математика и информатика при Шуменския Университет „Епископ Константин Преславски“.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 27.06.2018 г. от 14 часа в зала 219, Корпус 1 на Шуменския Университет „Епископ Константин Преславски“.

Материалите за защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на Шуменския Университет, Корпус 3, етаж 1.

Автор: Теодора Тихомирова Стоянова

Заглавие: Алгоритми за моделиране работата на безжични сензорни мрежи

Тираж: 15 броя

Излиза от печат на 09.05.2018 г.

Университетско издателство „Епископ Константин Преславски”,
Шумен, 2018 г.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Представената дисертация е във вид на научно – изследователски труд с формулирани цели и задачи, анализ и оценка на проблемите, формулиране, моделиране и модифициране на методи.

1. Актуалност на проблема

Днешната технологична среда в обхвата на сензорните мрежи независимо, че предоставя нови възможности в това отношение налага и даване на отговор на редица задачи, явяващи се база за разрешаване на съществени проблеми, свързани с получаването, представянето, предаването и обработването на информацията. Проектирането на такива системи е обект на дейност на редица научни и производствени организации, но необходимата за това теория и методи за анализ и проектиране са далеч от окончателно дефинирани. Очакват своето решаване множество задачи, свързани с разработване на единна методологична база по отношение на определянето на рационални или оптимални структури на сензорните мрежи, алгоритмите за функциониране, критериите и методите за определяне на ефективността и пр.

2. Цел и задачи на дисертационния труд

Цел на настоящият дисертационен труд е разработване на теоретична основа за изследване и оценка на процесите, свързани с получаването, предаването и използването на информацията в среда на сензорни мрежи на базата на адекватни за целта математически модели.

За постигане на тази цел, в дисертационния труд се решават следните основни задачи:

1. Разработване на методи и подходи за получаване на сензорна информация, с оценка на ефективността на тези процеси.

2. Разработване на методи, основаващи се на съответни математически модели, за описване на процесите на контрол и управление с използване на сензорна информация.

3. Разработване на методи за оценка и управление на информационните процеси в сензорните мрежи, в това число и чрез компресиране и групиране на информацията в тях.

4. Разработване на методи, основаващи се на адекватни за целта математически модели, за оценка на ефективността на протичащите в сензорните мрежи информационни процеси.

3. Предмет на изследването: Методи, основаващи се на разработени за целта математически модели за изследване и подобряване на протичащи в сензорните мрежи процеси на получаване, предаване, представяне и използване на сензорна информация.

4. Работна хипотеза: Разработването на методи за моделиране на процесите в сензорните мрежи ще повишат ефективността на получаване, предаване, представяне и използване на сензорна информация.

5. Обект на изследване в настоящата дисертация са методи за повишаване на ефективността на сензорни мрежи, чрез моделиране на процесите на получаване, предаване и използване на сензорна информация.

6. Методи за изследване: теория на вероятностите, математическа статистика, цифрова обработка на информацията, аналитично моделиране, статистическо моделиране.

7. Научна значимост и новост на резултатите от дисертационния труд

Предложени са математически модели, описващи процесите на получаване, предаване и използване на сензорна информация.

Разработени са математически модели на енергийните и информационни характеристики на обmena на информация в радиосреда на сензорна мрежа.

Разработени са методи, основаващи се на предложени за целта математически модели, за оценка на ефективността на сензорните мрежи.

8. Практическа полезност и приложимост на резултатите

Разработени са методи и математически модели, позволяващи използването им в практическата дейност по разработване, внедряване и използване на безжични сензорни мрежи.

9. Аprobация на резултатите, получени в дисертационния труд:

Основни части от дисертационния труд са докладвани на различни научни конференции с международно участие и са публикувани в сборници.

10. Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е структуриран в увод, четири глави, изводи след всяка глава, заключение, използвана литература и списък на публикациите, свързани с темата на дисертацията.

Дисертационният труд съдържа 134 стр., от които 27 фигури, 6 таблици. Номерацията на математическите формули, таблиците и фигурите в автореферата, съответстват на тези в дисертацията.

II. КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В Увода са формулирани целта и задачите на дисертацията.

ГЛАВА ПЪРВА. БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ - СЪЩНОСТ И ОСОБЕНОСТИ

В първа глава са разгледани същността, спецификата и особеностите на безжичните сензорни мрежи. Дефинирани са основни проблеми, свързани с тяхното функциониране и използване. Разгледана е актуалността на проблемите, свързани с получаването, предаването и използването на сензорна информация. Дефинирани са основни пътища за повишаване на ефективността на сензорните мрежи.

1.1 Сензорни възли - функционални компоненти на сензорен възел

БСМ съдържа стотици или хиляди сензорни възли. Тези възли имат възможността да комуникират по между си или директно да изпращат данните към базова станция (БС). По-големият брой на възлите позволява на следенето на по-голяма площ с повече точност. Всеки сензорен възел включва сензорна част, обработваща част, предаваща част, мобилайзер, система за откриване на местоположението и батерия. Обикновено са разпръснати в сензорно поле, което представлява областта, в която те трябва да следят определени параметри. В безжичната сензорна мрежа сензорните устройства нямат IP адреси и не използват глобални идентификатори.

1.2 Базова станция

Освен сензорните възли, друг основен елемент в БСМ е базовата станция. За разлика от сензорните възли, базовата станция притежава много по-голяма изчислителна мощност, по-голяма памет и често е свързана с по-добър източник на енергия от батериите, т.е. електрическата мрежа. Човек може да гледа на базовата станция като входна точка към БСМ, където основната цел на базовата станция е да събира сензорни данни от сензорните възли. Други важни цели, които базовата станция трябва да извърши, може да бъде визуализация и анализ на данните. В някои случаи тя ръководи рутинането на сензорната мрежа или конфигурацията на възел.

1.3 Основни изисквания към безжичните сензорни мрежи

Съвременните разновидности на БСМ трябва да удовлетворяват следните основни изисквания:

- *Надеждност*, която да осигурява сигурно предаване на данните в условия на променяща се структура на БСМ.

- Да са *разширяеми* (Scalable), което означава възможност за увеличаване на броя на възлите, без това да предизвиква генериране на допълнителни контролни пакети.

- Да имат *бърза реакция* (Responsiveness), т.е. способност за бързо нагаждане към промени в структурата на мрежата. Времето за реакция обикновено е няколко *ms* дори при голям брой възли.

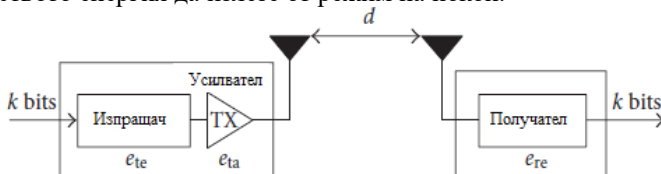
- Да осигуряват *подвижност*, което е способността за промяна на пътищата за връзки между възлите и възможността да съдържат подвижни възли.

- Да са *енергийно ефективни*, осигурявайки възможност за работа с малка консумация на енергия.

1.4 Рутiranje

1.4.1 Разход на енергията при изпращане

На фиг. 1.3 е илюстриран модела на консумацията при трансмисия. Трябва да се има предвид, че е нужно съобразяване освен с енергията необходима на изпращача да оформи пакет, така и с нужната за устройството енергия да излезе от режим на покой.



Фиг. 1.3 Модел за консумацията на енергия при трансмисия на k брой битове

Енергията нужна на усилвателя в последствие се приема за константа при изпращането на малки пакети за продължителен период от време. В [9] е представен модел за очаквания разход на енергия при радио трансмисиите със следната формула:

$$e_b = e_{tx} + e_{rx} + \frac{E_{dec}}{l} \quad (1.1)$$

Където e_{tx} и e_{rx} са използваната енергия за bit на изпращача и съответно на получателя, респективно E_{dec} е енергията нужна да се разкодира пакета, а l представлява полезния товар в този пакет.

1.4.2 Предизвикателства при рутирването и въпросите свързани с проектирането на рутиращи протоколи в БСМ

Въпреки големия брой приложения, сензорните мрежи имат няколко ограничения – енергия, възможности за изчисляване, честотна лента и др. Една от главните цели на проектирането на БСМ е да се предават повече данни, като през това време мрежата се стреми да

съхрани „живота“ си за по-дълъг период от време. Има редица фактори оказващи влияние при проектирането на рутиращите протоколи.

- *Разположение на сензорните*
- *Енергийна консумация*
- *Начин за предаване на данните*
- *Хетерогенни сензори/вързки*
- *Допустими грешки*
- *Скалируемост (голям брой устройства)*
- *Мобилност на мрежата*
- *Покритие и свързаност*
- *Качество на услугата*

1.4.3 Основни характеристики, влияещи върху дизайна на рутиращите протоколи в безжичните сензорни мрежи

Основни характеристики, влияещи върху дизайна на рутиращите протоколи в безжичните сензорни мрежи са:

- големия брой устройства, които са произволно разгърнати в големи количества и се наблюдават отдалечено. Това е основната причина при тях да не се прилага подход с изграждане на глобална схема за адресация, която ще бъде неефикасна и трудна за управление.

