



НАЦИОНАЛЕН ВОЕНЕН УНИВЕРСИТЕТ „ВАСИЛ ЛЕВСКИ”

ФАКУЛТЕТ „АРТИЛЕРИЯ, ПВО И КИС”
9713 гр. Шумен, ул. „Карел Шкорпил” №1
телефон: (054)801 040; тел.факс:(054) 877 463; email:
decanat@aadcf.nvu.bg

ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД

НА ТЕМА:

**„ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ
НА СОФТУЕРНО ДЕФИНИРАНА РАДИОСИСТЕМА ЗА
ДИНАМИЧЕН ДОСТЪП ДО ЧЕСТОТНИТЕ РЕСУРСИ“**

**ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНА И НАУЧНА СТЕПЕН
„ДОКТОР“**

**ОБЛАСТ НА ВИСШЕТО ОБРАЗОВАНИЕ
5. „ТЕХНИЧЕСКИ НАУКИ“,
ПРОФЕСИОНАЛНО НАПРАВЛЕНИЕ
5.3. „КОМУНИКАЦИОННА И КОМПЮТЪРНА ТЕХНИКА“,
НАУЧНА СПЕЦИАЛНОСТ
02.07.20. „КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ И СИСТЕМИ“**

АВТОР: К-Н ИНЖ. МИРОСЛАВ ГЕОРГИЕВ НЕДЕЛЧЕВ

**ШУМЕН
2023**

Съдържание:

Съдържание:	2
1. Научна новост на дисертационния труд.....	6
2. Цел и задачи на дисертационния труд.....	6
3. Структура на дисертационния труд.....	7
4. Научно-методическа и педагогическа полезност.....	8
1. Предизвикателства пред безжичните радиокомуникационни системи и технологични решения за споделено използване на радиочестотния спектър	10
1.1. Подходи за ефективно използване на електромагнитния спектър	11
1.1.1. Технологии за множествен достъп.....	11
1.1.2. Усъвършенствани антенни системи.....	11
1.1.3. Широколентови радиотехнологии	12
1.1.4. Назначаване на честоти WAPECS.....	12
1.1.5. Технологии за динамичен достъп до спектъра.	13
1.2. Подходи за изграждане на софтуерни архитектури за автоматизирано следене и управление на радиочестотния спектър.....	15
1.2.1. Функционални изисквания към софтуерната архитектура.....	16
1.2.2. Софтуер за наблюдение и оптимизиране използването на спектъра базиран на оценка ъглите на постъпване	18
1.3. Анализ на създаването, развитието и областите на приложение на софтуерното дефинирано радио в безжичните комуникационни системи, като средство за споделяне на честотни ресурси.....	23
1.3.1. Възникване на SDR	23
1.3.2. Определения за SDR	25
<i>Определение на IEEE:</i>	25

<i>Определение на FCC:</i>	25
<i>Wireless innovation forum (SDR Forum)</i>	25
1.4. Етапи на развитие на SDR.....	25
1.5. Подходи за решаване на задачата за динамичен достъп до спектъра	28
1.5.1. Теория на игрите	29
1.5.2. Линейното програмиране.	31
1.5.3. Теория на графите	32
1.6. Платформи за развитие на SDR	37
1.6.1. SPEAKeasy	37
1.6.2. GNU радио	37
1.6.3. Комуникации от следващо поколение (neXt Generation, XG).....	37
1.6.4. Софтуерна комуникационна архитектура (SCA).....	38
1.7. Изводи по глава първа	39
2. Методите за следене и техники за откриване на честотни ресурси	40
2.1. Следене на честотните ресурси	40
2.1.1. Следене на границата на интерференция	41
2.1.2. Следене на спектъра в многопотребителски мрежи.....	41
2.1.3. Оптимизиране на периода на следене на спектъра в многоканални мрежи	42
2.2. Управление на спектъра	43
2.3. Вземане на решение за достъп до радиочестотния спектър.....	43
2.4. Въпроси за мобилността на спектъра.....	49
2.5. Динамичен достъп до спектъра.	50
2.5.1. Модели за споделяне на спектър.....	50
2.5.2. Изисквания при споделяне на ресурси	52

1) Определяне (разпознаване) въз основа на измерване.....	53
2) Използване на база данни за географски местоположения.....	54
3) Използване на маяци	54
2.5.3. Следене на спектъра в когнитивните мрежи.....	54
2.6. Подход за компютърно подпомагано предоставяне на честотни канали	60
2.6.1. Рискове и ползи от компютърно подпомаганото управление на спектъра	60
2.6.2. Изисквания и формат на информацията съхранявана в бази от данни	62
2.6.3. Вид на данните за управление на спектъра.....	63
2.6.4. Топология и свързаност.....	64
2.6.5. Алгоритми за назначаване на честоти и канали	65
2.7. Изводи по глава втора.....	73
3. Безжични системи със споделено използване на спектъра.....	74
3.1. Стандарти за споделено използване на честотни ресурси в нелицензирания диапазон	74
3.1.1. Безжична локална мрежа по стандарт IEEE 802.11	75
3.1.2. Структурата на канала за предаване на данни, базирана на OFDMA. .	78
3.1.3. Функции предоставяни от OFDMA в IEEE 802.11 ах.....	79
1) Ресурсно разпределяне.....	79
2) Пространствено разделяне:.....	81
3) Усъвършенствани антенни системи	81
3.1.4. Множествен достъп с разпознаване на носещата и избягване на колизии (CSMA/CD).....	83
3.1.5. RTS/CTS (Заявка за изпращане/ Изчистване за изпращане)	84
3.1.6. Кратко междукадрово пространство (SIFS).....	85

3.2. Подходи за определяне на местоположението на безжични потребители .	86
3.2.1. Класификация и изисквания към алгоритмите за определяне на местоположението	87
1) Класификация на алгоритмите за локализация	87
2) Изисквания към алгоритмите за локализация	90
3.2.2. Методи за оценка на местоположението	90
3.2.3. Подход за приложение на информацията за пространственото разположение на потребителите за подобряване на използването на електромагнитния спектър	91
3.3. Изводи по глава трета	95
4. Подходи за използване на получената информация от работната среда за реализиране на софтуерно дефинирана система с динамично използване на ресурси	96
4.1. Алгоритъм за приложение на информацията за пространственото разположение на потребителите в процеса на автоматизирано управление на софтуерно дефинирана радио-комуникационна мрежа, реализирана чрез ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране	97
4.2. Основни свойства на сложните сигнали, използвани при изграждането на радиокомуникационни мрежи с висока шумозащитеност	109
4.3. Компютърна система за анализ и синтез на комплементарни сигнали.	114
4.4. Подход за реализиране на софтуерно дефинирани радио-комуникационни системи чрез ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране и сложни комплементарни сигнали	122
4.5. Изводи по глава IV	128
5. Литература	132

УВОД

1. Научна новост на дисертационния труд

Научната новост на дисертационния труд се състои в:

- Анализ на развитието на софтуерно дефинираните радиосистеми, позволяващи по-ефективно използване на радиочестотните ресурси.
- Анализ на методите за следене на спектъра и дефиниране на възможните решенията за построение на системата за динамичен достъп до честотните ресурси.
- Изследване на свойствата и характеристиките на софтуерно дефинираните радиосистеми за изграждане на система за динамичен достъп до честотни ресурси базирана на ортогонално разделяне и мултиплексиране.
- Анализ на софтуерно дефинираните системи, като средство за смекчаване на проблема с честотното разпределение и гъвкаво му използване.

Обект на изследването са софтуерно дефинираните радиосистеми, които позволяват да се използват по-ефективно онези части от радиоспектъра, които са неизползвани или слабо натоварени.

Предмет на изследването са възможностите на софтуерно дефинираните радиосистеми и мрежи за динамичен достъп, с оглед подобряване на използваемостта на радиоспектъра.

2. Цел и задачи на дисертационния труд

Настоящият дисертационен труд има за цел извършването на анализ на софтуерно дефинираните радиосистеми и синтез на алгоритми за сигурен обмен на информация посредством използване на сложни сигнали и получената информация за пространственото разположение на потребителите за осигуряване на динамичен достъп до честотните ресурси.

За постигането на поставената цел е необходимо да се решат следните задачи:

1. Анализ на развитието на софтуерно дефинираните безжични комуникационни мрежи и системи, с цел откриване на възможности за подобряването им и създаването на адаптивни, високоефективни комуникационни мрежи.

2. Сравнителен анализ на модели за достъп до радио средата и алгоритми за вземане на решение, с цел по-ефективно управление на спектъра, при постоянно променящата се електромагнитна обстановка.

3. Анализ на методите за следене на спектъра в съществуващите радиокомуникационни системи и дефиниране на възможните решения за построение на системата за динамичен достъп до честотните ресурси.

4. Анализ на методите за определяне на местоположение на източниците на електромагнитна енергия в смесена многопотребителска среда.

5. Синтез на алгоритми за динамичен достъп до честотните ресурси.

6. Изследване на свойствата и характеристиките на сложните сигнали и интегрирането им в софтуерно дефинираните радиосистеми.

Решаването на горните задачи дава възможност за подобряване на степента на използване на радиочестотния спектър в комуникационно-информационните системи.

3. Структура на дисертационния труд

Настоящият дисертационен труд се състои от увод, четири глави и библиография.

В увода е обоснована актуалността на темата на дисертационния труд, формулирана е целта и са определени задачите на изследването, обекта и предмета на изследване.

В първа глава са анализирани и представени съвременните концепции за подобряване използваемостта на честотните ресурси, софтуерните

архитектури за автоматизирано следене и съществуващите проекти за софтуерно дефинирано радио. Представена е архитектурата и изследванията за разработване и създаване на единна унифицирана платформа, която да отговаря на изискванията, предявявани към софтуерно дефинираните радиосистеми и способности за осигуряване на ефективното използване на радиочестотния спектър. Описани са проблемите при реализиране и внедряване на платформи в сложни самонастройващи се радиомрежи и предизвикателствата при контрола над реконфигураемостта.

Във втора глава са представени методите и техниките за следене на честотни ресурси. Следене на границата на интерференция и възможности за оптимизиране на цялостния процес по откриване на честотни ресурси. Представени са моделите за споделяне и изискванията при споделяне на честотни ресурси.

Представен е подход за компютърно подпомагано предоставяне на честотни канали, възможните рискове и изисквания към формата на данните за споделяне.

В трета глава са представени подходите за изграждане на система, базирана на парадигмата за споделяне на ресурси, подходите за определяне на местоположение, като съществен елемент за определяне на изходящата мощност при излъчване. Представен е подход за изграждане на сигурни комуникации чрез комплементарни сигнали.

В четвърта глава са представени подходи за използване на получената информация за пространствено разположение на потребители за реализиране на автоматизирано управление на софтуерно дефинирана радиокомуникационна мрежа за динамичен достъп до честотните ресурси, чрез ортогонално разделяне и мултиплексиране. Предложен е и подход за реализиране на софтуерно дефинирани радиокомуникационни системи чрез ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране, посредством използване на сложни комплементарни сигнали.

4. Научно-методическа и педагогическа полезност

Научно-методическата и педагогическа полезност се изразява в достъпното и методически последователно изследване на проблемите, довеждане на резултатите до инженерна реализация, използване на получените резултати като база за по-нататъшно усъвършенстване на съвременните комуникационни системи.

Глава 1. Съвременни направления за повишаване на ефективността при използване на спектъра и внедряване на **НОВИ ТЕХНОЛОГИИ**

1. Предизвикателства пред безжичните радиокомуникационни системи и технологични решения за споделено използване на радиочестотния спектър

Съвременните безжични технологии намират широко приложение в производството, автономните превозни средства, системи с разпределен контрол, беспилотни летателни апарати, системи за комуникация и оповестяване, гражданска защита, полиция, системи за радионавигация, контрол, спасяване и други. Те имат редица предимства спрямо жичните системи, като по-малък риск от прекъсване на кабели, занижени изисквания към инфраструктурата, опростено осъвременяване, редуциране на конекторните връзки, подобрена физическа мобилност на потребителите, по-бързо изграждане и мащабиране на комуникационната инфраструктура, лесно добавяне на нови потребители и др.. През последните години се наблюдава постоянно нарастване на броя и вида безжични устройства. Например към индустриалните мрежи, където изискванията за надеждност са завишени, постоянно се надграждат с приложения за контрол и мониторинг, добавят се нови сензорни и интелигентни мрежи. Към това се добавят военни [22] и граждански [91] потребителски безжични, клетъчни и сателитни мрежи.

От една страна е видно как значимостта на различни видове безжични електронни съобщителни услуги нараства при относително еднакви възможности за осигуряване с ограничения природен ресурс – електромагнитен спектър.

От друга страна спектърът е обект на национално [13] и международно [41],[47] регулиране, чрез определяне на части [38] от него за конкретни услуги или потребители, които са оторизирани да го използват за определен период от време, за дадена географска област. Регулирането е наложително и само по себе си подобрява социалните ползи, осигурява безопасност и смекчава донякъде проблема с интерференцията и недопускане на нежелани емисии на електромагнитна енергия.

1.1. Подходи за ефективно използване на електромагнитния спектър

Строгото регулиране и ограничаване на достъпа до подходящи честоти представлява ограничение за навлизането и използването на нови технологии. Това налага да се търсят други подходи за съвместно съществуване, по-ефективно използване на различни безжични системи при запазване на изискванията за качество на услугите (QoS), с което да се постигне максимално уплътняване на радиочестотния спектър.

Към тези подходи се отнасят [3],[107]:

1.1.1. Технологии за множествен достъп.

➤ Кодово разделяне за множествен достъп (CDMA), е технология, при която всеки информационен бит от предаваните данни, се сумира по модул 2 със специална разширяваща функция (разширяващ сигнал), представляваща поток от елементарни импулси с малка продължителност, наречени чипове.

➤ Метод за ортогонално мултиплексиране с честотно разделяне (OFDM), позволяващ кодиране на данни на множество подносещи честоти, използван като метод за множествен достъп в LTE, WiMAX(802.16), 802.11.ах за смекчаване на проблема с многолъчевото разпространение.

1.1.2. Усъвършенствани антенни системи.

Множествен вход и множество изходи (MIMO) е антенна технология за безжични комуникации, при която се използват множество антени, както в предавателя, така и в приемника, за подобряване на комуникационната ефективност. Обект на изследване са и т. нар. интелигентни антени, които излъчват енергия само в желаната посока, докато обикновените антени излъчват енергия и в нежелани посоки, което води до загуба на енергия. Следователно е необходима по-малка мощност за излъчване на базовата станция, намаляват нивата на предавана мощност, което предполага и намаляване на интерференцията спрямо други потребители [113]. Интелигентните антени използват набор от излъчващи елементи, подредени в решетка [67].

1.1.3. Широколентови радиотехнологии

Безжична технология за предаване на големи обеми от цифрови данни чрез широкоспектърни честотни ленти (по-големи от 500MHz) с много ниска мощност, по-малка от 0,5 миливата на разстояние до 10 метра [47]. Широколентовото излъчване е аналогично на Bluetooth – технология за предаване на информация на къси разстояния, но подобрява значително скоростта и намалява смущения в други безжични системи. Намира приложение при стандартите за безжични комуникации по стандарт IEEE 802.11, IEEE 802.16 за малки радиуси на покритие.

1.1.4. Назначаване на честоти WAPECS

Wireless Access Policy for Electronic Communications Services – е политика, предложена в опит да се ограничат смущенията и позволява конкуренция между отделните радиоинфраструктури за заемане на конкретни ленти, основаващи се на присвояване на честотни блокове, вместо метода за присвояване на канали при неутрални изисквания към предоставяните услуги и използваната технология [38].

Отделни честотни поддиапазони, които са обект на WAPECS, обхващат честоти от 470 MHz до 3.8 GHz, при което се осигурява обща честотна лента от 1350 MHz. Целта е осигуряване на широк диапазон от услуги за 802.11, LTE, 5G, безжична телевизия в крайградски райони с високо качество [28],[40],[41],[60],[82],[83].

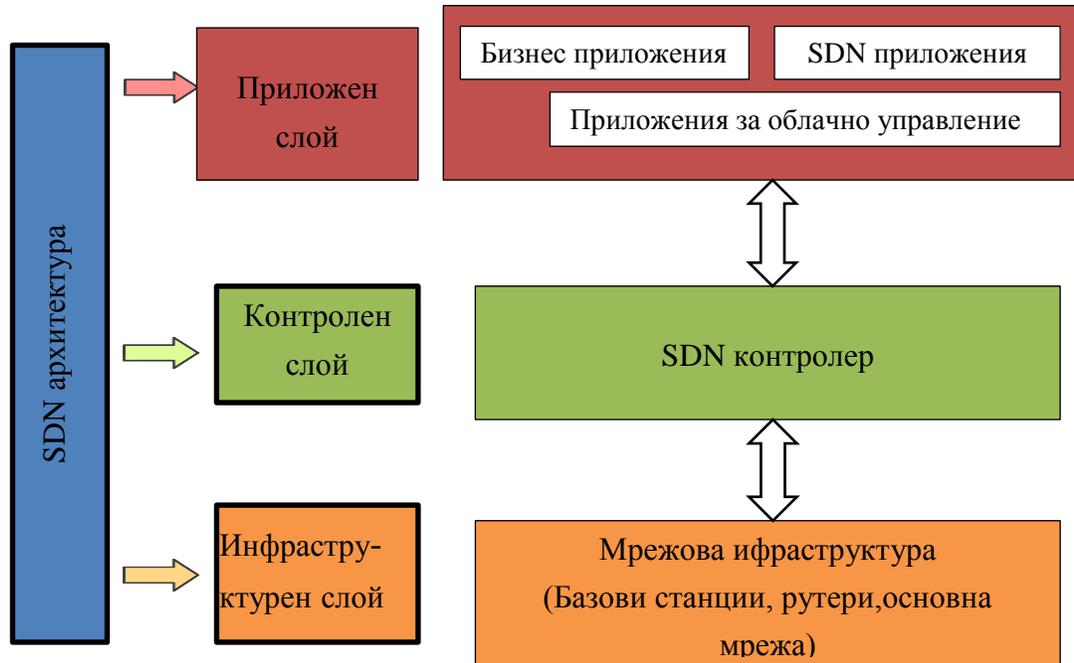
1.1.5. Технологии за динамичен достъп до спектъра.

За да се подобри ефективността на спектъра, се допуска съвместно съществуване и използване [105] на радиосистемите в един и същ честотен диапазон, чрез парадигмата за динамичен достъп до спектъра. Под динамично управление на спектъра се разбира способността на радиооборудването автономно и динамично да оптимизира своите основни параметри с оглед осигуряване на възможности за планиране, присвояване и разпределяне на честотните ресурси. Ефективното използване на спектъра [108] се постига, когато едно устройство заема приоритетно ресурсите или ограничава емисиите до определено допустимо ниво или внасят минимални смущения в работата на основните ползватели.

Софтуерно дефинираните радиосистеми (SDR) и когнитивно радио (CR) предоставят технологично решение [81] за прилагане на модели за споделен и динамичен достъп и представляват допълнителен инструмент за гъвкаво спектрално и енергоефективно използване на електромагнитния спектър [1],[6],[26],[51],[99],[100].

Софтуерно дефинираните радиосистеми (SDR) и когнитивно радио (CR) обикновено се използват в първите два слоя на отворения модел (OSI) [106] и е възможно да се надграждат със софтуерно дефинирани мрежи (SDN) [109], които касаят по – горните слоеве на отворения модел (OSI).

Такава архитектура разделя мрежата в три различни слоя, както е показано на фиг.1.



Фигура - 1 Софтуерно дефинирана мрежова архитектура [100]

➤ Приложен слой – осигурява хостинг на приложенията и комуникира с SDN контролера, чрез стандартизиран програмно-приложен интерфейс (API). Това осигурява възможност за разработване на софтуерни приложения [87], без това да оказва влияние върху работата на основната мрежа.

➤ Контролен слой – тъй като контролната равнина е разделена от тази за данни, то SDN контролерът трябва да е разположен в контролния слой и да комуникира с приложния слой и контролира пътя за данни. SDN контролерът създава и представя логическа карта на мрежата за ефективно вземане на решения от инсталираните приложения в приложения слой.

➤ Инфраструктурен слой – този слой включва мрежовия хардуер (основна мрежа, базови станции, комутатори, рутери и т.н.), който реализира пътя за данни и препраща генерирания трафик. Посредством този слой е възможна виртуализация и облачно ориентирана програмируема среда.

За пълно постигане на такава архитектура в клетъчните мрежи следва да са приложими основните принципи на SDN [100], сред които:

- директно програмиране – осигуряване на възможности за директно програмно управление на интелигентните SDN контролери в мрежата за данни и управление;
- отвореност – осигуряване на възможности на различни производители да управляват оборудването;
- гъвкавост – способност за осигуряване на динамично реконфигуриране, управление и оптимизация на клетъчна мрежа от страна на операторите, въз основа на променящия се трафик или характеристики на оборудването предвидено за внедряване.

1.2. Подходи за изграждане на софтуерни архитектури за автоматизирано следене и управление на радиочестотния спектър

Необходимостта от използване на компютърно подпомагани техники за управление и мониторинг на радиочестотния спектър е осъзната и възприета от повечето национални регулаторни органи още през 70-те години на XX в.

Развитието на микропроцесорната и полупроводникова техника доведе до значително понижаване на цената на безжичните радиоелектронни средства и допринесе за тяхната широка употреба. Концепциите за „умен дом“ и IoT още повече утежняват проблема с използване на радиочестотния спектър.

От друга страна строгото регулиране и ограничаване на достъпа до подходящи честоти представлява ограничение за навлизането и използването на нови технологии.

Често при издаване на лицензи и разрешителни за използване на подходящите за безжична комуникация честотни ленти, възникват въпроси относно натовареността на съответната лента в конкретен географски район; ефекта от разполагане на нови източници [91] на електромагнитна енергия и все по-често използваните еднократни или многократни импулсни електромагнитни въздействия за борба с безпилотни летателни апарати [22], вида на терена, нивата на емисиите и нивата на смущения, икономическият ефект от това и други.

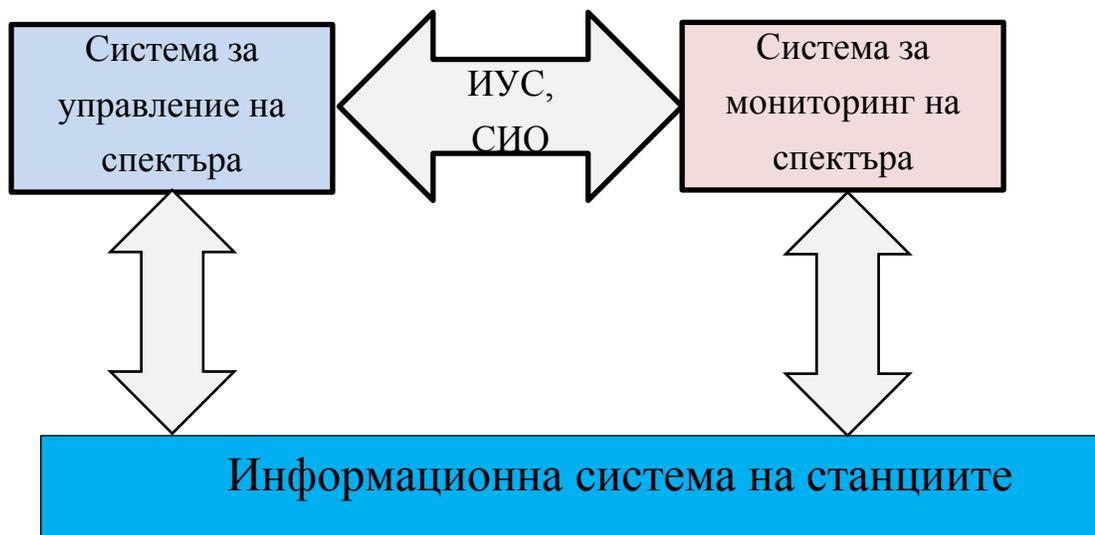
Съществуващите софтуерни архитектури за автоматизирано следене и управление на радиочестотния спектър трябва да имат структура и функционални възможности, които да отговарят на съвременните концепции за динамичен достъп до спектъра.

1.2.1. Функционални изисквания към софтуерната архитектура

С оглед тяхното надграждане и в съответствие с препоръките на ITU-R към тях се описват и изисквания към функционалността на съвместимите бази данни, на които трябва да отговарят. Такива могат да са [110]:

- отдалечен достъп до системни ресурси;
- автоматично откриване на нарушения;
- назначаване на честоти и лицензиране;
- интегриране на инструмент(и) за подпомагане на планирането и внедряването;
- автоматизирано измерване на параметрите на сигнали;
- автоматизирани измервания на заетостта и/или определяне на посока;
- автоматизиран обмен на данни;
- поддържане на графичен интерфейс.

Общ вид на софтуерна архитектура за автоматизирано следене и управление на радиочестотния спектър е показан на фигура 2.



Фигура - 2 Обща софтуерна архитектура за изграждане на система за управление на спектъра ITU-R [88]

- **Система за информационен обмен (СИО)** – определя структура на данните и вида на командите към системата за наблюдение чрез системата за управление.
- **Интерфейс за управление на спектъра (ИУС)** – осигурява цялата структура от данни и команди, за да позволи на системата за наблюдение да има достъп до данни, съхранявани в базата данни на системата за управление на спектъра.
- **Система за управление на спектъра** – поради отворения интерфейс осигурява възможност за интегриране на всяка отделна система за управление на спектъра.
- **Система за наблюдение** – обслужва всички задачи за измерване, необходими за управлението на спектъра и предоставя оптимално използване на ограничения честотния спектър.
- **Информационна система на станциите (ИСС)** – компонент към информационната система за предоставяне на актуална информация относно

текущото състояние на станциите за наблюдение. Измерват се аналогови, цифрови и импулсни сигнали и се различават следните режими:

□ **Автоматично измерване** – осигурява постоянно или циклично измерване на зададен набор от параметри в определена част от деня или годината.

Автоматично разпознава отклонение от зададени диапазони и възможност за задействане на аларма и последващо измерване с оборудване, предоставящо по-голяма точност.

- **Интерактивен режим на измерване** – режимът на интерактивно измерване се използва за получаване на обща карта с възможности за анализ на сигнали, определяне местоположението на предаватели, измерване на покритието в дадена точка, откриване на нарушения и идентифициране на електромагнитни емисии.

Възможен е и статистически анализ на заетостта на честотните ленти и канали, стойности на измерването, кои потребители използват най-често дадена лента и др.

- **Режим за определяне на местоположението** – използва различни техники (AoA, TDOA) за точно намиране на предавател [42].

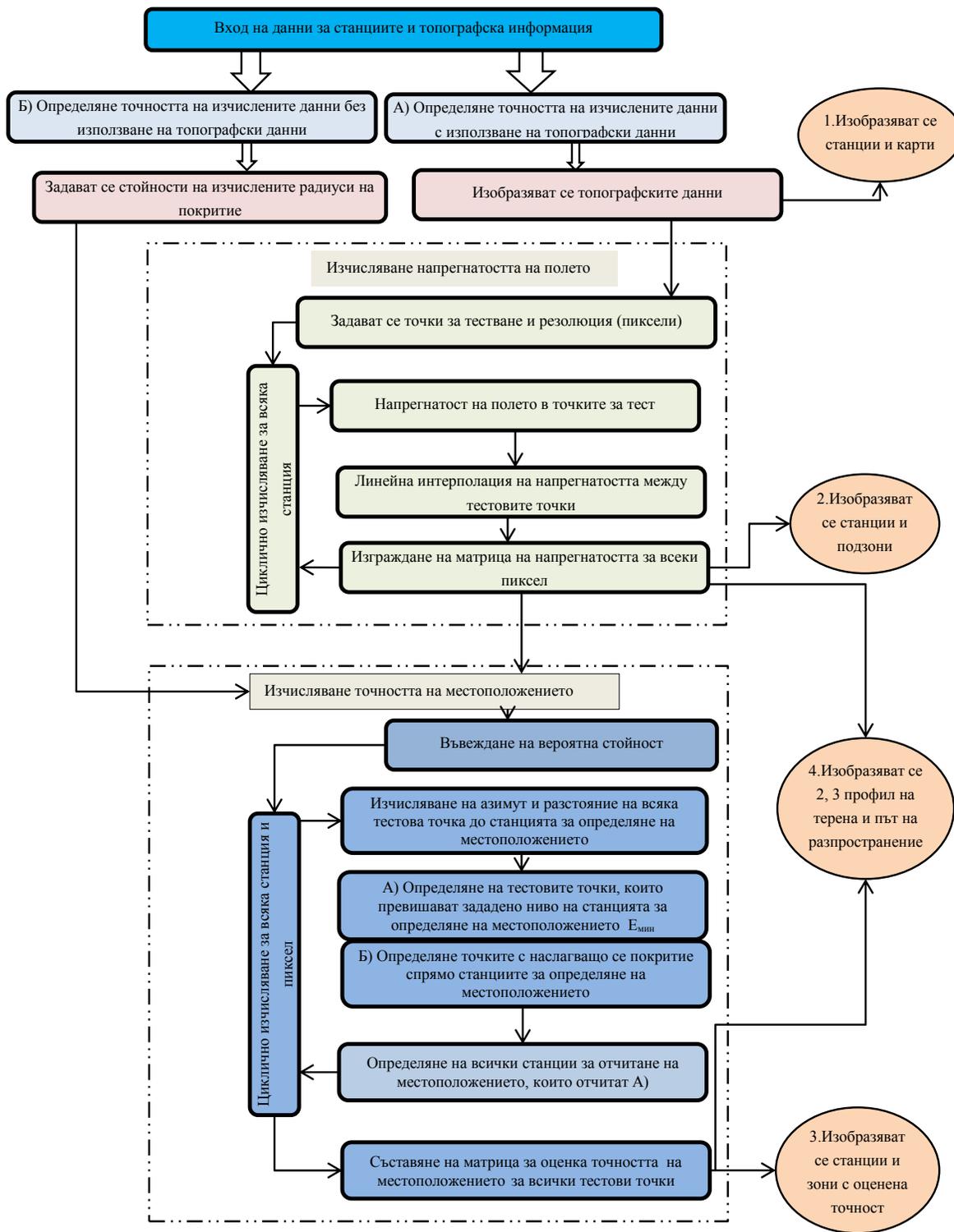
1.2.2. Софтуер за наблюдение и оптимизиране използването на спектъра базиран на оценка ъглите на постъпване

Софтуер за наблюдение и оптимизиране използването на спектъра базиран на оценка ъглите на постъпване първоначално е предложен през 2005г. [96] и подобрен през 2012г. [95]. Аналогични разработки има в почти всички европейски, азиатски и американски държави [70],[75],[78],[79], включително и софтуерни продукти за свободно използване [80] в развиващите се държави.

Такъв тип софтуер позволява създаване на карти на покритието за УКВ мобилни потребители, определяне на условията на взаимодействие с фиксирани станции и:

- точна количествена информация за реалната електромагнитна обстановка;
- измерване на параметрите на средата и определяне на местоположение чрез триангулация;
- изобразяване на подробни карти на мониторинговото покритие при различни честоти в диапазона 30 – 3 000 MHz;
- оценка на различни варианти и ползите от надграждане на системата за мониторинг (чувствителност на приемниците, методите за определяне на местоположение, промяна на височини на антените);
- да се идентифицират области, в които една или друга функция за наблюдение не допринася значително за цялостния мониторинг и възможностите за използване в друга зона;
- да се разработват технически и икономически обосновани планове за надграждане и разширяване на съществуващите мрежи за наблюдение;
- да се оптимизира работата на мобилни станции при планиране на техния маршрут на базата на данни от предишни наблюдения.

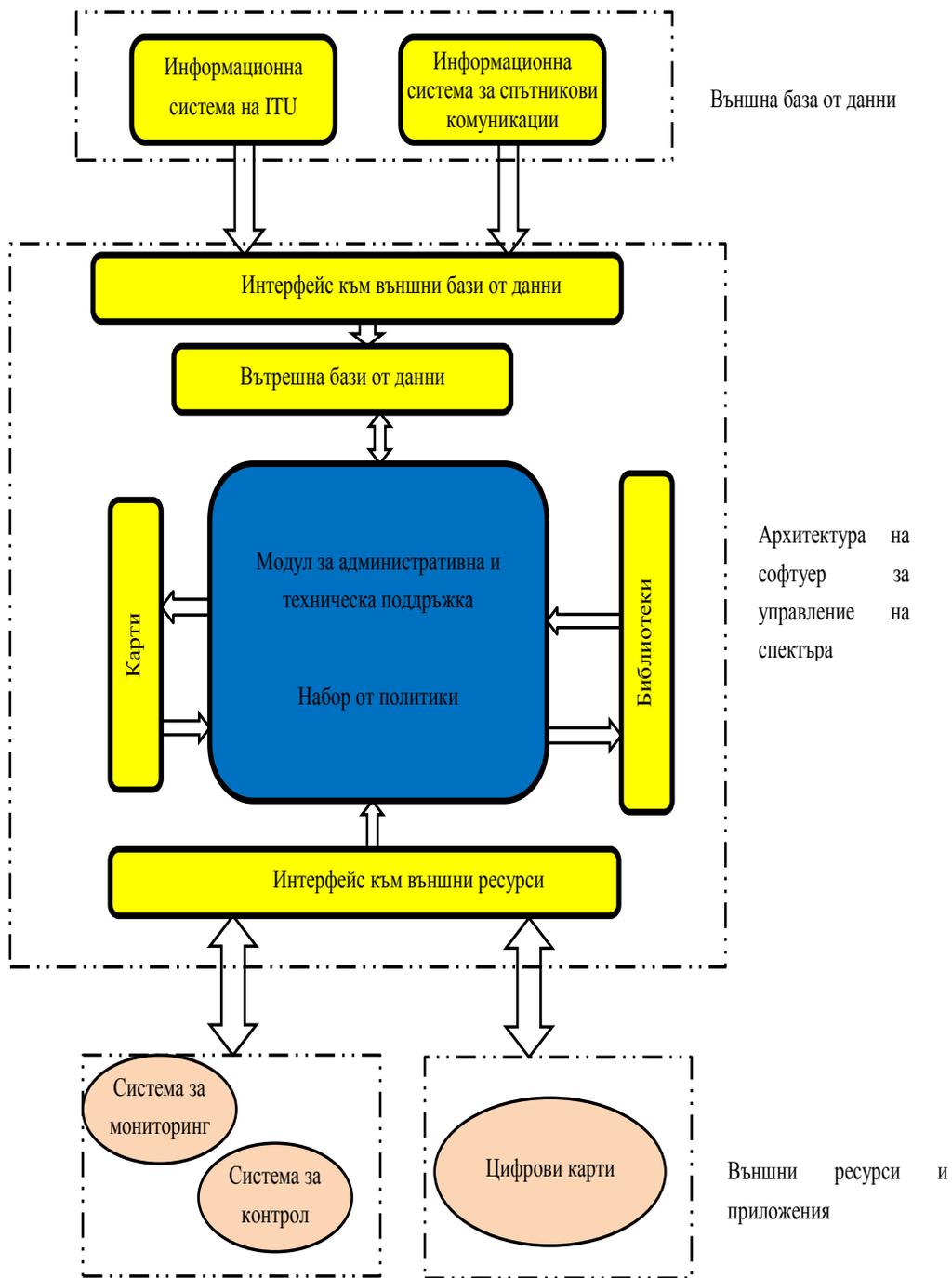
Общ вид на архитектура [88] с отчитане на оценката от ъглите на постъпване е показана на фиг.3 с осигуряване на възможности за използване на топографски данни и задаване на радиуса на покритие. При това е възможно да се определи напрегнатостта на полето в конкретни тестови точки със съответната зададена средно вероятна точност на местоположението и зададения профил на терена и път за разпространение за конкретния поддиапазон.



Фигура - 3 Структура на система за оптимално планиране и проектиране на мрежи за наблюдение на спектъра базиран на оценка ъглите на постъпване

С оглед унифициране процеса на регулиране и осигуряване на възможности за динамичен достъп ITU разработва и насърчава използването на компютърно подпомагано управление на спектъра от администрациите на развиващите се страни. Софтуерът е базиран на Windows (WinBASMS) и представлява сложен софтуерен продукт с възможност за отчитане на множество технически характеристики и функции.

Софтуерната архитектура, показана на фиг.4, е предложена от ITU [111] и осигурява графично и контекстно меню и възможности за взаимодействие с външни бази от данни, ресурси и карти, които могат да бъдат растерни и векторни карти (политически, крайбрежни, регионални, морски).



Фигура - 4 Архитектура на софтуер за компютърно подпомагано управление на спектъра

1.3. Анализ на създаването, развитието и областите на приложение на софтуерното дефинирано радио в безжичните комуникационни системи, като средство за споделяне на честотни ресурси

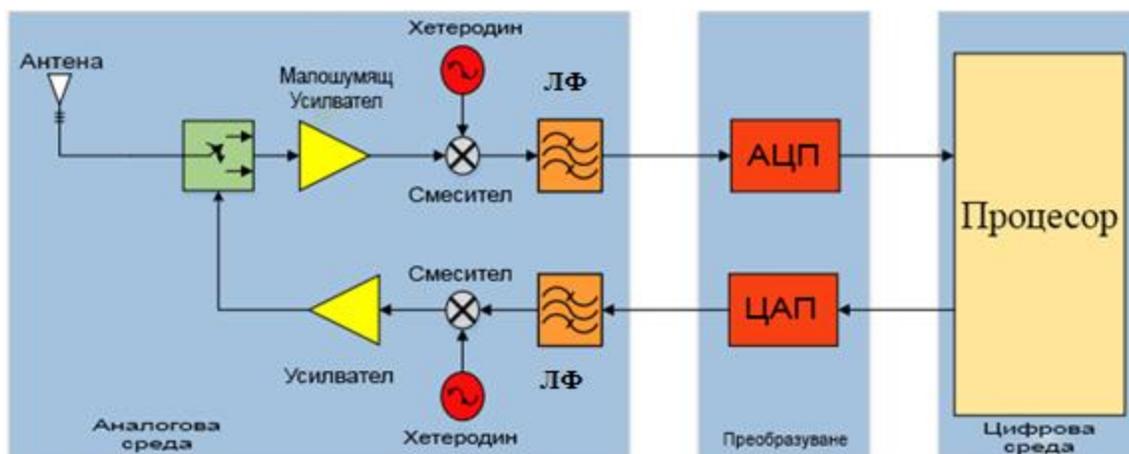
1.3.1. Възникване на SDR

Стремежът към усъвършенстване на безжичните комуникации е непрекъснат научноизследователски и технологичен процес. Широкото разнообразие от предлагани услуги, стандарти, технологии, регулационни изисквания, технологични ограничения, интегриране на мрежи и високите разходи за внедряване и осигуряване на техническа и оперативна съвместимост, е довело до огромна разлика между наследствените и внедряваните радиосистеми.

В опит за разрешаване на тези проблеми е предложен терминът „Software radio” през 1984 г. от екипа на Garland Texas Division of E-Systems Inc. (сега Raytheon) и популяризира идеята за цифров радиоприемник, работещ в основната честотна лента с програмируем интерфейс и демодулатор за сигналите с висока честота и хиляди адаптивни филтри [77].