- сензорните мрежи са самоконфигуриращи се и самоуправляващи се в следствие от ограничените възможности за по нататъшна поддръжка.

- възлите имат строго ограничени ресурси по отношение на енергия (батериите на сензорните възли не се презареждат или подменят след като са разположени), обработка, запис на данни и комуникация.

- ограничена мобилност на възлите.

- потокът от данни е в една посока, обикновено от много области (сензори) към дадена базова станция. Това свойство ги отличава от другите мрежи, в които информационните потоци са с произволен характер.

- генерирания трафик има значителна пространствена корелация и излишък, тъй като множеството съседни сензори могат да генерират подобни данни.

1.5 Сравнение на БСМ със и без агрегиране на данни

Един от основните проблеми с БСМ е, че трябва да се увеличи жизнеността на мрежата. Обикновено животът на мрежата се определя от времето, в което първият възел не успее да изпрати информацията си до базовата станция. Този проблем може да бъде разрешен чрез прилагане на техниката за агрегиране на данни, тъй като намалява трафика на данни и освен това спестява енергия, като обединява

множество входящи пакети в един пакет, когато усетената информация е силно корелирана. Извършени са многобройни изследвания за по-голяма продължителност на живота на мрежата. В таблица 1.1 са сравнени безжични сензорни мрежи с агрегиране и без агрегиране на данни [11].

Таблица 1.1

№	БСМ с агрегиране на данни		БСМ без агрегиране на данни	
	+	-	+	-
1.	Елиминира излишните данни и спестява енергия на сензорите	Не се прилага във всички сензорни среди. Например, ако данните, предавани от всички възли са различни, агрегирането на данни не може да бъде извършено.	Може да се прилага във всички сензорни среди.	Броят и размерът на предаваните данни са повече.
2.	Намалява размера и броя на предаванията на данни	Агрегаторът или главния възел може да бъде атакуван	Тъй като няма агрегиране, проблемът с маршрутизацията на данни възникнал при предаването на данни, може да се посочи като проблем с максималния поток и може лесно да бъде разрешен чрез програма с линейни ограничения.	Сензорите консумират повече енергия, докато прехвърлят данни от един възел към друг
3.	С този процес сензорът има способността да агрегира множество входящи пакети в единичен пакет	В някои случаи, възлите консумират повече енергия когато агрегирания резултат е изпратен до БС през uncompromised възли	-	Сензорният възел може да събира едни и същи данни от различни възли

1.5 Протоколен стек

Основните слоеве са:

- *Приложен слой*: Определя стандартен набор от услуги и интерфейсни примитиви, достъпни на програмиста, независимо от изпълнението им на всяка платформа. Пример за това е така наречената платформа за мрежови услуги за сензори (SNSP) [12].

- *Транспортен слой*: Помага за поддържането на потока от данни, ако приложението на сензорните мрежи го изисква. Този слой е особено необходим, когато системата е планирана да бъде достъпна чрез Интернет или други външни мрежи. За разлика от протоколите като TCP, схемите за комуникация от край до край в сензорните мрежи не се основават на глобално адресиране. Ето защо може да са необходими нови схеми, които разделят комуникацията от край до край, вероятно в БС.

- *Мрежов слой*: Той се грижи за маршрутизиране на данните, насочвайки процеса на избор на пътища, по които да се изпращат данни в мрежата.

Повечето приложения на БСМ изискват голям брой сензорни възли, които покриват големи участъци, което налага непряк комуникационен подход [6]. Това означава, че сензорните възли не само трябва да генерират и разпространяват собствена информация, но и да служат като релета или предавателни възли за други сензорни възли.

- *Канален слой*: осигурява мултиплексирание на потоци от данни, откриване на кадри на данни и контрол на достъпа до средата (MAC).

Изборът на MAC протокол има пряко отношение към надеждността и ефикасността на мрежовите предавания.

Тъй като енергийната ефективност е основен проблем в безжичната сензорна мрежа, тя оказва влияние върху дизайна на MAC протокола. Енергията се консумира не само за предаване и получаване на данни, но и за улавяне на активност в наблюдаваната област. Други причини за потреблението на енергия включват препредаване на данни (например, вследствие на сблъсъци), общите разходи за пакети, предаването на контролни пакети и нивата на мощността на предаване, които са по-високи от необходимите за достигане до приемник.

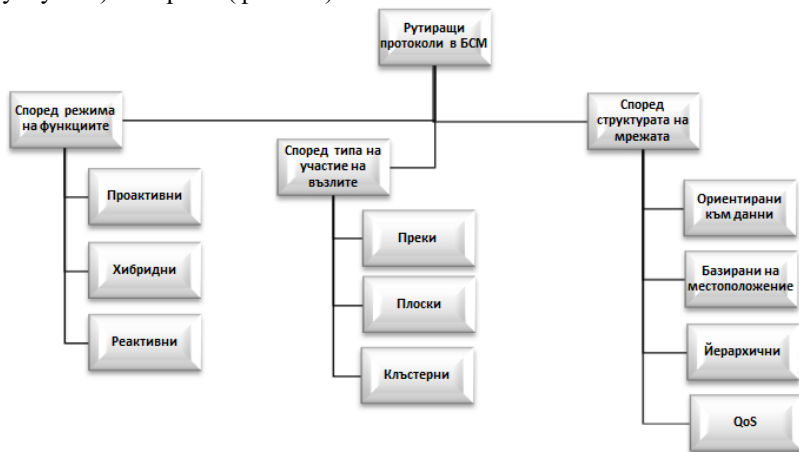
- *Физически слой*: той отговаря за честотата и избора на мощност, модулация и шифроване на данни [12].

1.7 Класификация

1.7.1 Класификация на рутиращите протоколи в БСМ

Рутиращите протоколи за БСМ са класифицирани на база режим на функциите, мрежова структура и типа на участие на сензорните възли. Протоколите от първата група се делят на активни, реактивни

или хибридни. В режим на участие протоколите могат да бъдат плоски, преки (директни) и клъстерно базирани. Протоколите според структурата на мрежата могат да бъдат ориентирани към данните, базирани на местоположение, йерархични или QoS (качество на услугата) базирани (фиг. 1.9).



Фиг. 1.9 Групиране на рутиращи протоколи в БСМ

1.7.1.1 Протоколи на база режим на функциите

В *проактивните* протоколи, рутиращата таблица се генерира от всеки възел и информация за маршрутите на цялостна мрежа се актуализират периодично.

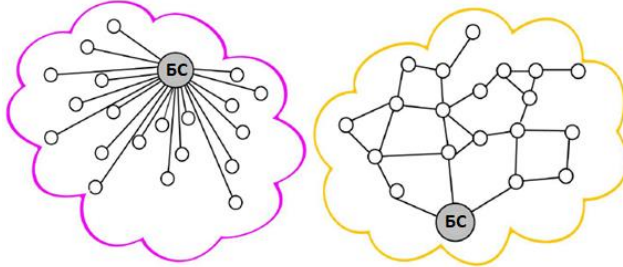
В *реактивните* протоколи за маршрутизация не се генерира рутираща таблица и откриването на маршрут се извършва в съответствие с изискванията. Маршрутите между възлите стават ясни при поискване.

Третия тип протоколи, *хибридните* имат за цел да спечелят от предимствата на предходните два, използвайки както реактивен, така и проактивен подход. Хибридният подход намалява разходите за мрежата. Той първо изчислява всички маршрути и след това подобрява маршрути по време на рутране. [13]

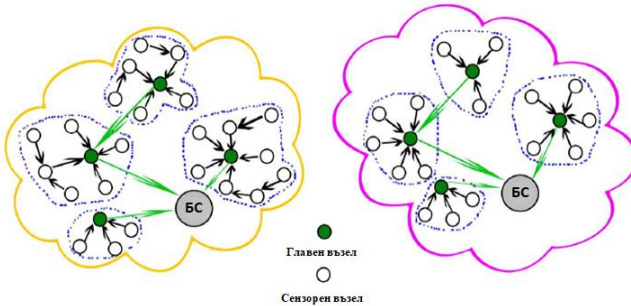
1.7.1.2 Според типа на участие на възлите

Втората класификация е според начина на взаимодействие на възлите и в тази категория, трите вида протоколи за маршрутизация са: *преки* (директни), *плоски* и *клъстерни*. Прекият вид се основава на изпращане на цялата информация, директно до базовата станция, показано на фиг.1.10. При плоския тип възлите първоначално намират

валиден маршрут до базовата станция, след което изпращат пакети до нея или до други възли чрез рутване, като Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN), Direct Diffusion (DD) и Rumour Routing. При клъстерният тип областта се разделя на няколко малки клъстери, в които главния възел директно комуникира с базовата станция или първо изпраща данните си до съседен главен възел, който от своя страна ги препраща към БС, както е показано на фиг. 1.11. [14]



Фиг. 1.10 Пряка и плоска архитектура



Фиг. 1.11 Клъстерна архитектура multi-hops и single-hop

1.7.1.3 Протоколи базирани на структурата на мрежата

Протоколите ориентирани към данни зависят от етикет или наименование на необходимите данни и са отговорни за премахване на излишни предавания. В тази категория, базовата станция изпраща заявки, изискващи определени данни от възлите в мрежата и ако данните съответстват на заявката, то те ги изпращат обратно към нея.