Първият софтуерно дефиниран радиопредавател е проектиран и експериментиран от Peter Hoehner и Helmuth Lang от German Aerospace Research Establishment Oberpfaffenhofen, Германия през 1988 г. за нуждите на цифров сателитен модем, като са използвани двойка приемо-предаватели, работещи на принципите на софтуерно дефинираното радио.

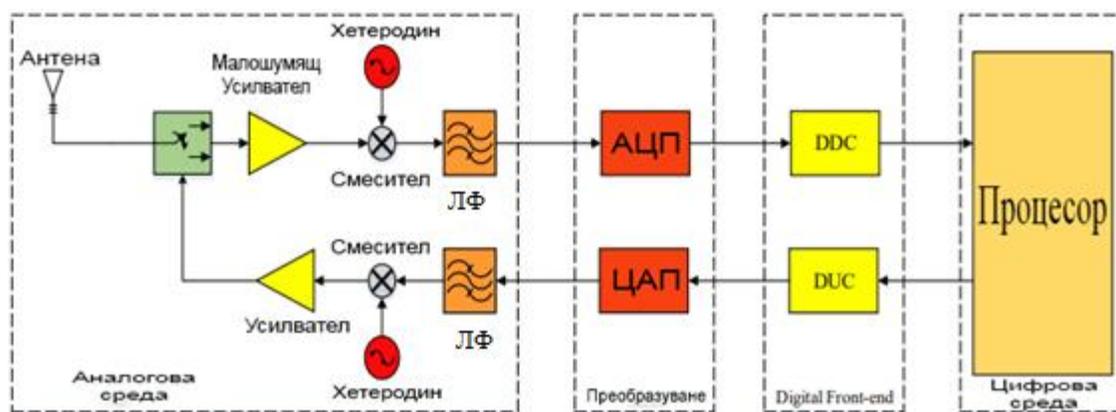
Предложеният радиоприемник е изграден от антена, усилвател, смесител (down – converter), апаратура за контрол на усилването, АЦП и цифрово – сигнални процесори, произведени от Texas Instruments C40s. Предавателят е изграден от ЦАП, работещ с шина за връзка с периферни устройства, усилвател на мощност и антена. Проблемът с широката честотна лента е решен, чрез разделянето ѝ на няколко подобхвата (subbands), разполагащи със собствени аналогови филтри.



Фигура - 5 Първо поколение SDR [11]

Второ поколение SDR за пръв път използва програмируеми логически масиви FPGAs (field programmable gate arrays) за цифрова обработка на сигналите и цели предлагане на по-бързо реконфигурираща се архитектура, която освен възможността за кръстосано приемане между различни обхвати и протоколи (cross – channel connectivity), да намали теглото, размера и цената на платформите. Успешно са разработени платформи за два вида данни:

- без криптографска обработка ("червена зона" – незащитена класифицирана информация);
- с криптографска обработка ("черна зона" – защитена класифицирана информация).



Фигура - 6 Второ поколение SDR [11]

Самият термин "Software Defined Radio" е предложен през 1991 г. от Joseph Mitola, който пръв публикува доклад [105] по темата през 1992 г..

1.3.2. Определения за SDR

В резултат на възможността за решаване на комплекс от задачи в областта на системите за радиокомуникация, концепцията за SDR, придобива широка популярност и определенията, които могат да бъдат дадени за софтуерно дефинираното радио SDR, са много. Някои от тях са предложени от:

Определение на IEEE:

“SDR е радио, на което радиочестотните параметри могат да бъдат установени или изменени с помощта на програмно обезпечение и/или оборудване”. Това се отнася до диапазона от честоти, типа на модулацията, мощността и други параметри. Технологията се отнася за множество от радиостандарти и е приложима към предавателя и приемника. Не се отнася към изменение на режимите на работа, техническите изисквания и стандарти [69].

Определение на FCC:

“Радиооборудване, в което параметрите, отнасящи се до режима на работа, като диапазон от честоти, тип на модулацията, изходна мощност и др., могат да бъдат установени с помощта на програмно осигуряване, без каквито и да е изменения в апаратните компоненти, използвани за излъчване на радиочестоти” [43].

Wireless innovation forum (SDR Forum)

“Радио, в което някой или всички физически слоеве, са софтуерно дефинирани“ [117].

1.4.Етапи на развитие на SDR

SDR технологията позволява хардуерни платформи с набор от процесори да се конфигурират към всеки един радио стандарт.

Етапите на развитие на SDR [1] могат да се опишат, както следва:

❖ Радио със софтуерни възможности (Software Capable Radio) – тези радиостанции са с фиксирани модуляции, сравнително малък брой работни

честоти, ограничени възможности за обмен на данни, ниски скорости за обмен на данни и възможност за обмен на данни под софтуерен контрол.

- ❖ Софтуерно програмируемо радио (Software Programmable Radio) – тези радиостанции се характеризират с възможността за добавяне на нови функции чрез софтуерни промени и усъвършенствани мрежови способности.

- ❖ Софтуерно дефинирано радио (Software Defined Radio) – конфигурирането на всички параметри при тези радиостанции се осъществява софтуерно [58].

- ❖ Съзнаващо радио (Aware Radio) – тези радиостанции имат способности за изучаване и осъзнаване (разбиране) на околната среда. Чрез микрофона на радиостанцията се изучава аудио средата, а чрез радиоприемника се добива информация за радио средата – определяне на честотните канали, измерване на нивата на шумовете и смущаващите сигнали, отделяне на информационните сигнали. Могат да се добавят и допълнителни сензори за добиване на информация – за оценка на радиационната, химическата и бактериологичната обстановка, за определяне на местоположението (GPS), за определяне на астрономическото време, за оценка на биометрични данни, за измерване на параметрите на качеството на обслужване (QoS) и др. Ключова характеристика на тези радиостанции е, че на базата на добитата от сензорите информация се осъзнава реалното състояние на околната среда.

- ❖ Адаптивно радио (Adaptive Radio) – при тези радиостанции на адаптация подлежат различни параметри и характеристики като работна честота, използвана честотна лента на радиоканала, използвани модулационни схеми, различни кодове за откриване и корекция на грешки, различни стратегии за ограничаване на спектъра на канала (използване на изравнители, рейк-филтри и др.), различни начини за синхронизация на радиосистемите, скоростта за обмен на информация, мощността на радиопредавателите. Принципно, разширяването на спектъра чрез скачането на честота (frequency hopping) не се приема като адаптивна техника, защото то се подчинява на предварително дефиниран и програмиран алгоритъм, които използват

скачането на честотата за предпазване от случайни и преднамерени смущения, могат да се приемат за адаптивни. Радиостанции, поддържащи работа по множество честотни канали, не са адаптивни, но тези, които променят динамично броя на използваните честотни канали и/или тяхната пропускателна способност в зависимост от натоварването на мрежата, се приемат за адаптивни.

❖ Когнитивно радио (Cognitive Radio) – тези радиостанции разполагат със сензори, добиващи информация за опознаване и осъзнаване на околната среда, механизми за взаимодействие с околната среда, модели на околната среда, които включват състоянията или памет за наблюдаваните събития, способности за обучение, които спомагат за избор на конкретни действия или техники за адаптация, за постигане на оптимална работа в конкретната околна среда, като действията се характеризират с определено ниво на автономност [105].

Самоосъзнатостта предполага, че радиото разполага с базово множество от факти за своето функциониране и е в състояние да комуникира с други устройства, използващи тези факти [17].



Фигура - 7 Етапи в развитието на SDR [1]

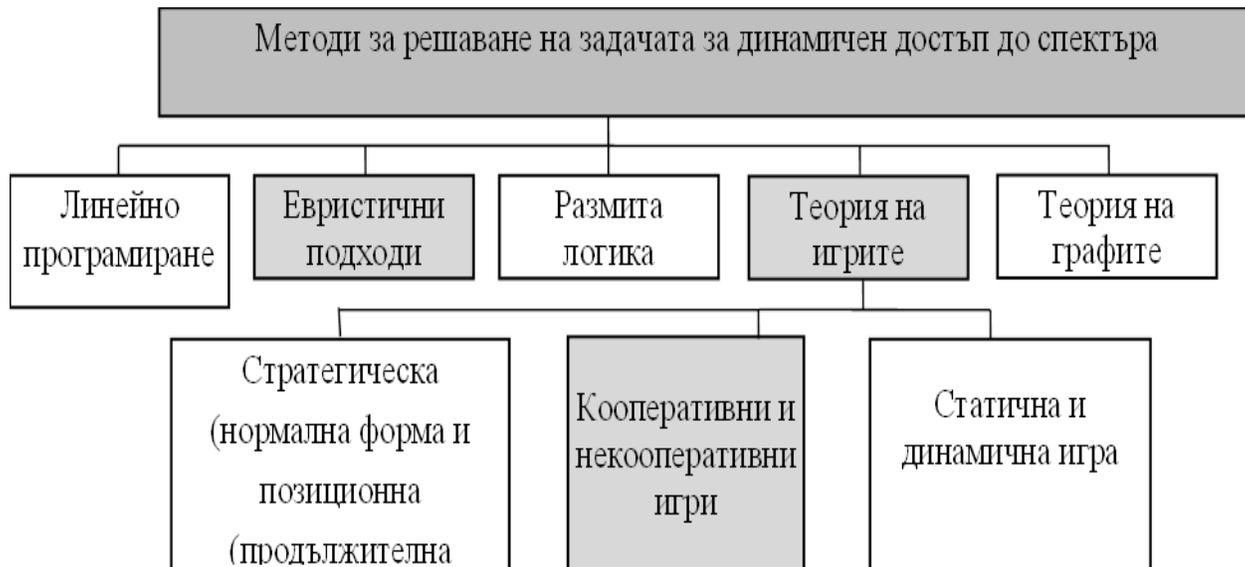
Най-общо към настоящия момент под SDR се има предвид хардуерни и софтуерни технологии, в които някои или всички функции на радиостанциите (наричани още обработка във физическия слой), се осъществяват чрез модифициран софтуер или фърмуер, работещ с програмируеми процесори за обработка. Тези устройствата включват програмируеми логически масиви

FPGA (Field Programmable Gate Arrays), цифрови сигнални процесори DSP (Digital Signal Processors), процесори с общо предназначение GPP (General Purpose Processors), програмируема система в чипа SoC (System on Chip) или други програмируеми процесори със специфично приложение [123].

Използването на тези технологии позволява добавяне на нови безжични функции и способности към съществуващите радиосистеми, без да се изисква добавянето на нов хардуер в тях.

1.5. Подходи за решаване на задачата за динамичен достъп до спектъра

Изследването на поведението на безжичните комуникационни единици, използващи алгоритми за динамичен достъп до спектъра, като част от интегрирана система или мрежа, е изключително трудна задача и нейното опростяване би довело до загуба на информация. Ето защо се налага използване на усложнени методи за нейното решаване. Такива например могат да бъдат теорията на игрите или евристичните подходи, както е показано на фигура 8 [4],[12], [33], [34], [59], [63],[102].



Фигура - 8 Методи за решаване на задача за динамичен достъп до спектъра [12]

1.5.1. Теория на игрите

Ако възлите в една софтуерно дефинирана мрежа са част от йерархична (централизирана) или разпределена архитектура те могат да имат кооперативни или некооперативни стратегии за динамичен достъп до спектъра.

При централизиран мрежов подход един или няколко обекта управляват мрежата, като задават подходящи параметри на работа на всички възли на мрежата, с цел оптимизиране на производителността на мрежата, като капацитет, пропускателна способност или закъснения.

При централизирана архитектура процесът на оптимизация обикновено има за цел повишаване на общата за системата производителност, докато при разпределения подход централният обект не съществува и възлите вземат самостоятелно решение (действат егоистично, опитвайки се да максимизират собствената си производителност), като адаптират работните параметри според заобикалящата среда (напр. възприемано ниво на смущения, изискване за капацитет в определен момент и т.н.). Тази ситуация включва високо ниво на взаимодействие между възлите.

И в двата случая теорията на игрите предоставя подходящ инструмент за анализ за справяне с проблема с динамичното споделяне на спектъра, независимо дали се използва централизиран или опортюнистичен подход.

Теорията на игрите е най-подходяща за моделирането и изучаването на взаимодействията (сътрудничество или конфликт) между когнитивните радиотерминали, по-специално категорията некооперативни игри, където ефективни разпределени алгоритми могат да бъдат управлявани с помощта на локална информация. Едно от предимствата на теорията на игрите е, че те могат да се използват за предоставяне на стимули за играчите да си сътрудничат и да се държат по конструктивен начин.

В повечето случаи, при които когнитивните радиомрежи се моделират като игри, радиотерминалите се считат за играчи, докато стратегиите на играчите варират в различни форми. Според някои формулировки това може

да бъде нивото на мощност, а в други изборът на честотната лента (канал), до която има достъп всеки терминал. Независимо от избора на стратегии, функцията на полезността трябва да представлява метриката за играчите, като се вземат предвид параметрите, влияещи върху изплащането (интереса) на възлите, например честота, мощност и т.н..

Пример 1, ако в една когнитивна мрежа има два възела (А, В), всеки от които има два варианта на действия, обозначени с цифрите 1 и 2. Коефициентите на възнагражденията, получавани от тях при избиране на всеки конкретен вариант на действие, са указани в съответните клетки на табл. 1.

Таблица 1: Матрица на плащанията на биматричната игра от Пример 1

		Действия (стратегии) на възел В	
		1 (y_1)	2 (y_2)
Действия (стратегии) на възел А	1 (x_1)	$P_A(x_1, y_1) = +1,$ $P_B(x_1, y_1) = +1$	$P_A(x_1, y_2) = -1,$ $P_B(x_1, y_2) = +2$
	2 (x_2)	$P_A(x_2, y_1) = +2,$ $P_B(x_2, y_1) = -1$	$P_A(x_2, y_2) = 0,$ $P_B(x_2, y_2) = 0$

От табл. 1 се вижда, че ако в даден момент и двата възела използват действие 2 (т.е. стратегиите си x_2, y_2 съответно), тогава техните възнаграждения ($P_A(x_2, y_2) = 0, P_B(x_2, y_2) = 0$) са равни на нула съответно. От друга страна, ако възел А избере действие 1 (стратегията си x_1) при условие, че възел В продължава да използва стратегията си y_2 (действие 2), тогава възел А ще влоши платежа си с една степен ($P_A(x_1, y_2) = -1, P_B(x_1, y_2) = +2$). Аналогично, ако възел В самостоятелно избере вариант 1 (стратегията си y_1), докато в същото време възел А продължава да използва действие 2 (стратегията си x_2), тогава възел В също ще влоши платежа си с една степен ($P_A(x_2, y_1) = +2, P_B(x_2, y_1) = -1$). Следователно, и двата възела разбират, че оптимална за тях би била ситуацията, когато и двамата използват действие 1

(с възнаграждения $P_A(x_1, y_1) = +1$, $P_B(x_1, y_1) = +1$), но нито един от тях няма мотив за изменение на ситуацията, при което равновесието в играта става резултат от отсъствието на такива мотиви.

Ако системата вече се намира в оптимално състояние (когато и двата възела са избрали действие 1), то за всеки от тях обаче съществува изкушение да започнат да използват действие 2, което би им донесло по-голямо възнаграждение за сметка на другия играч.

Пример 1 илюстрира възможността да съществуват две социални състояния: устойчиво, но неоптимално (и двата възела използват вариант 2); и второ оптимално, но неустойчиво (и двата възела използват вариант 1). Тази противоречивост е резултат от факта, че в разглежданата игра (при еднократно разиграване) няма равновесие на Наш.

1.5.2. Линейното програмиране.

Математическа оптимизация, позната също и като математическо оптимизиране или математическо програмиране в приложната математика, компютърната наука и мениджмънт изследванията, е избирането на най-добрия елемент (според определен критерий) от някакво конкретно множество от възможности. Всъщност математическо програмиране се свежда до намиране на екстремална стойност (минимум или максимум) на функция при наложени ограничения, т.е. това е екстремална задача [64].

Формално, екстремална задача е задачата за намиране на екстремум на функция.

$$f: G \rightarrow \mathbb{R}^1, X \subset \mathbb{R}^n \quad (1)$$

Функцията f се нарича целева функция. Множеството от допустими решения G е зададено чрез система неравенства и/или уравнения, наречена система от ограничения [64].

Разделението на видовете оптимизиране се обуславя от типа на целевата функция и ограниченията на задачата. Най-често използвани в практиката са: линейно оптимизиране, нелинейно (квадратично, хиперболично) оптимизиране, целочислено оптимизиране, изпъкнало оптимизиране, матрични игри и др.

Математическото оптимизиране, с помощта на изчислителната техника, прави възможно решаването на голям брой задачи, които са от изключително значение за практиката [64].

При линейно оптимизиране целевата функция и ограниченията са линейни. Това е един от най-важните раздели на математическото оптимизиране.

Теоретичните основи на линейното оптимизиране се полагат с изучаването на системи линейни неравенства, което може да се проследи назад във времето до една работа на Фурие от 1826 г. По-късно много математици доказват различни частни случаи на най-важния резултат на линейното оптимизиране – т. нар. силна теорема за двойственост.

Задачата на линейното оптимизиране винаги може да се запише в канонична форма [64]:

$$\begin{aligned} \min L(X) &= c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n + c_0, \\ \overrightarrow{Ax} &= \overrightarrow{B}^T, \vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n, \\ x_i &\geq 0, i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (2)$$

A е $n \times m$ матрица на ограниченията, $B \in R^m$ е вектор-ред на ограниченията, $L(X)$ е целевата функция, а X – вектор-ред на променливите.

Основен метод за решаването на екстремалната задача в линейното оптимизиране е симплекс методът (или симплекс алгоритъмът) и неговите разновидности: двойствен симплекс метод, мрежов симплекс метод, метод на амебата [65] (или метод на Нелдър-Мийд) и др.. Освен симплекс метод, съществуват и други (в някои случаи дори по-бързи) методи като алгоритъмът на Кармаркар [74].

1.5.3. Теория на графите

Една от основните причини за успешното прилагане на машинното обучение при решаване на задачата за динамичен достъп до честотните ресурси е възможността за автоматичното извличане на важни характеристики за средата.

Традиционните подходи за машинно обучение, които използват метода на графите се базират на дефинирани от потребителя евристични подходи за извличане на характеристики, съдържащи се в структурата на графа. Въпреки

това, тенденцията през последните години се променя и се появяват все повече подходи, при които автоматично се кодира структурата на графите, използвайки методи за дълбоко обучение и нелинейно намаляване на размерността.

Графите са един от най-мощните и гъвкави начини за представяне на данни. Те имат голяма изразителна сила, т.е. графите могат да се използват за означаване на голям брой системи в различни области, включително социални науки и естествени науки – мрежи за взаимодействие, графи на знанието и много други области на изследване.

Съвременното понятие “граф” е чисто теоретико-множествено.

Определение : Граф, върхове и ребра [14] – граф е всяка наредена двойка $G = (V, E)$, където V е множество, чиито елементи се наричат върхове, E е множество, чиито елементи се наричат ребра, като $E \subseteq \{X \subseteq V : |X| = 2\}$ □ □

Обикновено върховете се записват с малки латински букви като u, v и т. н. Имената на ребрата обикновено се записват като e_1, e_2 и т. н. Тъй като всяко ребро е двуелементно множество от върхове, естествено е да определя ребрата като двуелементни множества, записвайки например $e_1 = \{u, v\}$. Такъв запис обаче не се използва, а се използва $e_1 = (u, v)$. Това противоречи на разбирането, че фигурните скоби се използват при липса на наредба, а кръглите, при наличие на наредба. Но е необходимо да се съобрази със световно приетата конвенция за запис на ребра на граф. А тя е, ребрата да се записват с кръгли скоби, независимо от това, дали върховете са наредени или не. Така, записвайки дадено ребро като (u, v) , не се има предвид наредена двойка, а има предвид множеството с елементи u и v .