Йерархично базираните протоколи извършват енергийно ефективно рутване, избирайки по-високи енергийни възли за обработка и изпращане на информацията към базовата станция или към междинен главен възел.

Протоколите базирани на местоположение, изискват информация за местоположението на сензорните възли обикновено

достъпни от GPS (Global Positioning System) сигнали или силни радио сигнали. В тази категория, чрез протоколите за рутиране се изчислява разстоянието до съседен възел от силата на входящия сигнал. За да се пести енергия в мрежата възлите използват активно или спящо състояние, като при активно състояние възелът е „жив“, а в спящо състояние възела почива.

Протоколи базирани на качеството на услугата (QoS), при които рутирането се фокусира върху някои изисквания на мрежовия слой, като надеждност и латентност.

1.7.2 Класификация според разположението на БСМ

В зависимост от условията на разполагане на земята, под земята или във водата, има няколко вида безжични сензорни мрежи: сухоземни, подземни, подводни, мултимедийни и мобилни.

1.7.3 Класификация според приложенията

Наличието на евтини сензори и безжична комуникация допринасят за разработването на широк спектър от приложения както в гражданската, така и във военната област. Съществуват редица предложени протоколи за рутиране в БСМ. Различните приложения изискват различни видове протоколи за рутиране, които имат различни степени на надеждност [20]. Според конкретното приложение, протоколите са:

- Мониторинг на околната среда - SPAN, GAF, COUGAR, ACQUIR, DD
- Военна област – GAF
- Здравни грижа - GBR, SAR
- Контрол на индустриалния процес – SAR
- Домашни мрежи - GRER, APTTEN.

1.8 Изводи

1. Направен е анализ и са разкрити основни тенденции в развитието на безжичните сензорни мрежи.
2. От направения анализ е обоснована актуалността и целесъобразността на настоящото изследване.
3. Въз основа на извършен анализ са разкрити съществени особености на безжичните сензорни мрежи и са дефинирани изисквания за научни търсения, свързани с ефективното им използване.
4. Предложени са класификации по отношение на видовете рутиращи протоколи, разположението и приложението на БСМ.

ГЛАВА ВТОРА. ОСНОВНИ МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИ, СВЪРЗАНИ С ПОЛУЧАВАНЕ, ПРЕДАВАНЕ И ИЗПОЛЗВАНЕ НА СЕНЗОРНА ИНФОРМАЦИЯ

Във **втора глава** се предлагат основни математически модели, свързани с получаване, предаване и използване на сензорна информация.

2.1 Базов подход на получаване на сензорна информация

Източници на сензорна информация се явяват различни обекти, в общия случай: физически динамични системи. Поради това информацията на изхода на съответния сензор може да се представи, в общия случай, като резултат от преминаване на някакъв процес през динамична система, състояща се от конкретния обект, чийто параметри са обект на измерване. Математически това ще представлява многомерно, нелинейно диференциално уравнение с променливи или случайни коефициенти. На практика в значителен брой от случаите една нелинейна система може, с някаква степен на приближение, да се опише чрез линейна система диференциални уравнения.

Нека е налице съобщение, което се описва във времето посредством функцията $\lambda(t)$. В общия случай информацията на изхода на съответния сензор се явява резултат от реализация, в общия случай, на нестационарен случаен процес $\Lambda(t)$.

$$\Lambda^k(t) + a_{k-1}(t)\Lambda^{(k-1)}(t) + \dots + a_0(t)\Lambda(t) = b_{k-1}(t)N^{(k-1)}(t) + \dots + b_0(t)N(t)$$

2.2 Модел на енергийни и информационни характеристики на обмена на информация в радиосреда на сензорна мрежа.

Максималното разстояние, на което може да се осъществи предаване на информация между обекти на сензорна мрежа се определя съгласно израза [64]:

$$R_{max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{пр}} \eta_{\text{прд}} \eta_{\text{пр}} L_o N}{P_{\text{прmin}}}}, \quad (2.8)$$

където:

R_{max} – максимална дължина на радиолинията;

λ – дължина на вълната;

$P_{\text{прд}}$ – мощност на предавателя;

$G_{\text{прд}}$ – коефициент на усилване на предавателната антена;

$G_{\text{пр}}$ – коефициент на усилване на приемната антена;

$\eta_{\text{прд}}$ – к.п.д. на антенно-фидерния тракт на предавателя;

$\eta_{\text{пр}}$ – к.п.д. на антенно-фидерния тракт на приемника;

L_o – коефициент на запаса, отчитащ затихването на електромагнитната енергия при нейното разпространяване в конкретните условия;

N – коефициент на запаса, отчитащ възникващи загуби, следствие от неравномерността на диаграмата на насоченост на антените на приемника и предавателя, а така също и поляризационните загуби;

$P_{\text{пр}min}$ – минимална допустима мощност на сигнала на входа на приемника.

Нека $\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}\right)$ е реалната чувствителност на приемника – отношение сигнал/шум на входа на приемното устройство; $P_{\text{ш}} = kT_e f F$ – мощност на шума на входа на приемник; като F е ширина на лентата на пропускане на приемника по висока честота, т.е. до детектора; $T_{\text{ш}}$ – шумова температура на приемната антена.

Тогава (2.8) приема вида:

$$R_{max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{пр}d} G_{\text{пр}d} G_{\text{пр}} \eta_{\text{пр}d} \eta_{\text{пр}} L_o N}{\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}\right)_{min} k T_e f F}}, \quad (2.9)$$

Максималната скорост на предаване на информация по радиоканал, в bit/s , ще се определи по формулата на Шенън:

$$C = F \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right), \quad (2.11)$$

където F – лента на пропускане на радиоканала в Hz ;

P_c – средна мощност на радиосигнала;

$P_{\text{ш}}$ – средна мощност на шума.

Шумът на приемника е пропорционален на честотната му лента по висока честота:

$$P_{\text{ш}пр} = kF, \quad (2.12)$$

където k е коефициент на пропорционалност.

Предвид на това, че в условия на нормално предаване на информация по радиоканала мощността на шумовете от външни източници е пренебрежимо малка в сравнение с мощността на сигнала $P_{\text{ш}} = P_{\text{ш}пр}$. Тогава $P_{\text{ш}пр} = kF$, от (2.11), като се постави $P_{\text{ш}пр} = kF$ и се извършат съответните преобразования се получава:

$$P_{\text{ш}} = k \frac{C}{\log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)} \quad (2.13)$$

Значението за $P_{\text{ш}}$ от (2.13) се поставя в (2.9) и се получава:

$$R_{max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{пр}} \eta_{\text{прд}} \eta_{\text{пр}} L_o N \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}}\right)}{kC \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{min}}}} \quad (2.14)$$

2.3 Функционални модели на процесите на контрол и управление чрез сензорна мрежа.

Процесите на контрол и управление на динамична система се осъществяват под въздействието на управляващи сигнали и смущаващи въздействия. Самата система се определя чрез съвкупност от изходни параметри, свързани с въздействията на системата чрез съответна система уравнения, които могат да са от типа линейни или нелинейни диференциални уравнения.

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= F_{o_i}(t, \tau, X, Z), \quad i = 1, 2, \dots, m' \\ \zeta_i &= \sum_{i=1}^{k'} \zeta_{ij}^o(t, \tau, X) \bar{\eta}_i, \end{aligned} \quad (2.21)$$

където

ζ_{ij}^o – неслучайни координатни функции;
 η_i – случайни коефициенти;
 F_{o_i} – неслучайна нелинейна функция.

2.3.1 Математически модел за определяне на параметрите на контролиран обект с използване на метода на статистическата линеаризация.

Системата диференциални уравнения описващи състоянието на контролиран обект в достатъчно обща форма има вида [68].

$$\begin{aligned} \sum_{\rho=1}^m M_{l_\rho} \left(i, \tau, \frac{d}{dt}, Q \right) x_\rho &= F(X, Z, t, \tau) + \varphi_l(Z_i), \\ Z_i &= \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l x_i + \sum_{j=1}^{N_l} C_j^l \zeta_j; \\ i &= 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (2.24)$$

където $a_i^l; C_j^l$ – постоянни коефициенти

$X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ – вектор случайни функции на параметър t , определящ движението на обекта;

$Z(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_h)$ – вектор от въздействия, явяващ се случайна функция на параметъра t ;

F_l – нелинейни функции, допускащи линеаризация по отношение на някакъв режим на движение на обекта в границите на работните диапазони на величините или функциите;

φ_l – нелинейни функции, недопускащи линеаризация;

M_{l_ρ} – полином относително оператора на диференциране с променливи във времето коефициенти;

S_l – брой на параметрите, които определят поведението на обекта;

N_l – брой на действащите въздействия.

Системата уравнения за определяне на случайните съставляващи на функциите са:

$$\sum_{\rho=1}^m M_{l\rho} \left(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q \right) x_\rho^o = \sum_{\mu=1}^m \left[\frac{\partial F_l}{\partial m_{x_\mu}} \right]_o x_\mu^o + \sum_{j=1}^m \left[\frac{\partial F_l}{\partial m_{\zeta_j}} \right]_o \zeta_j^o + K_1^l Z_l^o;$$

$$Z_l^o = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l x_i^o + \sum_{j=1}^{N_l} C_j^l \zeta_j^o, \quad (2.26)$$

където K_0^l и K_1^l са статистически коефициенти на усилване.

2.3.2 Математически модел на законите на разпределение на параметрите на обекта за контрол с използване на метода на хармонична линеаризация.

За определяне на математическото очакване на изходните параметри:

$$\sum_{\rho=1}^m M_{l\rho} \left(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q \right) m_{x_\rho} = F_l(t, \tau, m_x, m_z) + \varphi_l^o(Z_l^o);$$

$$Z_l^o = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l m_{x_i} + \sum_{j=1}^{N_l} C_j^l m_{\zeta_j}, \quad (2.28)$$

Системата уравнения за определяне на случайните съставляващи функции е от вида:

$$\sum_{\rho=1}^m M_{l\rho} \left(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q \right) x_\rho^o = \sum_{\rho=1}^m \left[\frac{\partial F_l}{\partial m_{x_\rho}} \right]_o x_\rho^o + \sum_{j=1}^k \left[\frac{\partial F_l}{\partial m_{\zeta_j}} \right]_o \zeta_j^o + g Z_l^* + \frac{g'}{\Omega} \cdot \frac{d}{dt} \cdot Z_l^*;$$

$$Z_l^* = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l x_i^o + \sum_{j=1}^{N_l} C_j^l \zeta_j^o \quad (2.29)$$

Чрез интегриране на (2.28) и (2.29) се определя математическото очакване и корелационната функция на изходните параметри.

2.4 Оптимално дискретно предаване на случаен процес на изхода на линейна динамична система

Дискретното предаване на непрекъснато съобщение представлява процес на функцията $\lambda(t)$, която е непрекъсната във времето функция с дискретно време λ_i . Същата представлява съвкупност от величини, по значенията на които може да бъде получена оценка на непрекъснатото съобщение $\lambda^*(t)$. Тези величини се наричат координати.

В най-общ вид дискретното представяне на непрекъснатото съобщение $\lambda(t)$ на интервала T чрез съвкупността от координати $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ може да се запише като:

$$(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_k}) = A\lambda(t).$$

А обратното преобразование като:

$$\lambda^*(t) = B(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_k});$$

където A – оператор на представяне; B – оператор на възстановяване.

След преобразуване дискретното представяне ще е:

$$\Delta_\lambda^N(t_i) = \sum_{k=0}^N (-1)^k C_N^k \lambda(t_i - kT_0),$$

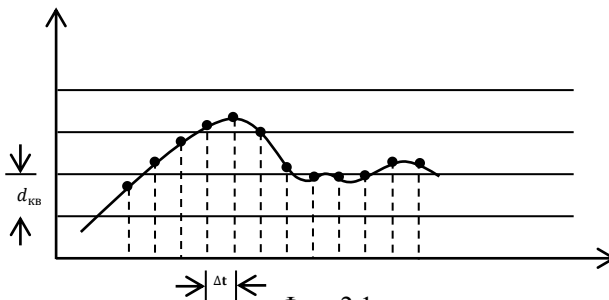
2.5 Цифрово представяне на сензорна информация

За цифрово представяне на координатите λ_i на сензорно съобщение в цифров вид, същите се изразяват (кодират) с помощта на съответен код. При това стойностите на координатите на съобщението се закръглят до цяло число стъпки на квантоване. Количеството стъпки, на които се разделя скалата за квантоване е $\Lambda = 6\sigma_\lambda$.

Квантоването може да е равномерно, с постоянна стъпка и неравномерно, с променлива стъпка за цялата скала.

В случай на променливо квантоване размерите на стъпката са съгласувани с плътността на вероятността на стойностите на координатите на съобщението.

Грешките при квантоване зависят от вероятностните характеристики на процеса, т.е. от степента за закръгляване на резултата до цяло число брой нива, разположени под или над значението на сигнала за конкретната точка на времева дискретизация (фиг. 2.1).



Фиг. 2.1

Стъпката на квантоване тогава ще е:

$$d_{\text{кв}} = \frac{\Lambda \delta_{\text{кв}\Sigma}^2}{\sqrt{3\gamma\phi}} = \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{\gamma\phi}} \delta_{\text{кв}\Sigma}^2 \sigma_\lambda \quad (2.46)$$

2.6 Методи за предаване на сензорни данни чрез компресиране на информацията

Едно от основните изисквания при предаване на сензорна информация е минимизиране на времето за заетост на ефира. За тази цел е целесъобразно прилагане на методи за компресиране на

информацията. Два такива метода се предлагат в настоящото изложение.

2.6.1 Метод за компресиране на сензорна информация с усреднена екстраполация.

Първото съобщение от съответния сензор, подлежащо за предаване за времето на текущ участък с дължина Δt се записва в съответна памет на предаващата страна. Необходимост за предаване на сензорна информация непрекъснато възниква през интервали τ . В случай, че за следващите след първото съобщение се изпълнява условието $(S_{i-1} - S_i) < \varepsilon$, такова съобщение не се предава. Съобщение ще се предаде при условие, че $(S_{i-1} - S_j) < \varepsilon$, $j = i + 1, i + 2, \dots$. За времето t_2 стойността на параметъра $\|S_2\|$ получаван от съответния сензор се приема равен:

$$S_2 = \frac{\|S_1\| + \|S_3\|}{2}, \quad (2.48)$$

където

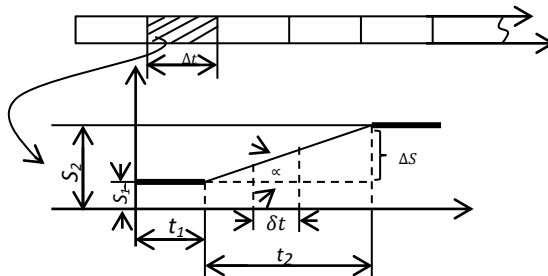
$\|S_i\|$ е стойност на параметъра, предаван чрез i -то съобщение.

2.6.2 Метод за компресиране на сензорна информация с линейна екстраполация.

При предаване на сензорна информация първото съобщение от всеки участък с продължителност Δt се записва в записващо устройство на предаващата страна и се предава по канала за свързка. Самият процес на предаване на сензорна информация е показан на фиг. 2.3. От този момент нататък, за целия участък Δt се предават само съобщения, за които:

$(S_1 - S_2) \leq \varepsilon$ – за второто предадено съобщение и

$(S_i - S_{i+1}) \leq \varepsilon$ за $(i + 1)$ -во съобщение, където S_i - стойност на параметъра, предаден чрез i -то предходно съобщение.



Фиг. 2.3

В такъв случай стойността на параметъра за всеки участък δt ще се определи като:

$$S_i = i \delta t t g \alpha + S_{i-1}, \quad (2.51)$$

където $i = 1, 2, 3, \dots$ номер на подучастъка δt на участъка Δt , S_{i-1} - екстраполирана стойност на параметъра за $(i - 1)$ -ви подучастък.

2.7 Атаки и защита за сигурността на БСМ

2.7.1 Основни цели на сигурността

Сензорните възли са разположени в незащитена среда и това прави мрежата уязвими към различни потенциални атаки за сигурността. Ограничената енергия и памет на сензорните възли ги прави податливи на атаки.

За надеждна и сигурна комуникация в мрежата, трябва да се гарантира изпълнението на следните изисквания за сигурност на данните: поверителност, цялостност, удостоверяване на данни, наличност и актуалност на данните.

Заплахите в БСМ може да бъде извън мрежата и в рамките на мрежата. Атаките могат да бъдат два вида: активни и пасивни. Пасивните атаки не променят или модифицират данни докато активните атаки го правят.

2.7.2 Атаки отказ от услуга (Denial Of Service - DOS)

При DOS атаки в безжичната мрежа не само се причинява повреда на съответен възел, а и се влошава работата на цялата мрежа, защото възлите имат ограничена мощност на батерията и мрежата може да бъде претоварена, поради ограничената пропускателна способност. Възможни са много форми на DOS атаки над сигурността и е трудно да бъдат предотвратени. Тези атаки правят уязвими всички слоеве на протоколния стек, както е показано на фиг. 2.4.



Фиг. 2.4 DOS атаки в различните слоеве на TCP модела

2.7.3 Решение за сигурността в БСМ

За да се постигне сигурност в БСМ, решение е използването на криптиране и удостоверяване, протокол за управление на ключове,

както и защита срещу DOS атаки с използване на кодове за коригиране на грешки.