В машинното обучение върху графи могат да бъдат идентифицирани два основни проблема: включване на информация за структурата на графа в модела (т.е. лесен начин за кодиране на тази информация във вектор на характеристиките) и намаляване на размерността на вектора на характеристиките.

За извличане на структурна информация от графи, традиционните машинни подходи често се основават на обобщена статистика на графите

(напр. коефициенти на клъстериране), функции на ядрото или сложни функции за измерване на локални структури на съседство. Тези подходи обаче са ограничени, тъй като тези инженерни решения не могат да бъдат адаптирани в процеса на обучение, а тяхното разработване е отнемащ време и скъп процес.

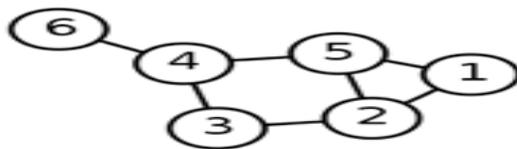
Първоначално проблемът със събирането на структурна информация за графа е разглеждана като стъпка на предварителната обработка, посредством статистически данни за извличане на структурна информация.

Повечето съвременни алгоритми за представяне на възли разчитат т.нар. директно кодиране, където топологичната информация се съхранява изрично.

Разработват се подходи [66], които се стремят да изследват представяния (вграждания), които кодират структурна информация чрез графи. Идеята зад тези подходи за представяне и обучение е да се получи граф, който представя възли или (под)графи като точки в ниско размерно векторно пространство R^D . Целта е да се оптимизира такъв граф, така че геометричните връзки в това разучено пространство да отразява структурата на оригиналния граф. Съвременните подходи за представяне третират този проблем като проблем на машинното обучение и целят след оптимизиране на пространството за изобразяване, научените представяния да могат да се използват като вход за последващи задачи за машинно обучение. Такива алгоритми са Deerwalk и Node2Vec, като използват собствените си декодери и статистически резултати за оптимизиране на графа.

Въпреки, че много от реалните графи имат сложна мултимодална или многослойна структура, ще бъде разгледан прост неориентиран граф $G = V, E$ със структура дадена на фиг. 9, където V е набор на елементите, които се наричат върхове, а E е набор от два комплекта (комплекти с два различни елемента) върхове, чиито елементи се наричат ребра.

$V = 1,2,3,4,5,6$ и $E = 1,2,1,5,2,3,2,5,3,4,4,5,4,6$

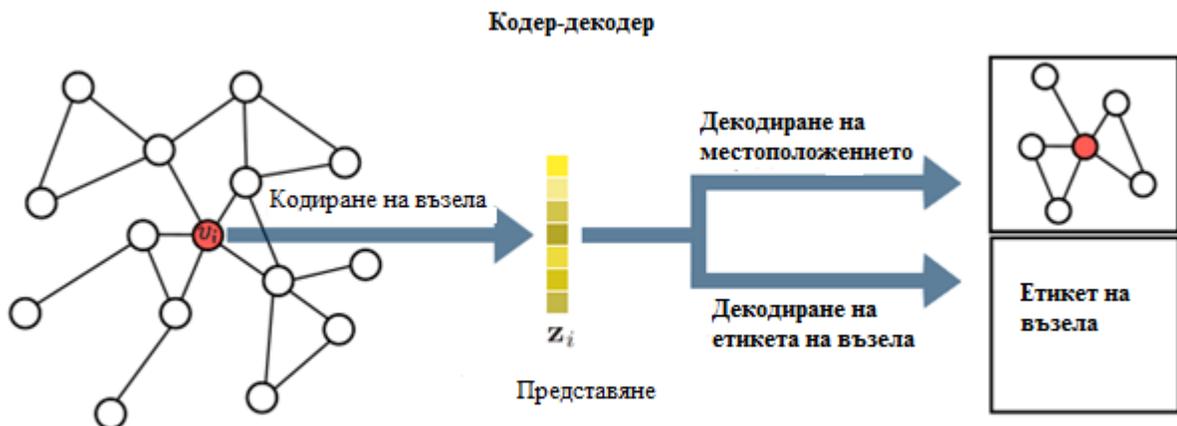


Фигура - 9 Граф от вида $G = V, E$

Нека основният входен сигнал $G = V, E$ е свързан с двоична матрица за съседство A , както и реалната матрица за представяне на текст, метаданни или свързани възли $XR^{m \times |V|}$. Целта на такова представяне е да се използва информацията, съдържаща се в A и X , за да се покаже всеки възел или подграф на вектор zR^d , където $d \ll |V|$.

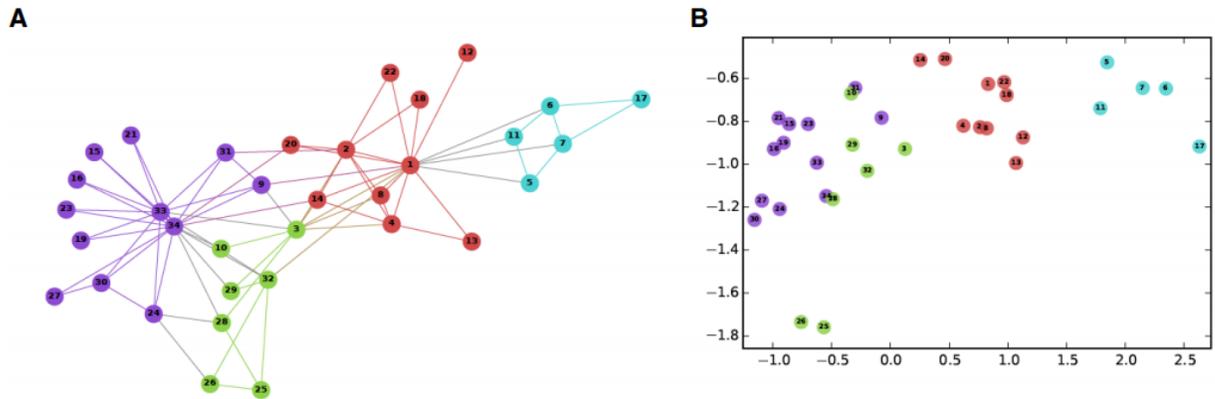
При използване на подход от типа кодер-декодер, кодерът показва възел v_i в ниско размерното векторно вграждане на z_i на базата на позицията на възела в графа, неговата локална структура и /или атрибути. След това декодерът извлича информацията, посочена от потребителя, ниско размерното вграждане.

Това може да бъде информация за областта около v_i (например идентифициране на съседните възли) или класификация свързана с v_i (например общностния етикет).



Фигура - 10 Машинно обучение базирано на графи от типа кодер-декодер

С оглед опростяване на графа е важно да могат да се представят няколко сходни локални възела чрез един обобщен ниско размерен вектор. Тези обобщени възли могат да се считат за кодиращи или изпъкнали възли в скрито пространство, където геометричните съотношения в това пространство съответстват на взаимодействията (например ръбове) в графа на източника. Представяне от такъв тип е дадено на фигура 11.



Фигура - 11 Обобщени възли на графи

Може да се твърди, че функцията на кодера е да преобразува възлите във векторни представяния $z_i \in \mathbb{R}^d$, където z_i съответства на представянето за възел $v_i \in V$, докато декодера е функция, която приема набор от представяния на възли и декодира персонализирана статистика на графа или $\mathbb{R}^d * \mathbb{R}^d \mathbb{R}^+$.

В практиката подходът с кодър-декодер се предпочита двойния декодер, който изобразява двойки представяния на възли в реална мярка за близост до графа, която определя количествено близостта на два възела в оригиналния граф. Това означава, че когато се приложи двоен декодер към двойка z_i, z_j представяния, се получава реконструкция на близост между v_i, v_j в оригиналния граф така, че да се сведе до минимум грешка (загуба) и може да се запише:

$$DEC = \left(ENC(v_i) ENC(v_j) \right) = DEC(z_i, z_j) sG(v_i, v_j) \quad (3)$$

Където sG е зададена от потребителя мярка за близост между възлите, определена в граф G . Например, може да се зададе $sG(v_i, v_j) = A_{ij}$ дефиниция за възли, така че на съседните възли да се присвоява 1, а за останалите 0 или фиксирана дължина при произволно обхождане на графа.

На практика повечето подходи прилагат възстановяване (уравнение 3) чрез минимизиране на емпиричната загуба L върху набор от двойки тренировъчни възли D :

$$L = \sum_{(v_i, v_j) \in D} \text{DEC}(z_i, z_j) sG(v_i, v_j) \quad (4)$$

Където $R * RR$ е определена от потребителя функция за загуба, която измерва несъответствието между декодираните (т.е. предполагаемите) стойности на близост $\text{DEC}(z_i, z_j)$ и истинските стойности $sG(v_i, v_j)$.

1.6. Платформи за развитие на SDR

1.6.1. SPEAKeasy

Военна програма, целяща създаването на програмируема, гъвкава платформа, с възможности за преконфигуриране, като използва цифрови сигнални процесори, с възможност за комуникация с множество предходни системи едновременно. Първоначалните резултати в обхвата 90-200MHz са успешни, но невъзможността за разработване на полеви прототипи с пълна RF функционалност и самофинансиране, чрез комерсиални разработки с използване на голям диапазон от честоти, води до реструктуриране на програмата през 1997 г. и всички задачи, свързани с широколентовия достъп [73].

1.6.2. GNU радио

GNU Radio е проект [55], който комбинира софтуер с минимален хардуер, позволяващ изграждане на радио платформи, базирани на SDR, но обработката на сигнала се извършва от безплатен софтуер и се състои от GNU софтуер и хардуер. Хардуерът, необходим за изграждане на приемник, се състои от RF част и аналого – цифров преобразувател. Няма определени спецификации за хардуера, достатъчно е да е съвместим – най-често универсалната периферия (Universal Software Radio Peripheral, USRP), която да е базирана на програмируема логическа матрица FPGA.

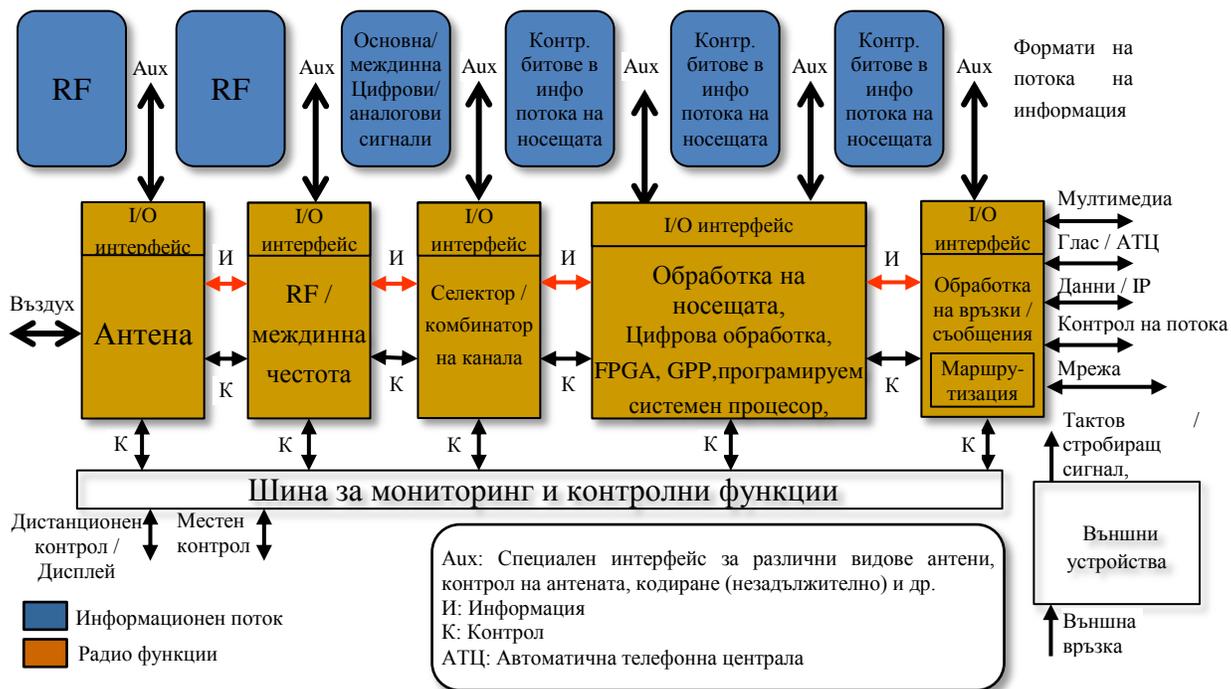
1.6.3. Комуникации от следващо поколение (neXt Generation, XG)

XG хардуерът KUAR (Kansas University Agile Radio), е най-широко използван от изследователските проекти в областта на отбраната DARPA

(Defense Advanced Research Projects Agency). Системата е разработена в Simulink и внедрена в Xilinx VHDL. Предлага и графичен потребителски интерфейс GUI (Graphical User Interface), наречен управляващ панел KUAR, който позволява тези функции да се управляват отдалечено или локално [104].

1.6.4. Софтуерна комуникационна архитектура (SCA)

Софтуерната комуникационна архитектура (SCA) е предназначена за управление на хардуерни и софтуерни платформи, както и за обработка на цифрови сигнали. Тя представлява набор от рамкови спецификации, които позволяват преносимост на софтуерните приложения между платформи, като под платформи се разбира хардуер с инсталирано софтуерно ядро [57].



фигура 9 Софтуерно дефинирано радио [21]

SCA архитектурата използва съвместим интерфейс на компонентите, а всички функции за управление са децентрализирани и всеки компонент управлява потоците от данни към и от своите портове. Този децентрализиран подход осигурява контрол и откритост на архитектурата, възможности за по-динамично и гъвкаво управление [103] на радиоресурсите с цел постигане на

ефективно използване на спектъра и по-висока устойчивост на комуникацията (чрез скачане на честотата).

1.7. Изводи по глава първа

На базата на извършения анализ на софтуерно дефинираните радиосистеми и ефективното използване на честотния спектър могат да се направят следните изводи:

1. За да се отговори на проблема с предоставяне на „нови“ честотни ресурси, следва да се построи единна унифицирана софтуерно дефинирана хардуерна платформа, с което да се постигне архитектура, доближаваща се до идеалното софтуерно дефинирано радио, посредством, което да се осигури средство за ефективно и гъвкаво използване на радиочестотния спектър.

2. Колективното използване на спектъра позволява на неограничен брой независими потребители и/или устройства да имат достъп до спектъра в същия диапазон на определените честоти на колективните потребители едновременно и в конкретния географски регион при предварително дефиниран набор от условия.

3. Масовото внедряване на SDR технологиите в различни по вид системи за безжични комуникации ще доведе до улеснен контрол над концепцията за динамичен достъп до честотните ресурси, при значително ограничаване на интерфериращите източници в многопотребителска среда.

Глава 2. Анализ на системите за откриване на честотни ресурси

2. Методите за следене и техники за откриване на честотни ресурси

2.1. Следене на честотните ресурси

Софтуерно дефинираното и в частност когнитивното радио много често се използват за изграждане на мрежи с епизодична структура, поради способността за динамичен достъп до спектъра [16].

Основните предимства при такъв сценарий са:

- съвместно съществуване на SDR устройства в среда с неизвестни политики;
- способност за работа в среда с неизвестни източници на смущения;
- възможности за натрупване на статистически данни за средата на излъчване, синтезиране на сигнали и промяна на мощността, модулацията и др.;
- елиминиране на грешки при честотно планиране.

Наред с предимствата на SDR съществуват и редица предизвикателства и рискове [28]:

- риск от смущения върху неоткрити приемници;
- опасност за кратко време да се попречи на телекомуникационната инфраструктура;
- трудност при оптималното споделяне на честотния спектър между различните радиомрежи.

Оптималното споделяне на спектъра изисква познаване на границите на постижима скорост на предаване. Определянето на твърде високи допустими скорости на предаване може да доведе до „глад“ за ресурси.

Изчисляването на постижимите стойности на скоростите за предаване изисква глобално познаване на средата, топологията на мрежите, типа на

предоставяните услуги, брой на потребителите, завишени изчислителни възможности и други.

Определянето на оптималния честотен ресурс за мрежи с неизвестни или нерационални политики е трудна задача. Динамичният достъп до спектъра е разделен на две основни фази, а именно проучване на радиочестотния спектър (наблюдение и анализ) и експлоатация на спектъра (решаване и предаване).

Следенето на спектъра изисква решаването на въпроси относно физическия и MAC слой на мрежа с възможности за споделяне на ресурси. Докато въпросите на физическия слой са свързани най-вече с обработката на сигнали, то проблемите с MAC слоя са свързани с оптимизирането на спектъра [19], [25],[51],[53].

2.1.1. Следене на границата на интерференция

Една от целите на следене на спектъра, особено за следенето на базата на интерференция, е да се определи състоянието на спектъра (т.е. дали е зает), така че той да може да бъде достъпен от нелицензиран потребител под ограничението на интерференцията. Предизвикателството се крие в измерване на интерференцията в лицензирания приемник, причинена от предавания, генерирани от нелицензирани потребители [21]. Първо, нелицензираният потребител може да не знае точно местоположението на лицензирания приемник, което е необходимо за изчисляване на смущенията, причинени от предаването му. Второ, ако лицензираният приемник е пасивно устройство, предавателят може да не е наясно с приемника [35].

2.1.2. Следене на спектъра в многопотребителски мрежи

Множество потребители, лицензирани и нелицензирани, могат да споделят радиочестотния спектър в мрежа. Също така множество мрежи могат да съществуват съвместно, при което предаванията в една мрежа могат да интерферират с предавания в други мрежи. В такъв случай, координирано и

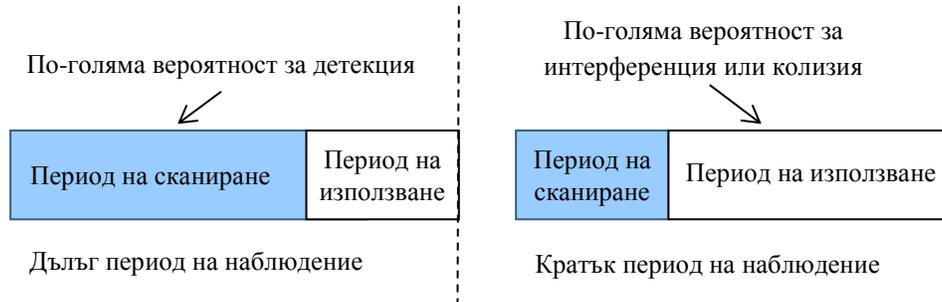
кооперирано следене на спектъра се предпочита, тъй като то може да открие статуса на достъп до спектъра от лицензираните потребители в различни местоположения на мрежата. Информацията за следене на спектъра може да се използва за получаване на карта на спектъра, която може да бъде използвана от нелицензираните потребители да вземат коректни решения за достъпа [36].

2.1.3. Оптимизиране на периода на следене на спектъра в многоканални мрежи

Многоканалното предаване (например предаване на базата на ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране OFDM) е типично в една софтуерно дефинирана радиомрежа. Броят на наличните канали, обаче, ще бъде по-голям от броя на наличните интерфейси в радиопредавателя. Поради това само малка част от наличните канали могат да бъдат следени едновременно. Изборът на каналите сред всички налични, които ще се следят, влияе върху способността за определяне състоянието на даден канал (зает, свободен, частично зает) и на ефективността на системата като цяло [15]. За следенето на спектъра каналът, който се заема най-често от лицензирани потребители, трябва да бъде по-малко предпочитан от канал, който понякога се заема. В многоканална среда, изборът на каналите [51] трябва да бъде оптимизиран за следене на спектъра, за да се постигне оптимална производителност на системата при хардуерните ограничения на радиоприемника.