2.8 Изводи

1. В контекста на разглеждане на основни математически модели, свързани с получаване, предаване и използване на сензорни данни е дефиниран базов подход за моделиране на получаването на сензорна информация. В тази връзка са предложени и модели на стационарни информационни процеси.
2. Разгледан е модел на енергийни и информационни характеристики на процесите на обмен на информация в радиосреда на сензорна мрежа.
3. Предложен е подход за анализ на процесите на контрол и управление чрез сензорна мрежа. Подходът се основава на съответни математически модели.
4. Предложена е методология за определяне на законите на разпределение на параметрите на обект за контрол с използване на модел, основаващ се на методи на хармонична линеаризация.
5. Предложена е методология, основаваща се на съответни математически модели, за реализиране на оптимално дискретно представяне на случаен процес на изхода на линейна динамична система. Методологията е допълнена с предложени методи за ефективно цифрово представяне на сензорна информация.
6. Разработени са методи за предаване на сензорни данни в сензорна мрежа чрез компресиране на информацията. Предложените методи се основават на два предложени подхода за екстраполация на сензорната информация – усреднена и линейна.
7. Анализът на проблема за сигурността на БСМ показва, че атаките във физическия слой се преодоляват най-трудно. Използването на симетрично криптиране и удостоверяване е от съществено значение за постигане на сигурността в БСМ.

ГЛАВА ТРЕТА. МОДЕЛИ НА УПРАВЛЕНИЕ ПОЛУЧАВАНЕТО НА ПЪРВИЧНА СЕНЗОРНА ИНФОРМАЦИЯ И ГРУПИРАНЕ НА ПОТОЦИТЕ СЕНЗОРНИ СЪБОЩЕНИЯ

В трета глава са разработени методи за групиране на получената сензорна информация. Предложени са подходи за подобряване на това групиране.

3.1 Методи за групиране на информационните потоци

Една от основните задачи, изпълнявани от сензорните мрежи е обединяване (групиране) на информационните потоци от различни източници с оглед на предаването им по общ канал за информационен обем. В зависимост от характеристиките на информационните потоци това може да се осъществи с използване на различни методи.

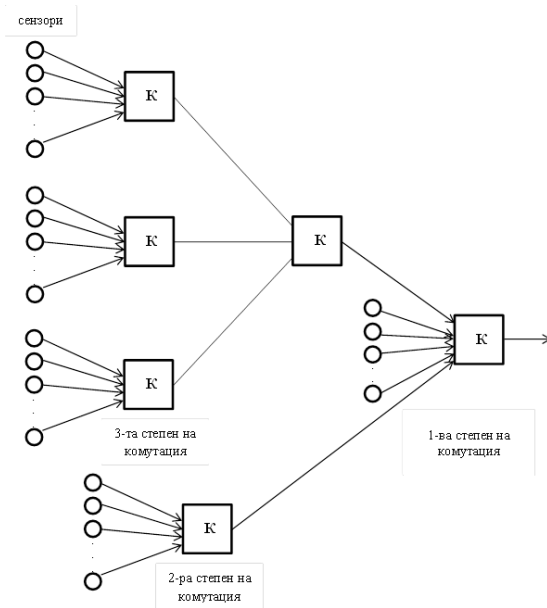
3.1.1 Управление на рутиранието в БСМ

Разработването на алгоритъм за рутирание е от съществено значение в проектирането на БСМ. Повечето от клъстерни рутиращи протоколи са разработени на базата на LEACH. Избирайки на произволен принцип възли за изграждане на главен възел измежду всички останали, той балансира натоварването на мрежата и предотвратява бързата „смърт“ на останалите възли.

3.1.2 Групиране на информационните потоци чрез циклична комутация на каналите

Групирането на информацията чрез циклична комутация на каналите може да се реализира в случаи, когато информационните потоци във всеки един измерителен канал се формират посредством регулярна дискретизация с постоянна, фиксирана стъпка $T_{o_j}, j = 1, 2, \dots, n$; n - брой на каналите. По отношение на всеки едни канал се определя своя честота на запитване $f_{o_i} = \frac{1}{T_{o_j}}, j = 1, 2, \dots, n$. В случая се използва многостепенна комутация с възможност за обединяване на няколко входа на комутатора на всяка степен на едни измерителен канал.

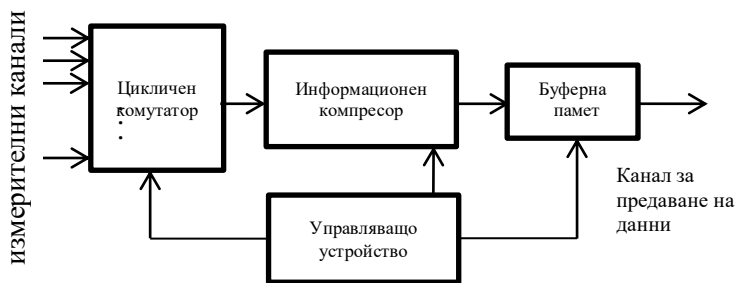
На фиг. 3.1 е представена структурна схема на система с групиране на информационните потоци чрез циклична комутация на каналите, която демонстрира принципа на многостепенна комутация.



Фиг. 3.1.

3.1.3 Групиране на случайна информационни потоци чрез циклична комутация с крайна буферна памет

Структурната схема на групирането на информационните потоци чрез циклична комутация с използване на крайна буферна памет е показана на фиг. 3.2.

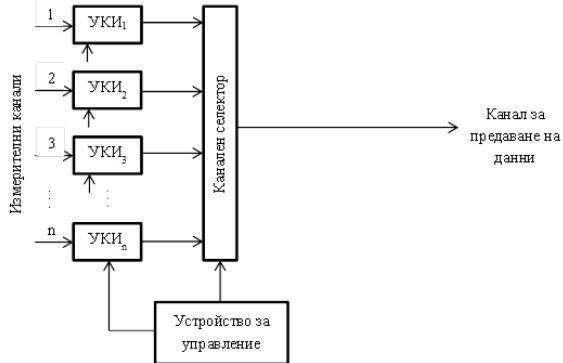


Фиг. 3.2.

По този начин се осъществява равномерно натоварване на канала за свързка (равномерен поток от съобщения) при входни неравномерни информационни потоци.

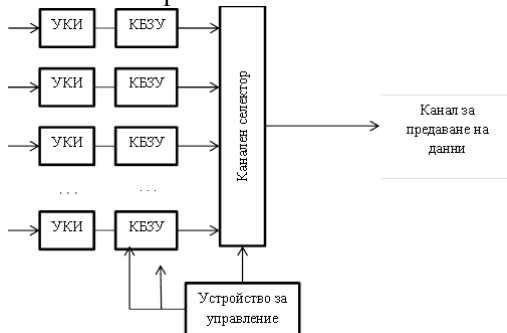
3.1.4 Групиране на случайни информационни потоци чрез адаптивна комутация

Устройството за компресиране на информацията за всеки информационен канал осъществява отстраняване на информационното излишество в постъпващите съобщения. При всеки такъв сигнал от устройството за управление се пропуска, от каналния селектор, в канала за предаване на данни информация само от един информационен канал.



Фиг. 3.3.

На фиг. 3.4 е представена схема на адаптивна комутация с използване на канални буферни запомнящи устройства. Тази схема реализира метод за комутация на измерителните канали, който изключва загуба на информация при едновременно постъпване на съобщения по няколко измерителни канала.



Фиг. 3.4.

Основна характеристика на разгледаните методи е вероятността за загуба на информация. Тази задача може да се реши с използване на

апарата на теорията на масовото обслужване. В термините и в обхвата на тази теория всяка от разгледаните схеми може да се представи като модел на едноканална система за масово обслужване (СМО) [31]. Системите с използване на буферна памет и канални паметни (фиг. 3.2 и фиг. 3.4) могат да се опишат чрез СМО с очакване, а схемата с адаптивна комутация (фиг. 3.3) – СМО с откази.

От изложеното следва, че разглежданата задача се свежда до намиране на вероятностите на състоянията на СМО с краен брой места в опашката.

3.2 Пределната пропускателна способност на радиоканал на сензорна система

За определяне на потенциалните възможности на радиоканал от състава на сензорна мрежа ще използваме понятието пределна пропускателна способност. Съгласно Шенън [43] пределната пропускателна способност $C_{\text{пр}}$ на канала се определя като:

$$C_{\text{пр}} = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right); \text{ [bit/s]} \quad (3.14)$$

където $\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}$ – отношение сигнал/шум на входа на приемника; Δf – ширина на лентата на пропускане на канала.

Изразът (3.14) е справедлив при смущения, които представляват бял шум и средна мощност на сигнала P_c когато сигналът и шума са статистически независими и адитивни.

Ако шумът има спектрална плътност на мощността N_o^2 , изразът (3.14) ще добие вида:

$$C_{\text{пр}} = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{N_o^2 \Delta f} \right) \quad (3.15)$$

където $P_{\text{ш}} = N_o^2 \Delta f$ – средна мощност на шума на входа на приемника (канала).

Тъй като $\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \cong \alpha/M$ – отношение на средната мощност на сигнала и шума на входа на приемника (канала) и т.к. $M \cong \Delta f T_o$, съотношението (3.15) ще запишем като:

$$C_{\text{пр}} = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{\alpha^2}{M} \right) \quad (3.16)$$

При $\Delta f \rightarrow \infty$ или $M \rightarrow \infty$ от (3.16) се получава:

$$C_{\text{пр}} \cong \frac{P_c}{N_o^2} \log_2 e \quad (3.17)$$

От където пределното количество $I_{\text{пр}}$ предадена информация ще бъде:

$$I_{\text{пр}} = C_{\text{пр}} T = \log_2 e^{\alpha^2} = \alpha^2 \log_2 e = 1,44 \alpha^2 \text{ [bit]} \quad (3.18)$$

Тогава за средната скорост за предаване на информация по Гаусов канал при спектрална плътност на мощността на сигнала $S_c(\omega)$ и шума $S_{\text{ш}}(\omega)$ се получава [85]:

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^F \log_2 \left(1 + \frac{S_c(\omega)}{S_{\text{ш}}(\omega)} \right) d\omega. \quad (3.19)$$

3.3 Методи за обслужване на сензори в сензорни мрежи

3.3.1 Общи особености

Една от основните задачи за решаване в сензорните мрежи е свързана с организацията на обслужване на значително, по качество, разнообразни по предназначение сензори. Тази задача следва да се реши при следните особености:

- 1) Сензори функциониращи в условия на реално време, т.е. фиксирането на състоянията и обработката на сигналите от сензорите се извършва в реален мащаб от време.
- 2) Сензори за сигнализация. Сензори от подобен вид фиксират възникването на крайни критични състояния. Като правило имат две ясно различими състояния, едно от които съответства на наличие на нормално състояние. Тяхното обслужване не винаги изисква реакция в реално време.
- 3) Сензори с предварителна фиксация и натрупвания. Подобни сензори се явяват източници на предварително фиксирана или натрупана информация.

3.3.2. Обслужване на сензорите чрез тяхното сканиране

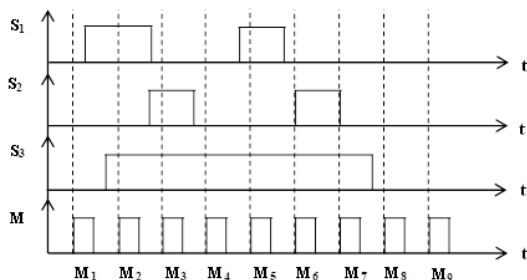
Същността на метода се състои в последователно разглеждане на предварително номерирани сензори. За целта се генерира последователност от времеви маркери M_i , отговарящи на условието $M_i - M_{i-1} = \tau = \text{const.}$ (3.24)

Във всеки един момент от време M_i се извършва запитване за състоянието на един, конкретен сензор.

С използване на указания метод е възможно обслужване на всякакъв тип сензори.

Времева диаграма, илюстрираща метода на обслужване на сензорите чрез тяхното сканиране е представена на фиг. 3.6.

Ако състоянието на сензора не се е изменило се изразходва някакво случайно време, продължителността на което е с експоненциален закон на разпределение с параметър β_0 ; $\beta_0 > \beta$.



Фиг. 3.6.

В тези условия коефициентът L на натоварване на сензорната мрежа с обслужване на сензорите ще бъде:

$$L = \frac{N}{\tau} \left(\frac{a}{\beta} + \frac{1-a}{\beta_o} \right) \quad (3.36)$$

3.3.3. Обслужване на сензор чрез прекъсвания

Същността на метода се състои в това, че когато даден сензор промени своето състояние се прекъсва работата на обслужващия го процесор и процесорът започва да обработва информацията от сензора. В този случай, ако състоянието на сензорите не се променя сензорна информация по мрежата не се предава. Самият процес на прекъсване се състои от две фази: обработка на прекъсването в случаен момент от време и приемане и обработване на получената сензорна информация.

Количеството заявки за прекъсване за времеви интервал t е:

$$m = \lambda t \quad (3.37)$$

Вероятността, че за времето t ще възникнат m заявки за обслужване на N сензора ще бъде:

$$P_N^m = C_N^m p^m(t) q^{N-m}(t) \quad (3.38)$$

където p – вероятност за възникване на заявка за предаване и обработване на сензорна информация; $q = 1 - p$.

Тъй като потокът на изменение на състоянието на датчиците е поасонов, то:

$$P_N^m = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t} \quad (3.39)$$

Интензивността на промяна на състоянието на един сензор, предвид на поасоновия характер на потока на изменение на състоянията на сензорите ще е:

$$l = \frac{\lambda}{N} \quad (3.40)$$

Тогава за времето t произволен сензор ще промени своето състояние $m_i, i = \overline{1, N}$ пъти, като:

$$m_i = \frac{\lambda}{N} \cdot t \quad (3.41)$$

Времето τ , в течение на което се обработва информацията от един сензор е

$$\tau = \frac{1}{\beta}$$

където β е параметър на експоненциалното разпределение на предаване и обработване на информацията от един сензор на сензорната мрежа.

3.3.4. Обслужване на сензорите с използване на алгоритъм с указателни променливи.

При алгоритъма за обслужване на сензорите с използване на семафорни указателни променливи множеството от сензори се разделя на G групи, на всяка от които съответства своя двоична указателна променлива $U_i, i = \overline{1, G}$. Променливата U_i приема стойност, съответстваща на логическа единица, ако поне един от сензорите в i -та група, $i = \overline{1, G}$ промени своето състояние. За целта се извършва постоянно сканиране на указателните променливи. Ако при сканирането на i -та, $i = \overline{1, G}$, група се окаже, че $U_i = 0$, се преминава към сканиране на $(i + 1)$ -та група чрез проверка на U_{i+1} . При условие, когато $U_i = 1$ се извършва анализ на съдържанието на всички сензори в i -та група. След обслужване на датчиците от i -а група се установява $U_i = 0$ и се пристъпва към проверка на променливата U_{i+1} на $(i + 1)$ -а, следваща група от сензори. Интензивността L на обслужване на сензорите ще се определи като:

$$L = G \left[a_z \bar{t}_z + \frac{1 - a_z \bar{t}_c}{\tau_c} \right], \quad (3.42)$$

където τ_c е време за сканиране на указателните променливи; a_z е групата, обслужвана от една променлива; \bar{t}_z – средна продължителност на обслужване на група от $\frac{G}{U}$ сензора, при условие, че поне един сензор в групата е променил своето състояние за времето τ_c ; \bar{t}_c – средно време на едно сканиране на непроменяща се указателна променлива.

3.3.5. Достъп на потребителите на обработена сензорна информация до ресурсите на сензорната мрежа.

Нека N потребители на сензорната мрежа имат достъп до център за обработване на сензорна информация. Необходимо е да се разпредели общото време T за достъп на тези потребители между отделните

потребители. Задава се функцията $f_i(T_i), i = \overline{1, N}$ на ефективно използване на i -ти потребител определеното за него време T_i .

След диференциране на F по всички T_i и λ и приравнявайки получените производни на нула се получава:

$$\begin{cases} \frac{df_i(T_i)}{dT_i} - \lambda = 0 \\ \sum_{i=1}^N T_i - T = 0 \end{cases} \quad (3.49)$$

Това означава максимизация на функцията на полза от вида:

$$S_i = f_i(T_i) - \lambda T_i, \quad (3.50)$$

където λ е със смисъл „цена“ на времето (полза на времето). Относителното разпределение на времето се определя чрез решаване на системата (3.49), което съответства на максимум $S_i, i = \overline{1, N}$.

$$\begin{cases} T_i(i+1) = T_i(t) + k_1 [\Delta f_i T(i) / \Delta T_i(t)] - \lambda(t), \\ \lambda(t+1) = \lambda(t) + k_2 \left[\sum_{i=1}^N T_i(t) - T \right]. \end{cases} \quad (3.51)$$

3.4. Изводи

1. Анализирана е енергийна ефективност на протоколите за маршрутизация. Показано е, че факторите, които влияят върху формирането на клъстери и главни възли е сложен проблем и се изискват допълнително изследвания, излизащи извън предмета на дисертацията.
2. Анализирани са методи за групиране на сензорната информация. Разработен е метод за адаптивна комуникация с канални буферни запомнящи устройства.
3. Предложена е структурна схема на управляващо устройство на модул за групиране на информационни потоци чрез адаптивна комуникация.
4. Разработен е аналитичен модул за определяне на характеристиките на методите за групиране на информацията в сензорните мрежи.
5. Предложен е математически апарат за определяне на пределната пропускателна способност на радиоканал на сензорна мрежа. Математическият апарат се основава на статистическият подход на Шенън.
6. Предложени са и са анализирани чрез разработени за целта математически съотношения методи за обслужване на сензорите в сензорните мрежи.

7. Разработен е метод за оптимизиране на достъпа на потребителите до ресурсите на сензорната мрежа. Методът се основава на адекватен за целта математически модел.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА. ЕФЕКТИВНОСТ НА ФУНКЦИОНИРАНЕ НА СЕНЗОРНИ МРЕЖИ

Четвърта глава е посветена на разработване на математически и симулационни модели за оценка и повишаване на ефективността на сензорни мрежи.

4.1 Същност на проблема ефективност на сензорните мрежи

Както ефективността на всяка една система, така и тази на сензорната мрежа, при равни други условия зависи от нейната структура. Многостранността на проблема функционална ефективност на сензорните мрежи, сложността на протичащите в тях физически и информационни процеси, слабата взаимовръзка между отделните проблеми по отношение на способите за тяхното решаване и пр. определят широкия диапазон на методите за оценка на ефективността на функциониране на разглеждания вид технически изделия. В тази връзка ще разгледаме някои основни подходи.