При следенето на спектъра, колкото по-дълъг е периодът на наблюдение, толкова по-точна ще бъде информацията за спектъра [39]. Въпреки това, по време на наблюдението, един радиопредавател не може да предава в същата честотна лента. Следователно по-дълъг период на наблюдение ще доведе до по-ниска производителност на системата (фигура 12). Компромисът между време за следене и предаване може да бъде оптимизиран, за да се постигне оптимално решение за следене на спектъра. Ако точността на следене на спектъра е ниска, могат да възникват колизии и интерференция с предаваните

сигнали от лицензирани потребители, при което ще се намали производителността и на лицензираните и нелицензираните потребители.



Фигура - 12 Компромис между времето за следене на спектъра и неговото използване [21]

2.2. Управление на спектъра

Основната цел на управлението на радиочестотния спектър е да следи и управлява достъпа до дупките в спектъра от нелицензираните потребители. Изследователските въпроси в управлението на спектъра са свързани с анализа на спектъра и решенията за достъп до спектъра.

Въз основа на резултатите от следенето на спектъра се извършва спектрален анализ за оценка. Един от въпросите е как да се определи количествено качеството на спектъра, предоставящо възможност за достъп от нелицензиран потребител. Това качество може да се характеризира чрез съотношението сигнал/шум SNR, средната продължителност и корелацията в наличието на дупки в спектъра. Информацията за това качество на радиочестотния спектър може да бъде неточна и шумоподобна.

2.3. Вземане на решение за достъп до радиочестотния спектър

Някои от изследователските въпроси, свързани с вземане на решение за достъп до радиочестотния спектър на нелицензираните потребители са:

- **Модел за вземане на решение.** За достъп до радиочестотния спектър се изисква модел за вземане на решение. Сложността на този модел за вземане на решение зависи от параметрите, използвани при анализа на спектъра. Моделът за вземане на решение се усложнява при нелицензиран

потребител, възнамеряващ да увеличи максимално производителността си, като същевременно се минимизират смущенията, причинени на лицензирания потребител. Стохастични методи за оптимизация са добър инструмент за моделиране и решаване на проблема с вземане на решение за достъп до спектъра.

Един такъв подход е описан в [90] и е отчетливо различен и по-реалистичен от повечето описани и приложени подходи, тъй като е допуснато, че вторичните потребители не познават идеално състоянията на първичния канал чрез наблюдение.

Нека в система за обслужване на лицензирани потребители са налични определен набор от канали (C), които могат да са в състояние „зает“ или „свободен“, а вторичните потребители имат достъп до всички канали.

Когато определят канал, който е свободен за определен интервал от време, те получават достъп, пропорционален на честотната лента на канала, до който те имат достъп. Целта на вторичните потребители е да изберат каналите за достъп във всеки слот по такъв начин, че да се спази ограничението за не намеса в потенциалните първични предавания всеки път, когато имат достъп до канал. Тъй като вторичните потребители нямат ясни познания за състоянията на каналите, проблемът се ограничава до процес на Марков за вземане на решение.

Ако всички канали C имат еднаква широчина на честотната лента B и са статистически идентични и независими от гледна точка на първичното използване, тогава заетостта на всеки канал ще следва верига на Марков. Състоянието на канала n във всеки интервал от време l се представя от променливите $S_n(l)$ и може да бъде 1 или 0, където състоянието 0 съответства на канала, който е свободен за вторичен достъп и 1 съответства на канала, който се заема от някой основен потребител.

Когато канал n е открит в слот l , се използва $X_n(l)$, за да се обозначи вектора на наблюденията, направени от различните потребители на канал n в слот l . Тези наблюдения представляват изходи предназначени за когнитивните потребители.

Приема се статистиката на тези наблюдения да са неизменни във времето и да са различни за различните канални състояния. Наблюденията върху канал n в слот l имат различни функции на плътност на вероятността за f_0 и f_1 , когато $S_n(l) = 0$ и $S_n(l) = 1$ съответно.

Наборът от всички наблюдения до слот l се обозначава с X^l , и събирането на наблюдения за канал n до слот l е означено с X_n^l . Узнването за канал в слот l се означава с u_l , а последователността на каналите, установена до слот l , е означена с u^l , и сборът от времеви интервали до слот l , когато канал n е бил установен се обозначава с L_n^l .

Решението за достъп до канал n в слот l се обозначава с двоична променлива $\delta_n(l)$, която приема стойност 1, когато канал n е достъпен в слот l , а 0, когато е недостъпен.

Вторичните потребители трябва да отговарят на следното ограничение на вероятността за намеса в първичните предавания във всеки слот:

$$P(\{\delta_n(l) = 1\} | \{S_n(l) = 1\}) \leq \zeta \quad (5)$$

С цел опростяване се предполага, че във всеки слот решението за достъп до даден канал се прави, като се използват само наблюденията, направени в този слот. При това във всеки слот l , вторичните потребители имат достъп само до канала, който откриват в слот l . Освен това решението за достъп трябва да се основава на двете възможни състояния на канал n , извършени върху наблюдението $X_n(l)$.

Оптималният случай се задава с логаритмичното съотношение имащо вида:

$$L(X_n(l)) = \log \frac{f_1(X_n(l))}{f_0(X_n(l))} \quad (6)$$

до някакъв праг, който е избран да задоволи,

$$P(\{L_n(l) = 1\} < \Delta | \{S_n(l) = 1\}) \leq \zeta \quad (7)$$

и оптималното решение за достъп би било достъпът до канал при праг, надвишаващ $L(X_n(l))$. Следователно

$$\delta_n(l) = I_{L\{X_n(l)\} < \Delta}, I_u(l) = n \quad (8)$$

и достъпът, получен в слот l , може да бъде изразен като,

$$r_l = B I \{ S_{ul}(n) = 0 \} I \{ L(X_{ul}(n)) < \Delta \} \quad (9)$$

където I_E представлява индикаторната функция за настъпване на събитие E .

Възможно е за всеки вторичен потребител да се дефинира някакво ниво (праг) Δ при различни изисквания за използване на първичния спектър и ограничаването на интерференцията или при идентични канали може да се запише следната зависимост [90]:

$$E_{[r_l]} = E [B I \{ S_{ul}(l) = 0 \} I \{ L(X_{ul}(l)) < \Delta \}] = E [B I \{ S_{ul}(l) = 0 \} I \{ L(X_{ul}(l)) < \Delta \} S_{ul}(l)] \quad (10)$$

$$E [B (1 - \varepsilon) I_{S_{ul}(l)=0}] \varepsilon = P \{ L(X_n(l)) > \Delta \} | S_{ul}(l) \quad (11)$$

Тъй като всички канали се приемат за идентични и статистическите данни за наблюденията са постоянни във времето, даденото от израза (11) е константа, независима от l . От (10) може да се предефинира проблема, така че за достъпът в слот l може да се запише

$$r_l = B (1 - \varepsilon) I_{S_{ul}(l)=0} \quad (12)$$

Тогава проблемът с оптимизацията е еквивалентен с максимизирането на $\sum_{l=0}^{\infty} (a^l E(r_l))$.

Състоянието на системата в слот l , обозначено с $S(l)$ се дава с израза, $S(l) = (S_1(l), S_2(l), \dots, S_L(l))$,

който представя състоянията на каналите в C , които имат независими и идентични процеси. Каналът, който трябва да се долови в слот l , се определя в слот $l - 1$ и се дава от

$$u_l = \mu_l (I_l - 1) \quad (13)$$

където μ_l е детерминирана функция и $I_l = (X_l, u^l)$ представлява цялата информация за минали наблюдения и решения за слот l . Информацията получена в слот l , е функция на състоянието в слот l и u_l , както е дадено от

(12). Търси се поредица от канали $\{u_0, u_1, \dots, u_l\}$, така че $\sum_{l=0}^{\infty} (a^l E(r_l))$ да се максимизира.

Вижда се, че това се явява проблем на Марков за вземане на решение с частично наблюдение на радиоресурсите. Известно е [31], че за такъв проблем, статистика в края на какъвто и да е времеви интервал l , е достатъчно да се знае разпределението на вероятностите на състоянието на системата $S(l)$, обусловени от всички предишни наблюдения и решения, дадени от $P(\{S(l) = s(l)\} | Il)$.

Тъй като различните канали са независими един от друг и това условно разпределение на вероятностите е еквивалентно представено от разбирането за състоянията на заетост на всеки канал, т.е. вероятността за заемане на всеки един канал n в слот l , обусловен от всички предишни наблюдения за съответен слот.

Използва се $p_n(l)$, за да се представи вероятността за канал n в края на слота l , т.е. $p_n(l)$ е вероятността състоянието $S_n(l)$ на канала n в слота l да е 1, обусловен от всички наблюдения и решения за l , и се дава от израза

$$p_n(l) = P(\{S_n(l) = 1\} | X_n^l, K_n^l) \quad (14)$$

Използва се $p(l)$ за означаване на вектора $L \times 1$, представящ очакването за каналите в S , а началните стойности на параметрите за всички канали се определят, като се използва стационарното разпределение на верига на Марков. Използва се P , за да се представи матрицата на вероятност за преход на всеки канал, като $P(i, j)$, която представлява вероятността канал, който е в състояние i в слот l , да премине в състояние j в слот $l + 1$.

Определя се,

$$q_n(l) = P(1, 1) p_n(l - 1) + P(0, 1) (1 - p_n(l - 1)) \quad (15)$$

Чрез $q_n(l)$ се представя вероятността за заетост на канал n в слот l , обусловен от наблюдения до слот $l - 1$. Използвайки правилото на Бейс, че стойностите на вероятност се актуализират за всеки времеви интервал l и предложени алгоритъм в [90] може да се запише :

$$p_n(l) = \frac{q_n(l)f_1(X_n(l))}{q_n(l)f_1(X_n(l)) + (1 - q_n(l))f_0(X_n(l))} \quad (16)$$

Когато канал n е избран в слот l (т.е. $u_l = n$) и $p_n(l) = q_n(l)$. Така от (16) се вижда, че е достатъчна статистиката, която се получава и могат да се извършват само при използване на наблюденията от $L(X_n(l))$, вместо целия вектор на наблюдения. Освен това, от (8) се вижда, че решенията за достъп също зависят само от $L(X_n(l))$. Оттук и заключението, че този проблем с векторни наблюдения е еквивалентен на този с скаларни наблюдения, където скаларите представляват обобщение на наблюденията на всички съвместно действащи вторични потребители.

Използва се и Y^l , за да се обозначи множеството от всички наблюдения за времевия слот l и Y_n^l за обозначаване на множеството от всички наблюдения на канал n до слот l .

От това следва, че решенията за достъп се дават от

$$\delta_n(l) = L_{(\{L'Y_n(l)\} < \Delta') L_{u_l=n}} \quad (17)$$

където $L'Y_n(l)$ представлява логаритмична вероятност на $Y_n(l)$ и прагът на достъп Δ е избран да задоволи,

$$P(\{L'Y_n(l) < \Delta\} | \{S_n(l) = 1\}) = \zeta \quad (18)$$

Аналогично, както се дава (16) с оценките на функциите на плътността на $X_n(l)$, се заменя с оценките на функциите за плътност f_0 и f_1 за $Y_n(l)$:

$$p_n(l) = \frac{q_n(l)f'_1(Y_n(l))}{q_n(l)f'_1(Y_n(l)) + (1 - q_n(l))f'_0(Y_n(l))} \quad (19)$$

когато канал n е достъпен в слот l (т.е. $u_l = n$) и $p_n(l) = q_n(l)$.

- **Конкуренция / сътрудничество в многопотребителска среда.**

Когато софтуерно дефинираната радиосистема има множество потребители (лицензирани и нелицензирани), техните привилегии ще окажат влияние върху вземането на решение за достъп до спектъра. Тези потребители могат да си сътрудничат или да не си сътрудничат при достъпа до спектъра

[36],[50]. В некооперираната среда всеки потребител има своя собствена цел, докато в една кооперирана среда, всички потребители могат да си сътрудничат, за да постигнат една-единствена цел.

2.4. Въпроси за мобилността на спектъра

Функциите за мобилност на радиочестотния спектър в радиомрежа с динамичен достъп до спектъра, позволява на нелицензиран потребител да промени динамично своя оперативен спектър въз основа на промяна в околните условия на свободния спектър. Най-изследваните въпроси в мобилността на радиочестотния спектър се отнасят до превключването между наличните честотни ленти, за да се осигури плавен достъп до спектъра без прекъсване, както на приложението, така и на услугата, поради промяна в околната радиосреда [40], [43], [46].

□ *Търсене на ресурси* – основно изискване към всички мрежи забиращи се на динамичен достъп до честотни ресурси е не намеса в работата на оторизираните потребители. Ето защо е необходим механизъм за наблюдение за наличието на такива потребители, търсене на допълнителни ресурси и дефинирането им (напр. свободен, зает, неопределен, резервен, потенциален, кандидат и т.н.), както е описано в стандарт IEEE 802.22. Това налага усложняване на системата за следене и повишаване на разходите.

Наблюдението може да се извърши проактивно или по заявка [44]. При проактивния подход състоянието на наличните канали се наблюдава периодично и знанията за тези канали се актуализират непрекъснато. Когато се изисква преминаване на други радиочестоти, това знание може да бъде използвано от нелицензиран потребител, за да премине към нова честотна лента [21].

За разлика от проактивния подход, при подхода по заявка, наблюдението на канала може да се извърши само, когато нелицензиран потребител трябва да превключи своя канал, което изисква по-малки разходи, докато проактивният подход има големи разходи, поради периодичното

наблюдение. Латентността на превключване на радиочестотния спектър ще бъде по-малка в този случай.

- **Адаптиране** - Тъй като латентността, дължаща се на превключване на радиочестотния спектър, може да бъде висока, модификацията и адаптирането на другите компоненти в протоколния стек са задължителни [97]. Например, когато нелицензиран потребител превключи канал, ТСР таймерът на транспортния слой може да бъде замразен, за да се избегне неправилно тълкуване на забавянето, необходимо за получаване на съобщението за потвърждение. Оптимизирана рамка за адаптиране на протоколите трябва да бъде разработена, за да се решат въпросите свързани с мобилността на радиочестотния спектър.

- **Самостоятелно съвместно съществуване и синхронизация.**

Когато нелицензиран (или вторичен) потребител изпълнява предаването на радиочестотния спектър, трябва да се вземат предвид два въпроса. Първо, целевият канал в момента не трябва да се използва от друг вторичен потребител (това е изискване за самостоятелно съвместно съществуване), а приемникът в съответната вторична връзка трябва да бъде уведомен за промяната в спектъра (това е изискване за синхронизация) [117]. За реализиране на самостоятелно съвместно съществуване може да се използва посредник на радиочестотния спектър, който да управлява разпределението на радиочестотния спектър. Когато такъв посредник не е наличен в системата, тази реализация е предизвикателство за проектантите. За да се реализира синхронизацията, MAC протоколът трябва да бъде проектиран с обезпечаване на обмен на информация за промяна на спектъра [21].

2.5. Динамичен достъп до спектъра.

2.5.1. Модели за споделяне на спектър.

Колективното използване на спектъра позволява на неограничен брой независими потребители и / или устройства да имат достъп до спектъра в същия диапазон на определените честоти на колективните потребители

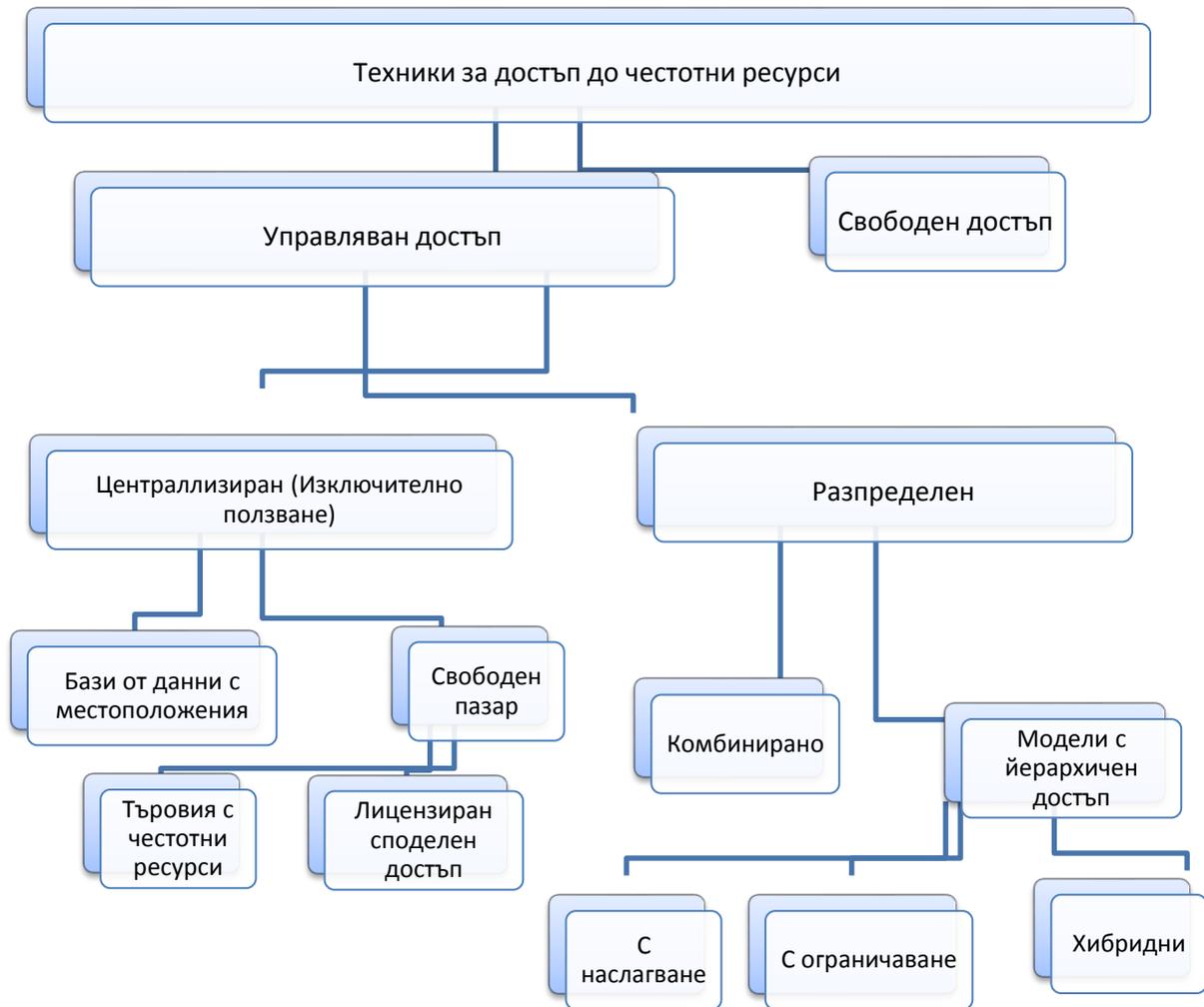
едновременно и в конкретния географски регион при предварително дефиниран набор от условия.

Съществуват три основни модела за управление на спектъра [54], както е показано на фигура 13. При модела за изключително ползване, лицензирания потребител притежава изключителни права върху ресурсите.



Фигура - 13 Модели за динамичен достъп до спектъра

Реализацията на тези модели се базират на софтуерно дефинирани радиосистеми (SDR) и когнитивно радио [29] и според техниките за достъп до честотни ресурси се класифицират, както е показано на фиг14.



Фигура - 14 Способи за достъп до честотния спектър

Известни са различни методи за динамично разпределение на спектъра базирани на търговия, споделяне и йерархичен достъп, някои от тях използвани в радиосистеми, работещи по стандарт IEEE 802.22, 5G, IEEE 802.11ax и други, но най-общо задачата за динамичен достъп до честотните ресурси може да бъде решена, както беше показано на фиг8.