Критерии за управление на информационните потоци.

При търсене на оптимални режими на управление на непрекъснати информационни потоци критерий се явяват сумарните разходи F при управление за единица време, усреднени за „безкраен“ времеви интервал.

$$F(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{G(t)}{t},$$

където $G(t)$ – сумарни разходи за управление в течение на времето t .

Критерии за ефективно функциониране в условия на прекъсвания и откази.

Устойчивостта към прекъсвания и откази е едно от основните изисквания към сензорните системи и мрежи. Критерий за ефективност в случая се явява готовността за изпълняване на мрежата на възложените ѝ функции в условия на дефинирана продължителност от време. Математически това може да се представи като усреднен във времето, по всички цикли на работа, разходи за корекция за единица време:

$$F(T) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i(T)$$

където $G_i(T)$ са сумарните разходи за корекция в процеса на i -ти цикъл на работа.

4.2 Осъществимост на предаването на сензорна информация.

По радиоканал, използван за предаване на сензорна информация количеството предадена съобщения е случайна величина с поасонов закон на разпределение с интензивност λ_0 . Времето θ за предаване на едно съобщение е случайна величина с експоненциален закон на разпределение с параметър μ_0 .

P_0 е вероятността, че информационният канал (радиобхват) е свободен.

$$P = P_0 \frac{\mu_c}{\lambda_c + \mu_c} e^{-\frac{\lambda_c}{\mu_c}} \quad (4.11)$$

4.3 Осъществимост на обработката на информация в среда на сензорна система

Обработката на информацията по същество представлява изпълнение на голям брой (приблизително от 100 до 1000 и повече) оператори. По такъв начин, ако обработката на информацията се извършва от определен брой процесори времето за изпълнение на даден алгоритъм ще представлява случайна величина с нормален закон за разпределение. Времето в течение на което сензорната система осъществява обработка на информацията, представляваща дефиниран брой оператори ще е $F_c = \max\{t_i\}$. Тогава функцията на разпределение на t ще има вида:

$F(t) = \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t f(t_1; t_2) dt_1 dt_2$, ако подсистемата за обработване на информацията се състои от два паралелно работещи процесора.

Съгласно [21]:

$$M[F_c] = s(\eta) \sqrt{\sigma_1^2 - 2\mu_{12}\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} + \frac{M[T_1]}{2} + M[T_2]$$
$$D[F_c] = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2} + \frac{\sigma_1^2 - 2\mu_{12}\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}{2} \cdot [\eta^2 - 2\sigma^2(\eta)] + \frac{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}{2} \Phi(\eta)$$

4.4 Оценка на качеството на обработване и предаване на информация в среда на сензорна мрежа въз основа на времето за реализация на информационни процеси, с отчитане на надеждността на реализиращите ги средства.

Изпълнението на информационния процес в сензорните мрежи е съпроводено с въздействието на такива смущаващи фактори като: краткотрайни, самовъзстановяващи се откази (сбоеве), процеси на фазиране, устойчиви откази [58,59].

Предвид на това, че устойчивите откази в условия на сензорните мрежи са крайно редки събития, в преобладаващия брой от случаи не са обект на анализ. Тези въздействия могат да имат различна природа, но независимо от физическата си същност и място на проява водят до

загубва на информация и удължаване на времето за изпълнение на информационните процеси. На практика това се оценява чрез средното време $M[T]$ за изпълнение на информационните процеси и неговата дисперсия $D[T]$, за реализацията на които в условия на отсъствие на смушаващи въздействия се извършва за времето T^o .

4.4.1 Аналитични модели за определяне на времето за изпълнение на информационни процеси с отчитане на надеждността на реализиращите ги средства

4.4.1.1 Времето за изпълнение на информационни процеси, когато върху тях оказва влияние поток от един тип смушаващи въздействия.

Информационен процес с времето за изпълнение, на който в условия на отсъствие на сбоеве е равно на T^o . Върху изпълнението на информационния процес оказва влияние поток от кратковременни прекъсвания, количеството на които за определен времеви интервал е случайна величина с поасонов закон на разпределение с параметър λ_c . След прекратяване на смушаващото въздействие, което има продължителност τ_c на информационният процес започва да се изпълнява отначало.

Продължителността на информационният процес е случайна величина с експоненциален закон на разпределение с интензивност μ_c .

В указаните условия ще определим математическото очакване $M[T]$ на времето за изпълнение на информационния процес с отчитане на влиянието на възникващите прекъсвания.

$$M[T] = \frac{1 - e^{-\lambda_c T^o}}{e^{-\lambda_c T^o} - \mu_c} \left(T^o + \frac{1}{\mu_c} \right) + T^o$$

4.4.1.2 Време за изпълнение на информационни процеси, когато върху тях оказват влияние два типа смушаващи въздействия с различни статистически характеристики.

В процеса на изпълнение на информационния процес на него въздейства поток от кратковременни прекъсвания и поток от фазираня. Същите представляват поасоновите потоци, съответно с интензивности λ_c и λ_ϕ . Продължителността на горните събития са съответно τ_c и τ_ϕ , които представляват случайни величини с експоненциален закон на разпределение с параметри μ_c и μ_ϕ .

Ще определим математическото очакване $M[T]$ на времето за изпълнение на информационния процес.

Предвид на поасоновия характер на потоците от смушаващи въздействия общата им интензивност Λ ще бъде:

$$\Lambda = \lambda_c + \lambda_\phi \quad (4.18)$$

Средната продължителност $M[\tau]$ на смущаващите въздействия ще бъде:

$$M[\tau] = P_c \tau_c + P_\phi \tau_\phi \quad (4.19)$$

Тогава:

$$M[T] = T^o + \frac{Q}{P} \{T^o + M[\tau]\}, \quad (4.20)$$

където

$$P = e^{-\Lambda T^o} \quad (4.21)$$

$$Q = 1 - e^{-\Lambda T^o} \quad (4.22)$$

4.4.1.3. Време за изпълнение на информационни процеси при въздействие на поток от едно смущаващо въздействие от прекъсвания и повторно изпълнение само на разрушените участъци.

След прекратяването на съответно възниквало кратковременно прекъсване отново се изпълнява само този участък от информационния процес, който е бил „разрушен“.

В указаните условия трябва да се определи математическото очакване $M[T]$ на времето за изпълнение на информационния процес с отчитане на влиянието на възникващите кратковременни откази.

$$M[T] = T^o \left(1 + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right) \quad (4.23)$$

4.4.1.4 Време за изпълнение на информационен процес при разделянето му на участъци, в условия на въздействие на поток от самовъзстановяващи се откази.

В процеса на изпълнение на информационен процес върху него въздейства поток от кратковременни прекъсвания. Количеството на възникналите кратковременни прекъсвания за даден времеви интервал е случайна величина с поасонов закон на разпределение с параметър λ_c . Продължителността τ_c на всяко едно прекъсване е случайна величина с експоненциален закон на разпределение с интензивност μ_c .

Времето за изпълнение на информационния процес при отсъствие на смущаващи въздействия е T^o .

Изпълнението на информационния процес се разделя на участъци. При възникване на кратковременно прекъсване се изпълнява отначало не целият информационен процес, а само „разрушения“ участък.

В указаните условия трябва да се определи математическото очакване $M[T]$ на времето за изпълнение на информационния процес.

$$M[T] = \frac{R}{\lambda_c} \left[e^{\lambda_c \left(\frac{T^0}{R} + \tau_c \right)} - 1 \right] \quad (4.25)$$

4.4.1.5 Време за изпълнение на информационен процес подложен на въздействието на два типа смущаващи въздействия с различни статистически характеристики.

Количеството възникнали кратковременни прекъсвания за зададен времеви интервал са случайна величина с поасонов закон на разпределение с параметър λ_c , а количеството фазиране са също случайна величина с поасонов закон на разпределение с интензивност λ_ϕ . Продължителностите на тези въздействия τ_c и τ_ϕ са случайни величини с експоненциален закон на разпределение, съответно с интензивности μ_c и μ_ϕ .

При възникване на кратковременно прекъсване се изпълнява отново само разрушения участък, а при изискване за фазиране информационният процес се изпълнява отначало.

В указаните условия трябва да се определи математическото очакване $M[T]$ на изпълнение на информационния процес, а то е:

$$M[T] = T^0 \left(1 + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right) + \frac{q_\phi}{p_\phi} \left[\frac{\left(1 + \frac{\lambda_c}{\mu_c} \right) \left(1 - e^{-\lambda_\phi T^0} - \lambda_\phi T^0 e^{-\lambda_\phi T^0} \right)}{\lambda_\phi \left(1 - e^{-\lambda_\phi T^0} \right)} + \frac{1}{\mu_\phi} \right] \quad (4.27)$$

където:

$$q_\phi = 1 - e^{-\lambda_\phi T^0} \quad (4.28)$$

$$p_\phi = e^{-\lambda_\phi T^0} \quad (4.29)$$

4.5 Време за изпълнение на информационни процеси при различни закони на разпределение на два тип смущаващи въздействия

Разглежда се случай, когато при изпълнението на информационен процес на него въздействат кратковременни прекъсвания и необходими от фазиране. В „идеални“ условия информационния процес се изпълнява за времето T^0 . Продължителностите съответно $\tau_{сб}$ и τ_0 на всяко едно от горе посочените въздействия е случайна величина, с произволен закон на разпределение.