2.5.2. Изисквания при споделяне на ресурси

При моделите за динамичен достъп до честотни ресурси и особено при лицензирания споделен достъп се предявяват следните изисквания към потребителите:

- липса на експлоатационни ограничения за основния лицензополучател;
- да няма вредни смущения между първичния и вторичните потребители, когато работят заедно;
- ясно дефинирани местоположения.

За разпознаване на неизползван спектър и откриване на незаети канали, при запазване на ниска граница на интерференция се използват следните методи [121]:

- определяне на спектъра въз основа на измервания;
- използване на база данни за географски местоположения;
- използване на радиомаяци.

1) Определяне (разпознаване) въз основа на измерване

При този метод, когнитивното устройство, на базата на извършените измервания за всеки потенциално достъпен канал определя наличието на радиосигнали, които имат разрешение за работа (първичен потребител). Ако няма такива сигнали, тогава каналът се счита за свободен. Ако каналът е дефиниран като неактивен, разпознаването се прилага към съседни канали, за да се установят границите на мощност.

Кооперирано разпознаване е налице, когато когнитивните устройства споделят резултатите от извършените измервания, с цел подобряване на надеждността.

При всички техники за определяне наличието на сигнали остава проблемът от неправилно вземане на решение вследствие погрешно зададен праг, неправилен избор на техника за откриване или разполагане на детекторите (градска среда). Кооперирането може да реши този проблем, но при такъв тип следене се явява проблем със забавяне при обмен на информация с центъра, който координира и взема решение за достъп, а това може да доведе до забавяне на работата на системата като цяло. Ето защо е много важно да се избере праг, който да увеличи максимално вероятността за правилно откриване при фиксирана вероятност за фалшива аларма.

2) Използване на база данни за географски местоположения

При този метод за откриване на свободни канали, когнитивните потребители определят своите координати и се свързват към общата база данни, в която се съхранява информация за географското разположение на останалите потребители, времеви диапазон, честотен план и алгоритъм за определяне на допустимите нива на излъчваната от потребителите мощност. До получаването на разрешение от базата данни на когнитивните потребители им е забранено да излъчват, с което се цели гарантиране на електромагнитната съвместимост и надеждна работа на приоритетните услуги.

Недостатък е необходимостта от обмен на информация, за която е необходим допълнителен ресурс от честоти или жична връзка.

3) Използване на маяци

Радиомаяците представляват приемо-предавателни устройства с известни координати и могат да се използват за индикация на местоположението на първичния потребител или силата и посоката на сигнала.

Основно се използват насочени маяци и маяци за кръгов обзор и могат да бъдат:

- разрешаващи – при установяване на потребители с динамичен модел на достъп до спектъра; напр. такива могат да бъдат локално използваните телевизионни канали;
- забраняващи – каналът е зает и не може да бъде използван за когнитивна радиовръзка; напр. потребители с право на собственост върху спектъра.

Използването на маяци може да улесни работата на методите основаващи се на измервания и увеличава вероятността за откриване на сигнали при консервативни стойности на прага за вземане на решение.

2.5.3. Следене на спектъра в когнитивните мрежи

За разлика от изрази „мониторинг на спектъра“, то под „следене на спектъра“ се подразбира наблюдение на определена спектрална лента с цел преценка коя част от нея е свободна и може непосредствено да бъде оползотворена. На практика това представляват незаети честотни ленти, които не се използват от лицензираните (основни) потребители (Primary Users: PUs). Временно неизползваните времеви и честотни ресурси се наричат „спектрални дупки“ [60],[61]. Времето, през което тези дупки са налични, е много кратко и следователно един вторичен потребител (Secondary User: SU) трябва да бъде в състояние бързо да оцени дали тази част от наблюдавания спектър е свободна или не, за да може да я оползотвори рационално [52].

Основният проблем, който трябва да се реши при всеки от методите за динамичен достъп е. определяне на праг за вземане на решение [62], при който няма да се оказва влияние върху PUs или то да е минимално.

- Правилно определяне на спектралните дупки.
- Наблюдение на спектъра в реално време.

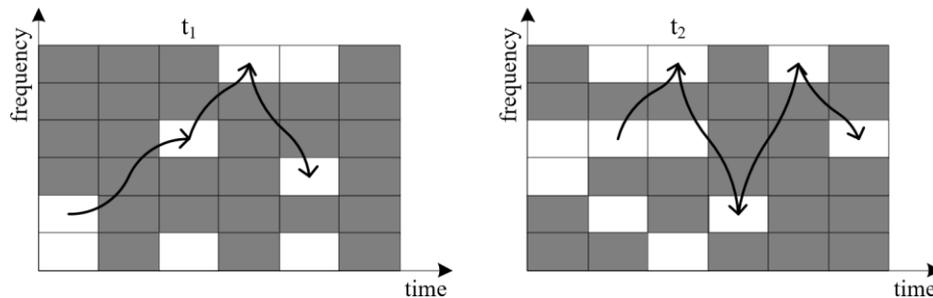
Традиционното статично разпределение на спектъра не осигурява необходимата гъвкавост и ефективно използване, поради което в някои части от него се наблюдава свръх използване, а в други неизползвани или слабо натоварени ленти. Най-общо тези места се класифицират, като [94]:

- Пространствени дупки – представляват разликата в използването на някои честоти от първични потребители в даден географски регион. Например едни ленти в гъсто населени райони с множество потребители ще бъдат силно натоварени, докато в местата с малък брой потребители ще са свободни.

- Времеви дупки – представляват използваемостта на честотните ресурси за определени часове от денонощието.

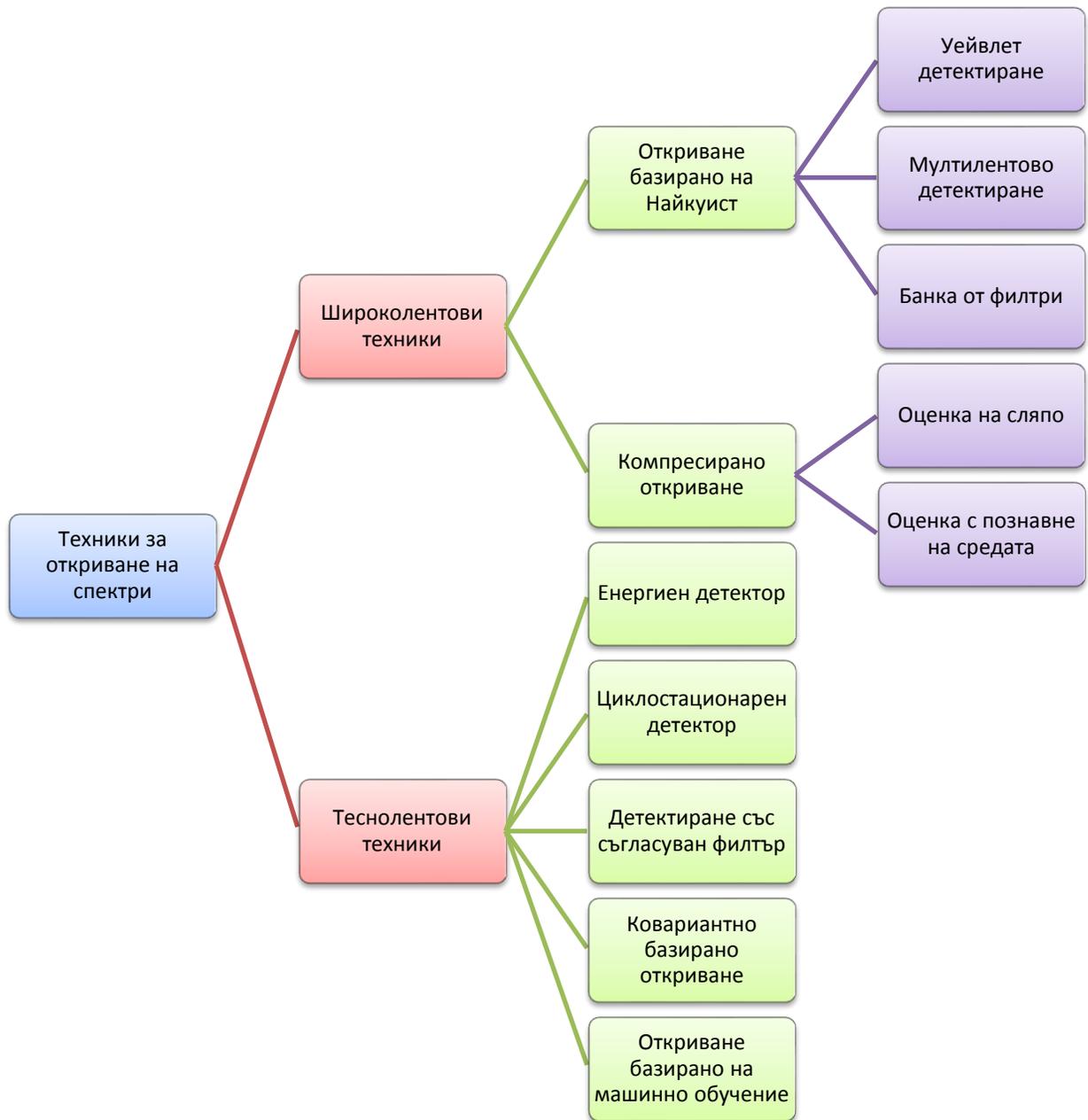
- Спектрални дупки – представляват дупки или бели места в спектъра, които могат да се дължат на вида на използваната модулация от първичните потребители, дефинирани защитни интервали с цел избягване на интерференция в клетъчни мрежи и др.

Концепцията за използването на спектралните дупки е показана на Фигура - 15 Спектрални дупки и преместване в свободни участъци от честотната лента [17].



Фигура - 15 Спектрални дупки и преместване в свободни участъци от честотната лента [17]

Оценката, която един SU трябва да направи по отношение на наличието на спектрални дупки, трябва да бъде бърза и точна, тъй като едно грешно заключение ще доведе или до възникване на интерференция за PU или до изгубена възможност за използване на свободна лента [49]. Поради тези причини възможността за точна оценка на заетостта (или следене) на спектъра е основна характеристика на софтуерно дефинираните мрежи и представлява актуална изследователска задача. Традиционните техники за следене на спектъра най-общо се разделят на широколентови и теснолентови [48], а определянето как да се извърши детекцията за наличие на сигнал най-често е чрез енергиен детектор, циклостационарен детектор, съгласуван филтър и уейвлет детектор [24]. Важно е да се отбележи, че решенията, основани на енергийното детектиране, предлагат по-проста реализация и по-малка изчислителна сложност. [26]



Фигура - 16 Класификация на техниките за откриване на спектри

Сред недостатъците на методите, базирани на съгласуван филтър и циклостационарен детектор, е необходимостта от предварително познаване на някои от характеристиките на първичните потребители, което в някои случаи не е приложимо [94]. Съществуват множество методи за следене на радиочестотния спектър, но малко от тях представят имплементация на такива

алгоритми в реална среда или намират компромис между скорост и точност на следенето [98].

В [92] е представен алгоритъм за адаптивно следене на спектъра, базиран на следене на SNR, при който за определяне наличието на сигнал, се използва единичен енергиен детектор и/или кооперативно следене на базата на енергийни детектори. При първият начин е силно зависим от смущенията на съседни потребители, докато при вторият, детекторите са пространствено разнесени и свеждат до минимум възможността от попадане в „радио сянка“ или фединг и отговарят на завишените изисквания към комуникациите в реално време.

В [93] е предложен друг алгоритъм, базиран на енергиен детектор с кооперативно следене при случаи на спешни операции в напълно непозната сложна електромагнитна среда. Проблем при кооперативното следене се явява забавянето при обмен на информация с центъра, който координира и взема решение за достъп, а това може да доведе до забавяне на работата на системата като цяло. Използването на двата метода по отделно не осигурява висока ефективност и е доказано, че вероятността за фалшива аларма, при правилно определен праг и използване на двата начина за следене на спектъра е минимална [93].

Съществуват, както либерални, така и консервативни подходи за определяне на горната граница на прага за достъп, при различни изисквания за ненамеса в работата на основните потребители. За точното определяне на този праг не е достатъчно следенето, базирано на енергиен детектор. В [23] е представен алгоритъм за кооперирано следене на спектъра за оптимално определяне на прага за достъп. Основните фактори, оказващи влияние върху правилното определяне, се явяват шума в канала, фединга и работа в постоянно изменяща се радиосреда, ето защо е необходимо следене и измерване на енергията на постъпващите в приемника сигнали и определяне на тяхната функция на разпределение в реално време. Чрез използване на

размита логика и кооперирано следене е възможно задаване на по-точен (оптимален) праг за достъп.

Оценката на представените техники за мониторинг и следене на спектъра може да се извърши според:

1) Надеждността за правилно определяне е колко прецизно един когнитивен потребител може да определи наличието или липсата на спектрални „дупки“. С други думи това може да се оцени с:

- ✓ вероятността за детектиране;
- ✓ вероятността за пропуснато детектиране;
- ✓ вероятността за фалшива аларма.

2) Времето за вземане на решение представлява общото време, което е необходимо за определяне наличието на първичен потребител.

3) Сигурност в случая представлява вероятността от ненамеса в работата на PUs.

4) Изчислителна сложност представлява общият брой на изчисленията при определяне на средата на излъчване.

5) Консумирана енергия – определя се от общата консумирана енергия от началото до края на процеса по вземане на решение.

Таблица 2 Сравнителна таблица на техниките за определяне на спектъра [94]

Показатели за сравнение	Техники				
	Кооперативна размита логика	Кооперирано препредаване в разнородна среда	Разпределено коопериране базирано на мрежово кодиране	Асинхронно коопериране	Без коопериране
Надеждност	Висока	Висока	Висока	Ниска	Ниска
Време за вземане на решение	Ниско	Средно	Средно	Високо	Високо
Сигурност	Средна	Висока	Средна	Ниска	Ниска
Сложност	Ниско	Средно	Средно	Високо	Високо
Консумирана енергия	Ниско	Средно	Средно	Високо	Високо

От направения анализ се вижда, че кооперативните техники базирани на размита логика осигуряват висока надеждност, обуславяща се от множеството когнитивни потребители, но показателите за време и консумирана енергия показват, че те са компромиса при избор на такава техника. Разпределено коопериране базирано на мрежово кодиране осигурява висока надеждност при средни показатели за време, сигурност, изчислителна сложност и консумирана енергия, което обуславя широко приложение [98].

2.6. Подход за компютърно подпомагано предоставяне на честотни канали

Още с навлизането на безжичните комуникации е осъзната необходимостта от въвеждането на регулаторни изисквания към операторите на такива системи. Функциите са сведени до планиране, разпределяне и контрол на процеса по използване на честотите.

С развитието на електронно изчислителната техника, различни по вид безжични комуникации и потребностите от интензивно използване на електромагнитния спектър води до внедряване на компютри в процеса по управление на спектъра и основните функции са допълнени с координация на честотния план, административни процедури (регистрация и издаване на лицензи), уведомления за взети решения, разпределение и др..

Към настоящият етап това е от решаващо значение за регулационните органи, които са изправени пред постоянно нарастващото използване на радиочестотите [13].

2.6.1. Рискове и ползи от компютърно подпомаганото управление на спектъра

За да се максимизират ползите от въвеждането на автоматизирано управление на спектъра и възможностите за динамичен достъп от страна на вторичните потребители, трябва да се оцени прилагането на съответния софтуер и хардуер [115] към конкретна ситуация и регулаторен орган за

управление на спектъра и предвиди алгоритъм, който ефективно да решава следните задачи:

- проверка на съответствието на исканията за присвояване на честота с националните и международни таблици за разпределение на честотите и свързаните с тях допълнителни условия;
- проверка на оборудването (предавател, приемник и антена) да са сертифицирани или отговарят на взаимно признати стандарти;
- точно задаване на диапазон от честоти, чрез избора на подходящи канали, като се отчитат характеристиките на терена;
- установяването на пълна документация и актуализиране на базата от данни, за времето и начина на използване, което осигурява и възможност за коректно таксуване;
- точна статистическа и друга електронна обработка, която да бъде достъпна от различни регулаторни органи;
- възможност за електронен обмен на данни и подаване на формуляри за уведомяване между национални и международни регулаторни органи;
- прозрачност и достъпност до актуални данни за широк кръг от потребители.

В последния случай е възможно да се обменят голям обем от данни и това да доведе до необходимостта от допълнителни ресурси за тяхното предаване и обработка. За смекчаване на този проблем не се предават всички елементи, а само необходимите за постигане на валидно изчисление на ЕМС в конкретно местоположение, като се вземат предвид плътността на радио комуникационното оборудване, предварително зададени ограничения и близост до гранични зони.

Липсата на пълен набор от нормативни изисквания с подробно описани модели, зависимости, взаимовръзки, тип и брой на интерфейсите е предпоставка за погрешно внедряване, експлоатация и последващо надграждане и интегриране на системите за автоматизирано управление на спектъра.

При компютърните системи и мрежи основните рискове са свързани с несанкциониран достъп, промяна, кражба или невъзможност за достъп до информация. За намаляване на негативните последствия от преднамерени или непреднамерени заплахи за информационната сигурност следва да се вземат допълнителни мерки, като:

- архивиране – съхраняване на актуално копие на базите данни на място, различно от оперативната база данни, т. нар. за копиране на офлайн носител и такива копия трябва да се правят през интервали – ежедневно или седмично;
- антивирусна защита – най-ефективният начин за ограничаване на рисковете от заразяване с компютърни вируси е посредством използване на антивирусни програми с актуални дефиниции и лицензиран софтуер;
- политика за достъп – използване на терминали с възможности за защита или да отговарят на изискване за автентификация;
- криптиране на обменяната информация и /или криптиране на базите данни.

2.6.2. Изисквания и формат на информацията съхранявана в бази от данни

Въпросите относно разположението на източници на електромагнитни излъчвания, тяхната мощност, вид на модулацията, диаграми на насоченост на антенните системи, вида на терена и нива на емисиите от предполагаеми източници на смущения изисква бърз и пълен набор от технически данни за динамично управлението на спектъра.

Административните и минималните технически изисквания към системите за управление на база данни [72] следва да осигуряват пълна информация относно радио средата и отговор на въпроси, като:

Колко предавателя работят в дадена честотна лента?

Какъв ефект би оказал нов предавател при разполагането му на конкретно местоположение върху съществуващ приемник, използващ същата честота?

□ От кого да се получи информация при наличие на източник на смущения?

Това налага дефиниране на понятията станция и възел.

Под *станция* се разбира наличието на електронно устройство с един или повече предаватели/приемници или комбинация от тях, включително и допълнителното оборудване, необходимо за осъществяване на радио комуникация.

Под *възел* се разбира наличието на електронно устройство в дадена комуникационна система или мрежа, където се създава, приема, предава или разпределя информацията, посредством комуникационни канали. За безжичните мрежи данните, описващи даден възел, могат да включват и честотните ленти заделени за използване, възможностите за преконфигурация, мигриране в друга честотна лента и др. и се описват в таблици заедно с обекти от подобен тип.

2.6.3. Вид на данните за управление на спектъра.

Взаимодействие между възлите се осигурява чрез релационни бази от данни, която предоставя информация относно връзките за дадена услуга, право на ползване или разполагане, като например какъв тип предавател се използва в даден географски район.

Под информация за управление на спектъра [111] се разбира, но не се ограничава до:

- изобразяване на разпределението на честотните ленти в международен план;
- национални честотни планове;
- координиране и/или уведомяване за честотни назначения в това число и орбитални позиции;
- мониторинг на заетостта на спектъра;
- определяне на характеристиките на оборудването на системата;
- използване на аналитични модели;
- достъп до нормативни документи.

Правилното разбиране на взаимовръзките между възлите и техните характеристики помага да се избегне основен проблем при поддръжката на данните – информационен излишък или съществуване на едни и същи данни на повече от едно място в базата данни. Информацията относно националните честотни планове трябва да бъде във формат, подобен на международните, така че двете бази от данни да са лесно сравними.

За постигане на висока съвместимост и ефективност на методите за електронен обмен на информация се изисква стриктно спазване на одобрени стандарти. Когато обменът на информация преминава националните граници, това са международните стандарти. Когато трябва да се обменят специализирани файлове с данни, трябва да се осигури единен формат на данните между всички потребители с възможност за надеждно извличане на информацията.

2.6.4. Топология и свързаност

Връзката между два или повече възела могат да бъдат от типа [32]:

- точка - точка – промяна в параметрите на един възел ще окаже влияние върху един друг възел;
- точка към множество точки – промяна в параметрите на един възел ще окаже влияние върху множество възли, които могат да са основни държатели на лиценз;
- всеки с всеки – промяната в параметрите на един възел ще окаже влияние върху множество потребители, които използват взаимно свързани честотни ленти и услуги.

Под *разпределени честоти* (честотна лента) се разбира всеки запис в таблицата на честотните назначения за даден честотен обхват с цел използването му от една или повече наземни, космически или радиоастрономически комуникационни услуги при определени условия.

Под *назначение на честоти* се разбира всяко разрешение, дадено от регулационен орган за използване на радиочестоти или радиочестотен канал при определени условия.

Използваните база данни и автоматизирани способности за управление на спектъра трябва да са в състояние аналитично да създават карта на радио покритието. За създаването на такава карта и оценка на смущенията и определяне на нива на емисиите в произволна точка от местността не е достатъчно да са известни само честотата, нива на излъчваната мощност, височината и типа на антената и разстоянието до предавателя.

Трябва да се имат предвид и други фактори, като вид и структура на терена, растителност, сгради, диелектрична и магнитна проницаемост, многолъчевост и др.

За контрол на предварително зададените норми се използват станции за мониторинг, които измерват заетостта на спектъра и наблюдават нивата на електромагнитни емисии и тяхното съответствие с националните и международни разпоредби и лицензионни условия, както и идентифицират източници на неразрешени емисии и смущения [116].

Примерен вариант на данните за споделяне е показан в таблица 3.

Таблица 3 Формат на данни

Честота MHz	Канал №	Наименование на станцията	Мощност	Географска ширина	Географска дължина	Местоположение	Условно наименование (позивна)
...

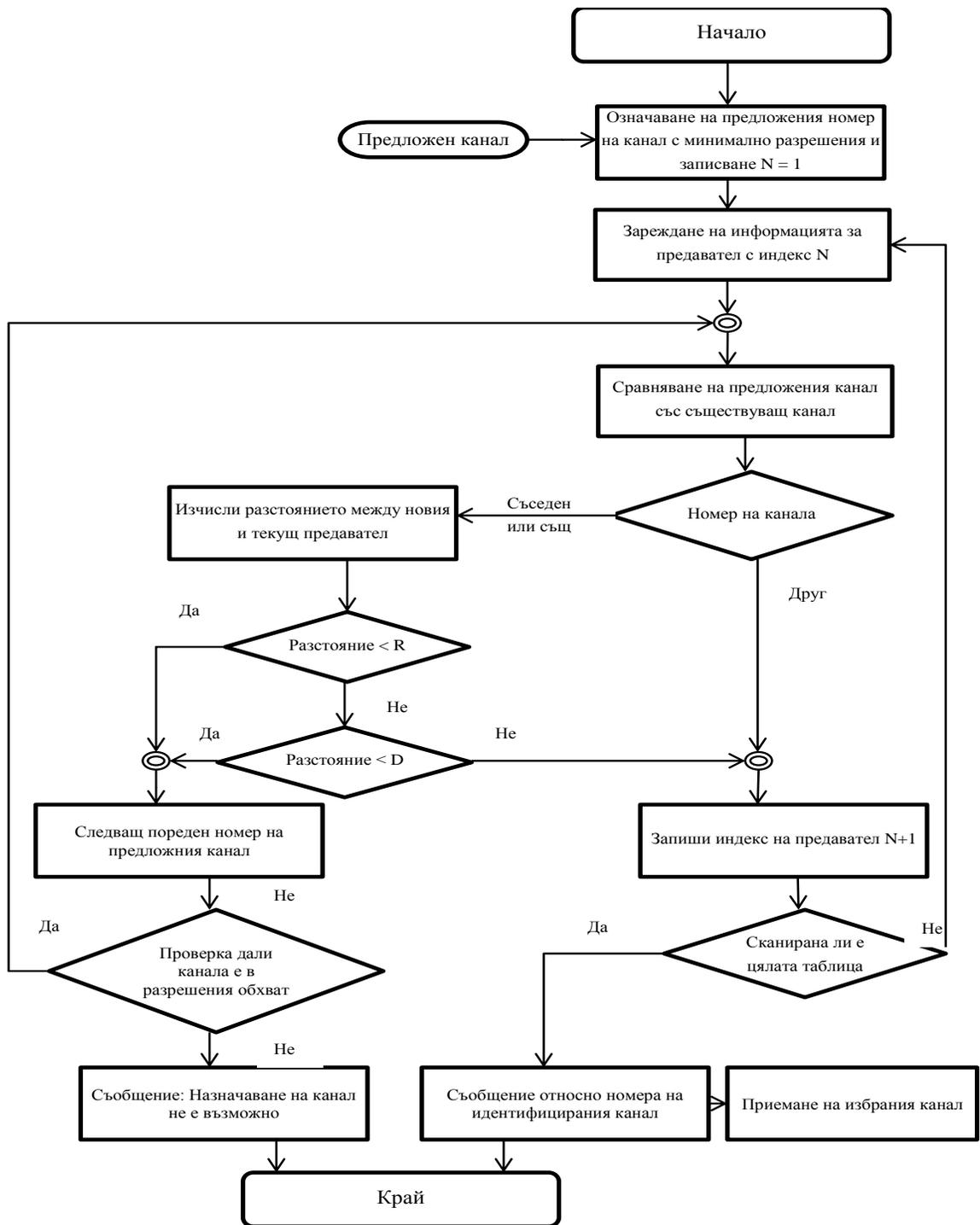
Вид на антената	ДНД	Височина на антената	Поляризация	Надморска височина	Профил на терена
...

2.6.5. Алгоритми за назначаване на честоти и канали

На базата на записите в таблицата лесно могат да се въведат критерии за едновременно използване [32] на съседни честоти или канали, например минимално разстояние или защитни интервали.

Критериите от този тип са лесни за прилагане и са широко използвани при планиране и внедряване на клетъчни мобилни радиокомуникационни системи.

Нека разстоянието между два предавателя, които използват съседни канали да бъде означено с R и с D тези, които използват една и съща честота или канал, тогава алгоритъмът [88] за назначаване на канал ще има вида:



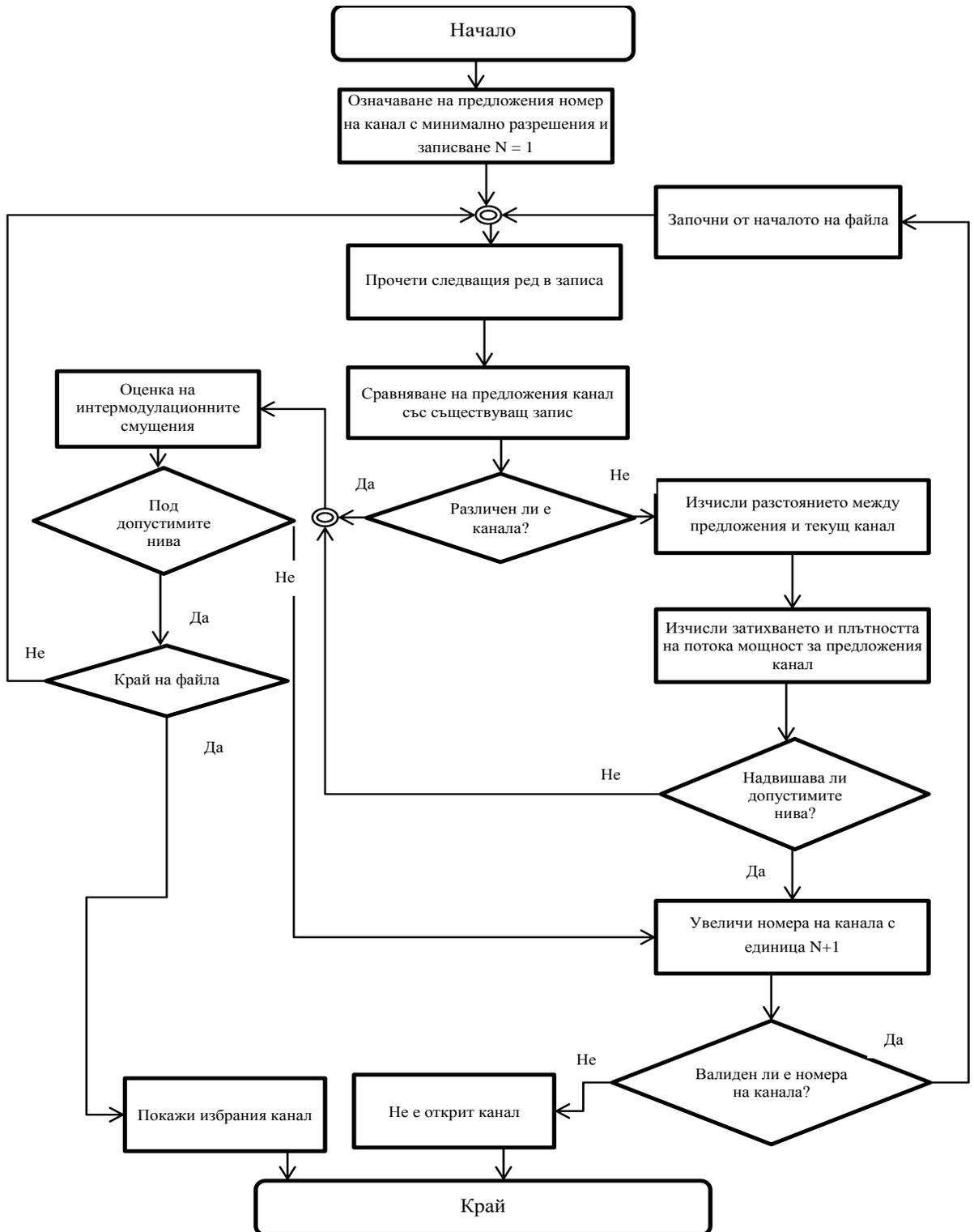
Фигура - 17 Алгоритъм за назначаване на канали

Възможно е да се извърши избор на честоти, като се използват по-подробни критерии за споделяне, като се отчете общата излъчена мощност от всеки предавател.

Например, ако е въведен критерий за забрана назначаването на предаватели, които ще генерират спектрална плътност на мощността, надвишаваща определена стойност в конкретни местоположения, следва да се има предвид излъчената мощност на всеки предавател, затихването по линията за връзка, разстоянието до предавателя, насоченост на антените и др.. Задачата за изчисляване на затихването е комплексна и зависи най-вече от разсейването/ поглъщането на енергията при разпространение в свободното пространство. Описва се със сложни математически модели на базата на статистически изследвания за определен период от време.

Обикновено концентрацията на радио предаватели и антените им в местата за разполагане е висока и промяната в параметрите на един от тях може да доведе до интермодуляционни смущения в останалите. Подобно усложняване изисква висока изчислителна мощност и допълнителни канали за обмен на служебна информация, поради което в показания алгоритъм се извежда съобщение „Не е възможно назначаване на канал“.

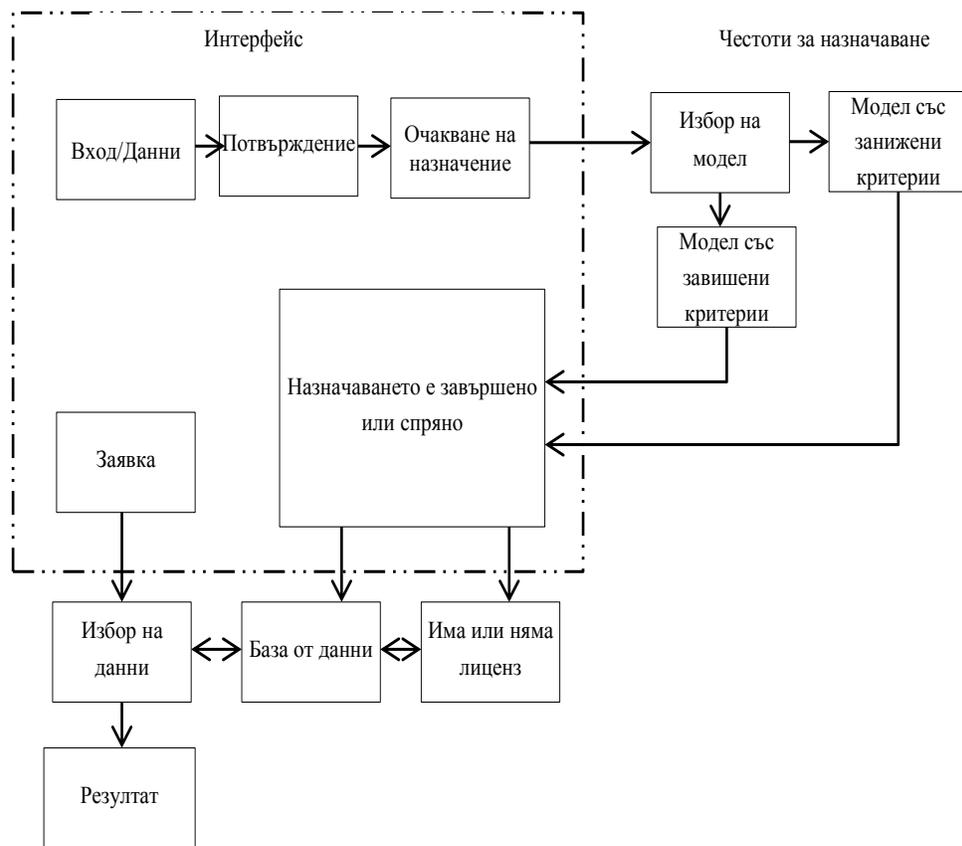
На фиг.18 е показан подход за автоматизирано вземане на решение с отчитане критериите за мощност и нива на интермодуляционните смущения [89].



Фигура - 18 Алгоритъм за назначаване на канали с отчитане на смущенията

Повторното използване на честоти при клетъчните комуникационни системи е отчетено при тяхното планиране, изграждане и експлоатиране, но е необходимо да се вземат мерки за ограничаване на взаимното влияние при припокриващи се зони и осигуряване на механизъм отчитащ допустими нива при съвместно използване на канали.

На фигура 19 е показан вариант за назначаване на честоти за мобилни потребители, използващ база от данни, в която лесно могат да бъдат добавяни нови потребителски данни или промяна на съществуващите записи. Автоматично се изчислява какво въздействие ще окажат назначените честоти върху останалите базови станции [37]. Процедурата по предварително сканиране използва всички възможни канали и назначава тези, които имат минимално застъпване и са проектирани така, че да максимизират повторното използване на канали, което води до по-ефективно използване на честотния спектър.



Фигура - 19 Алгоритъм за назначаване на честоти на базова станция

Тази процедура включва следните функции:

- поддържане на база данни на потребителските услуги, технически параметри и административни особености;
- извършване на проверки за валидиране, с което се гарантира, че данните са приемливи за системата;
- присвояване на честоти за приоритетни потребители или услуги на базата на изчисления (необходим е достъп до данните за терена) на напрегнатостта на полето в зоната на обслужване на базовата станция и запазване на допустимите приемливи нива при припокриващи се зони;
- оценка на времето за заетост на канали, които се споделят в една и съща зона;
- ако не е възможно осигуряването на свободен канал, тогава заявката се поставя в опашка;

- ако подходящ канал не може да бъде намерен, неуспешното задание се поставя в буфер, докато не бъде изпълнено;
- автоматично се задават графици за използване и освобождаване;
- поддържане на информационна система, в която се описва профила на покритие;
- поддържане на база от данни с източници на смущения и набор от недостъпни или резервирани канали.

2.7. Изводи по глава втора

1. Изборът на ресурси (каналы) в многопотребителска среда следва да отговаря на изискванията за следене на границата на интерференция при внимателен подбор на периодите на следене и използване, за да се постигне оптимална производителност на системата при хардуерните ограничения на радиоприемника.

2. Софтуерно дефинираните радиосистеми и когнитивно радио предоставят допълнителен инструмент за гъвкаво спектрално и енергоефективно използване на електромагнитния спектър и осигуряват технологично решение за използване на модели за споделен и динамичен достъп.

3. Софтуерно дефинираните радиосистеми позволяват внедряване на политики за измерване на параметрите на околната електромагнитна среда и лесно преминаване от разпределен към централизиран достъп до честотните ресурси и обратно.

4. Компютърно подпомаганите техники за мониторинг и управление на електромагнитния спектър предоставят възможности за неговото уплътняване, но запазва традиционната политика за достъп до честотни ресурси и възпира заемането им от гъвкави технологии, а оттам и ефективното използване на радиочестотния спектър.

Глава 3. Подходи за изграждане на системи за гъвкаво използване на електромагнитния спектър

3. Безжични системи със споделено използване на спектъра

Проблемът със споделено използване на честотни ресурси се проявява в по-голяма степен за мрежите, работещи в нелицензирания обхват, поради което постоянно се търсят начини за ефективно използване на средата чрез интелигентни антенни устройства, мултиплексиране, откриване на свободни ресурси, протоколи за избягване на колизии, пространствено разделяне и други.

3.1. Стандарти за споделено използване на честотни ресурси в нелицензирания диапазон

Заетите честотни ресурси в нелицензирания диапазон се променят постоянно, а в крайградските и отдалечени райони често са неизползвани напълно. В голяма степен това се отнася и за телевизионните канали - някои канали са заети от официални ползватели, намиращи се в района, докато други канали са свободни за заемане от безжични регионални мрежи WRAN (wireless region area network), като това може да се променя във времето.

Към стандартите за безжична комуникация с възможности за динамичен достъп до честотните ресурси спадат:

- IEEE 802.11 – безжична локална мрежа;
- IEEE 802.15.4m – безжична персонална мрежа;
- IEEE 802.19.1 – мрежи за съвместно използване;
- IEEE 802.22 - когнитивна безжична регионална мрежа;
- IETF протокол за достъп до бази от данни;

- Р1900 – семейство от стандартизиращи дефиниции, концепции, препоръки и добри практики за фиксирани и мобилни устройства за динамичен достъп до спектъра (IEEE 1900.1, IEEE 1900.2, IEEE 1900.3, IEEE 1900.4, IEEE 1900.5, IEEE 1900.6, IEEE 1900.7)

3.1.1. Безжична локална мрежа по стандарт IEEE 802.11

Безжичните мрежи за предаване на данни са атрибут и символ на новия век. През последните 20 години тяхната пропускателна способност се е увеличила около 100 пъти и отстъпват само на оптичните кабелни линии, но за разлика от тях физическия слой е общ за всички безжични системи.