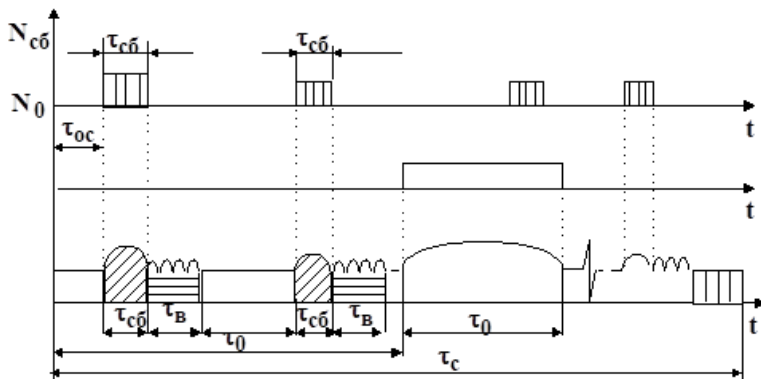
След възникване на необходимост от фазиране се осъществява фазиране на средствата, реализиращи процеса и същият след това се изпълнява отначало.

При кратковременно прекъсване, след самовъзстановяване на реализиращите процеса средства, изпълнението на информационния процес продължава от мястото на прекъсване.

Необходимо е да се определи математическото очакване на времето за изпълнение на информационния процес при така дефинираните условия. За целта се изпълнява метода на статистическото моделиране (метод на Монте-Карло).

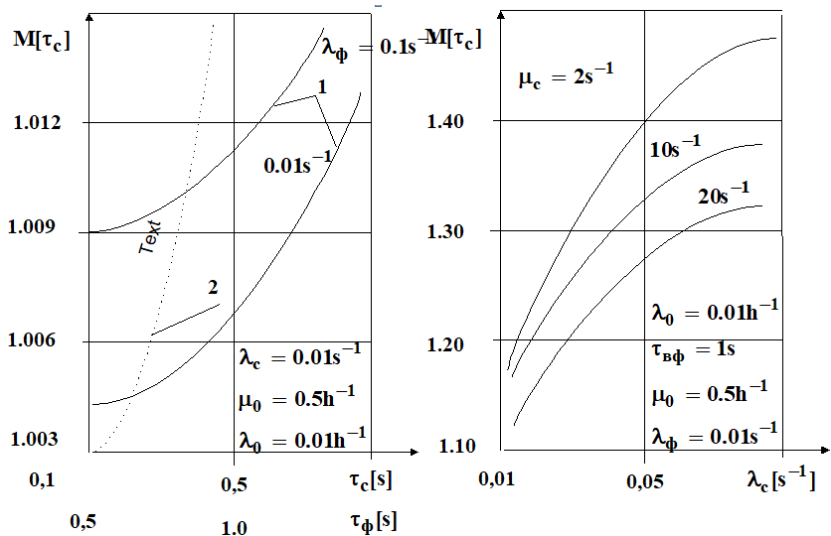
Математическото очакване на продължителността на изпълнение на информационния процес ще се определи като:

$$M[\tau_{сб}] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i \quad (4.30)$$



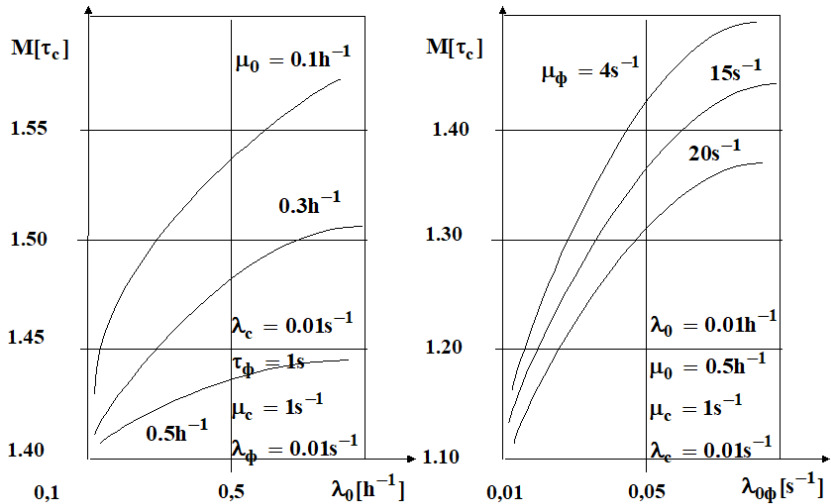
Фиг. 4.1

Вревата диаграма на изпълнение на информационния процес е показана на фиг. 4.1, където $\tau_{сб}$ – продължителност на кратковременното прекъсване; τ_o – продължителност на процеса на фазиране; $\tau_{в}$ – продължителност на възстановяване след самоотстраняване на възникналия сбой.



Фиг. 4.3

Фиг. 4.4



Фиг. 4.5

Фиг. 4.6

- Анализът на получените резултати показва, че:
- при логаритмично-нормален закон на разпределение на продължителността на възстановяване след кратковременни

прекъсвания и на продължителността на процесите на фазиране най-съществено е влиянието на кратковременните прекъсвания;

- при изменение на интензивността на кратковременните прекъсвания в интервала $0,01 - 0,1 S^{-1}$ и при $\tau_{c6} = 0,1 - 0,5 S$ времето за изпълнение на информационния процес се увеличава с 25%;
- увеличаване на времето за изпълнение на информационния процес с около 25% се наблюдава и при интензивности на възникване на фазиране $\lambda_o = 0,5 S^{-1}$ и продължителност на фазирането $\tau_o = 1 S$.

4.6 Изводи

1. Анализирани са съществуващи подходи за оценка на функционалната ефективност от използването на сензорни мрежи. Разкрити са техни слаби черти и се предлагат подходи за тяхното преодоляване.
2. Предложен е метод, основаващ се на съответен математически модел, за определяне на осъществимостта на обработката на информация в среда на сензорна мрежа.
3. Предложен е подход за оценка на качеството на обработване на информация в среда на сензорна мрежа чрез определяне на времето за реализация на протичащи в нея информационни процеси, с отчитане на надеждността на реализиращите ги средства.
4. Разработени са аналитични модели за определяне на времето за изпълнение на информационни процеси в среда на сензорни мрежи с отчитане на надеждността на реализиращите ги средства.
5. Разработен е статистически модел за определяне на времето за изпълнение на информационни процеси в среда на сензорни мрежи с отчитане на надеждността на реализиращите ги средства и произволен закон на разпределение на смущаващите въздействия.
6. Чрез използване на разработения статистически модел е доказана адекватността на предложените аналитични модели за определяне на времето за изпълнение на информационни процеси в среда на сензорни мрежи с отчитане на надеждността на реализиращите ги средства.

III. НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРОНОСИ В ДИСЕРТАЦИЯТА

Дисертацията представлява изследване на процеси в сензорните мрежи и по своята същност има научно-приложен и приложен характер. Основните резултати получени в дисертацията могат да бъдат формулирани чрез следните приноси:

Научно-приложни приноси:

1. Предложен е подход за получаване, предаване и използване на сензорна информация. Подходът описва процесите на получаване, обработване и представяне на сензорна информация.
2. Разработен е метод за моделиране на процесите на контрол и управление на обекти чрез сензорни мрежи.
3. Разработен е метод за групиране на сензорна информация, съпроводен с предложени за целта структурни схеми на устройства за извършване на това.
4. Разработени са модели на енергийни и информационни характеристики на процесите на обмен на сензорна информация в радиосреда.
5. Разработени са методи за оценка на качеството на обработване на сензорна информация.

Приложни приноси:

1. Разработени са аналитични и статистически модели, позволяващи да се определи надеждността на обработване и предаване на сензорна информация чрез определяне на времето за изпълнение на съответните информационни процеси с отчитане на надеждността на реализиращите ги средства.
2. Посочени са основните проблеми на сигурността на БСМ.

IV. СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА:

1. Стоянова, Т., Ал. Милев. Сравнителен анализ на алгоритми за рутирание в безжични сензорни мрежи. В: Сборник научни трудове на Научна конференция МАТТЕХ 2012, Шумен, Том 2, стр. 36-41.
2. Стоянова, Т., Ал. Милев. Сигурност в безжичните сензорни мрежи. В: UNITECH 2016, Габрово, Том 2, стр. 70-74.
3. Стоянова, Т., Ал. Милев. Обзор върху подобрените версии на LEACH. В: Сборник научни трудове на Научна конференция МАТТЕХ 2016, Шумен, Том 1, стр. 170-177.
4. Стоянова, Т. Класификация на рутиращите протоколи в БСМ. В: Годишник на ШУ, 2017, том XVIII С, стр. 137-149.