Таблица №4 Характеристики на безжични мрежи по стандарт 802.11

Протокол	Дата на излизане	Оперативна честота	Честотна лента	Data Rate (Type)	Data Rate (Max)	Обхват (в сграда)	Обхват (на открито)
Legacy	1997	2,4GHz	20 MHz	0,9 Mbit/s	2	20	~100 метра
802.11a	1999	5 GHz	20 MHz	23 Mbit/s	54	35	~120 метра
802.11b	1999	2,4 GHz	20 MHz	4,3 Mbit/s	11	38	~140 метра
802.11g	2003	2,4 GHz	20 MHz	19 Mbit/s	54	38	~140 метра
802.11n	2009	2,4 GHz 5 GHz	20 MHz 40 MHz	130 Mbit/s	300	70	~250 метра
802.11y	2008	3,7 GHz	40 MHz	23 Mbit/s	54	50	~500 метра
802.11ac	2012	5 GHz	20,40,80 160 MHz	87,6 Mbit/s	866,7	35	~120 метра

802.11ad WiGig	2015	2,4 GHz 5 GHz 60 GHz	20,40,80 500 MHz	4,6Gbit/s	7	20	~50 до 500 метра
802.11ah	2016	2,4 GHz 5 GHz 900 MHz	20,40,80 MHz	-	-	-	~50 до 1500 метра
802.11ay	2017	60 GHz	2,16GHz	20Gbit/s	40	-	~500 метра
802.11ax	2017	2,4/5 MHz	20,40,80 160, 80 +80 MHz	1,15/9,6 Gbit/s	10	-	~120 метра

С оглед осигуряване на висока спектрална ефективност и намаляване на междусимволната интерференция и ограничаване на негативните ефекти от многолъчево разпространение в съвременните широколентови безжични комуникационни системи намират широко приложение [30] технологиите за множествен достъп, базирани на принципа на ортогонално честотно разделяне на каналите (*Orthogonal frequency-division multiplexing*).

Както е известно, OFDM сигналите се формират чрез N хармонични подносещи честоти, които са разделени с честотни интервали с еднаква ширина Δf . По-конкретно, цялата честотна лента ΔF , заемана от един OFDM сигнал, е разделена на N честотни подканала с ширина $\Delta f = 1/T_s$, където T_s е продължителността на символния интервал. Следователно, $\Delta F = N\Delta f = N/T_s$. За разлика от останалите стандарти от семейство 802.11, стандарт 802.11ax (Wi-Fi 6) има редица важни разлики, както във физическия, така и в каналния слой. Най-общо те могат да бъдат разделени в две големи групи, както е показано на фигура 20.

WLAN технологии на физическия слой

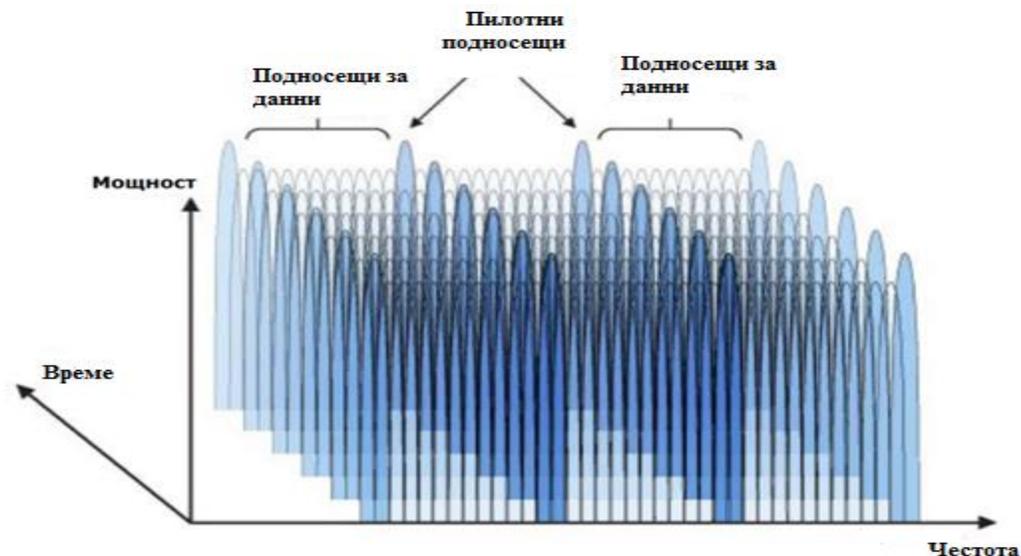
- Ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране OFDM
- Ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране с множествен достъп OFDMA

WLAN технологии на каналния слой

- Множественият достъп с разпознаване на носещата и избягване на колизии;
- Обединяване на канали;
- Заявка за изпращане/Изчистване за изпращане (RTS/CTS)
- Multiple Input Multiple Output (MIMO)
- Намалено междукадрово пространство (SIFS)

Фигура - 20 Технологии зареализирани на WLAN на физически и канален слой на OSI модела

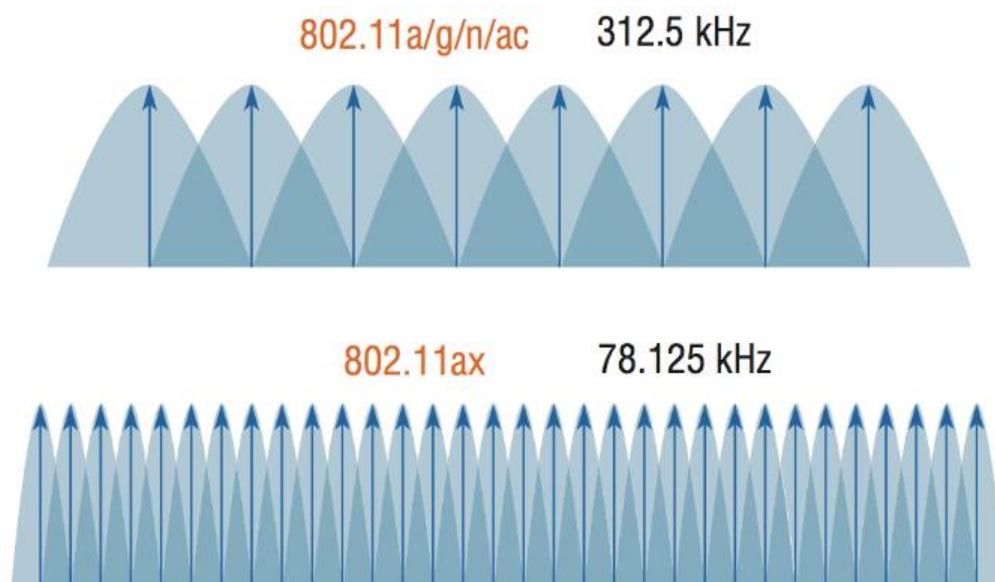
По същество OFDMA е многопотребителска разновидност на широко използваната OFDM технология за паралелно предаване на данни с честотно разделяне, като разделя комуникационния канал на подносещи, използвайки бързо преобразуване на Фурие.



Фигура - 21 Ресурсни елементи на система за безжичен достъп, работеща на принципите на OFDM [67]

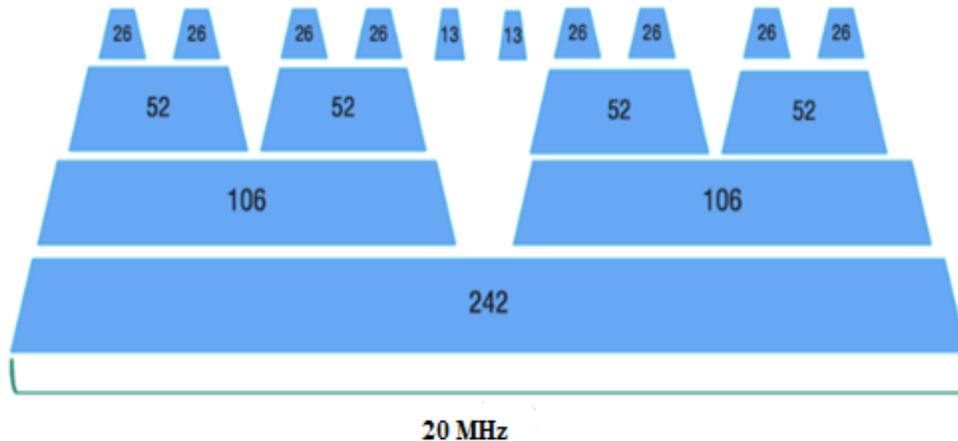
3.1.2. Структурата на канала за предаване на данни, базирана на OFDMA.

Пилотните подносеци са проектирани да синхронизират предавателя и приемника [71]. Разположени са плътно една до друга и носят голямо количество информация, без да изискват разделяне на честотни ленти. Това лесно се забелязва при разглеждане на фигура 22 и сравнение на наследствени 802.11 стандарти с 802.11ax.



Фигура - 22 Ширина на подносеците [71]

Ортогоналността позволява на приемника да разпредели всяка подносеца от канала – това са така наречените ресурсни елементи. Възможно е да има и разлика в броя на ресурсните елементи и подносеците. Например за IEEE 802.11 ax в един 20 MHz канал може да има до 256 подносеци от които са разпределени 242 ресурсни единици, докато IEEE 802.11ac може да има само до 64.



Фигура - 23 Разпределение на подносещите за различни ширини на канала за система по стандарт 802.11 [71]

3.1.3. Функции предоставяни от OFDMA в IEEE 802.11 ах

1) Ресурсно разпределяне

На този етап най-вероятен сценарий на използване на WiFi е обществена или офис среда с оборудване съвместимо с 20 MHz канали, което позволява гъвкаво да се конфигурира честотната лента с еднакво разпределяне или прехвърляне на целия канал към един потребител, ако е необходимо. В този случай IEEE 802.11 ах достъп може се осигури на до девет (дванадесет за експериментални цели) потребителя едновременно при минимизиране на потенциалните проблеми със смущенията и подобрена максимална производителност [66],[68].

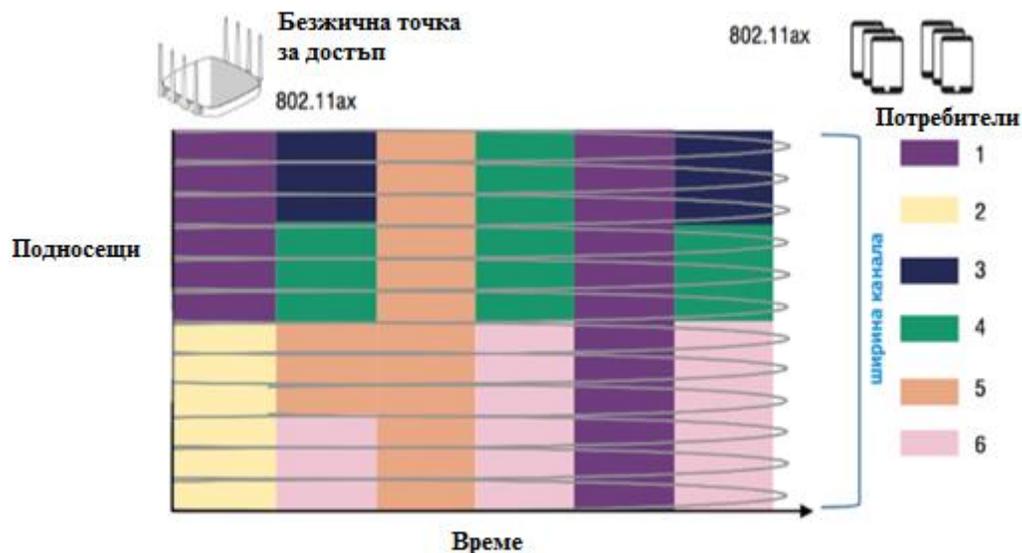
В [68] е описан процеса на разпределяне на ресурсите за 20 MHz канал съдържащ 242 подносеци, е разделен на два канала от по 106 подносеци, които при първото предаване изпращат данни до потребители с номера 1 и 2.

При второто предаване точката за достъп разделя канала на четири отделни подканала с 52 подносеци и изпраща данни до потребители 3, 4, 5 и 6.

При третото предаване OFDMA може да изпрати цялата мощност на канала с 242 подносеци към потребител 5.

Четвъртото предаване е насочено към потребители 4 и 6, петото е насочено към потребител 1, шестото отново споделя канал между потребители.

По този начин OFDMA ефективно използва целия канал от 20, 40, 80 и 160 MHz в многопотребителски режим.



Фигура - 24 Ресурсно разпределение [68]

Таблица № 5 Разпределение на ресурсни елементи в система 802.11

Ресурсни елементи	20 MHz Брой потребители	40 MHz Брой потребители	80 MHz Брой потребители	160 MHz Брой потребители	80+80 MHz Брой потребители
996(2x)	-	-	-	1	1
996	-	-	1	2	2
484	-	1	2	4	4
242	1	2	4	8	8
106	2	4	8	16	16
52	4	8	16	32	32
26	9	18	37	74	74

Ресурсно разпределение, както е представено на фигура 24 може теоретично да бъде предоставено на до 74 потребители, които да могат да се свържат към една IEEE 802.11 ах точка за достъп и това би се използвало в редки случаи за потребители с изисквания за висока скорост, но максималният капацитет на точка за достъп може да бъде полезен за свързване на устройства за интернет на нещата (IoT), които не изискват висока скорост на връзката или осигуряване на защитни интервали срещу смущения от съседни канали.

2) **Пространствено разделяне:**

Точката за достъп може да се състои от няколко радиомодула (един, два или повече), които са свързани към няколко антени. Тези антени излъчват по определена схема и предавана по безжична среда. Това позволява да се формира пространствен поток между специфична физическа антена (радиомодул) на точката за достъп и потребителското устройство. Поради това общото количество информация, предавана от точката за достъп, се увеличава пропорционално на броя на потоците (антените). Съгласно настоящите стандарти [68], до четири пространствени потока могат да бъдат реализирани в обхват 2,4 GHz и до осем в обхват 5 GHz.

Предимствата на този подход е наличието на допълнителна гъвкавост, което позволява старите абонатни устройства да работят на честота 2,4 GHz, а новите на честота 5 GHz., но с използване на трети и следващите радиомодули възникват усложнения поради склонността на всяко устройство да създава взаимни смущения, което увеличава неговата цена поради необходимостта от по-добър дизайн и оборудване на точката за достъп с компенсационни филтри.

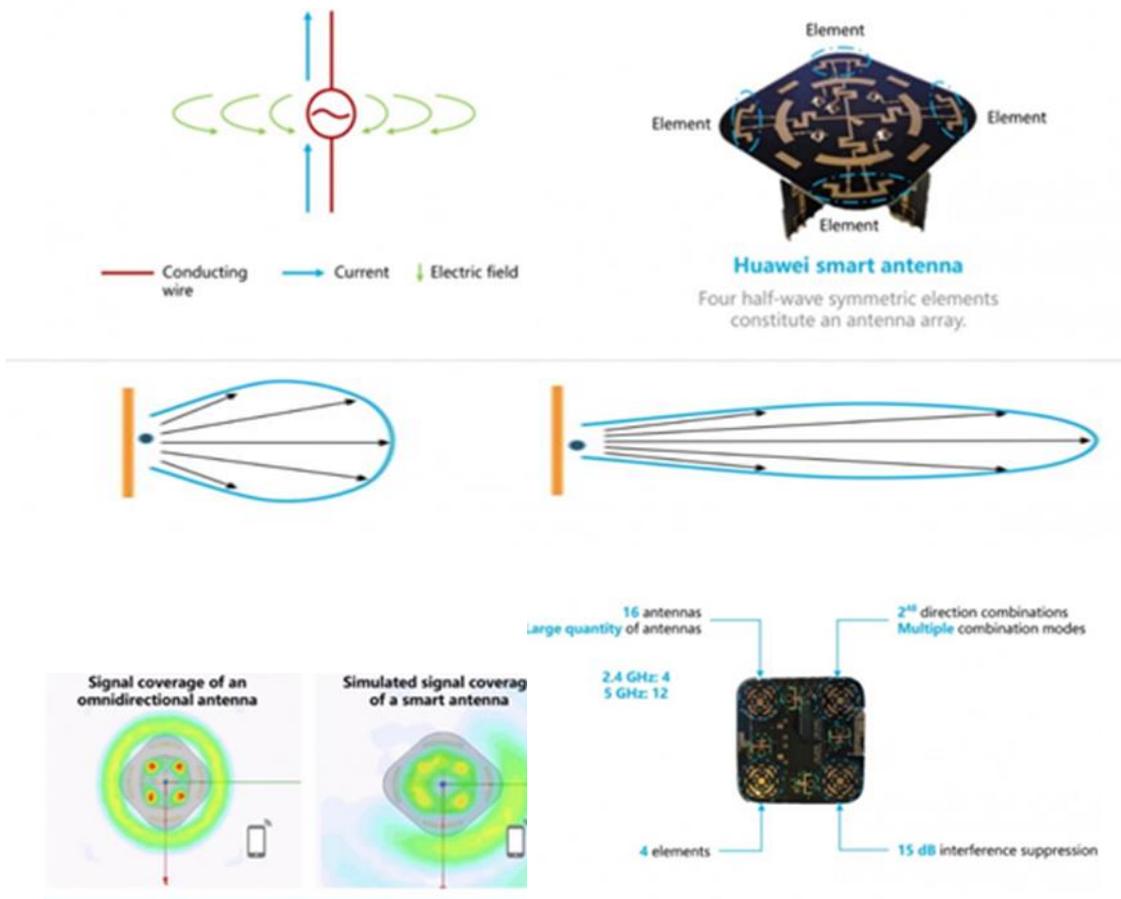
Към настоящия етап е възможно да се поддържат до 12 (до четири за обхват 2,4 GHz и до осем за обхват 5 GHz) пространствени потока едновременно за една точка за достъп.

3) **Усъвършенствани антенни системи**

За намаляване на взаимните смущения и реализиране на концепцията за пространствено разделяне се налага използването на управляеми антенни елементи, които да позволяват динамична промяна в пространствения модел на разпространение на сигнала в реално време [68].

На фигура 25 е представена антена и диаграма на излъчване. Чрез увеличаване на силата на сигнала би могло да се промени само радиуса на покритие без възможност значително да се повлияе на качеството на използване на канала. Редица производители сред които и Хуауей разработват интелигентни антенни системи с възможност за промяна на диаграмата, посредством използване на голям брой малки антени.

Натоварването върху тях може да се регулира в реално време, образувайки модели на разпространение в зависимост от пространствената позиция на потребителя [114], а това позволява генериране на потоци към отделните потребители от една или няколко точки за достъп и практическа реализация в реална среда на технологията MU-MIMO (Multi-User Multiple Input, Multiple Output) [67].



Фигура - 25 Формиране на пространствен поток [68]

3.1.4. Множествен достъп с разпознаване на носещата и избягване на колизии (CSMA/CD)

Представлява протокол, допускащ, че всички възли в мрежата са равноправни, като им позволява да предават по общата комуникационна среда (шина), състезавайки се помежду си. Методът се основава на възможността всеки възел да разпознава кога шината е заета или свободна.

След получаване на заявка за предаване от протоколите на горните слоеве, CSMA/CA протокола формира кадър, който се предава в двете посоки по шината. В същото време друг възел може също да изпрати кадър в шината, възниква конфликт (колизия) между двата кадъра, в следствие на което се получава деформация на сигнала. За избягването му се използват мрежовите

адаптери. При възникване на конфликт по мрежата се предава специален заглушаващ сигнал. Всеки възел, участвал в конфликта, изисква различен интервал от време преди да изпрати отново кадъра си. След 16 неуспешни опита контролерът на мрежата предава сигнал за грешка. Общият брой на устройствата, които се съревновават за честотната лента се нарича колизионен домейн. Процедурата по предаване в свободна среда и тази по време на колизия може да се опише по следния начин:

- Главна Процедура

1. Кадърът е готов за предаване;
2. Свободна ли е средата? Ако не, изчаква се до нейното освобождаване;
3. Предаване; 4. Има ли колизия? Ако да, преминаване към колизионната процедура;
5. Успешно предаване.

- Колизионна процедура 1. Продължаване на опита за предаването;

2. Достигнат ли е максималния брой опити? Ако да, неуспех на предаването;
3. Случайно генериран период на изчакване;
4. Преминаване към точка 1.

3.1.5. RTS/CTS (Заявка за изпращане/ Изчистване за изпращане)

Представява незадължителен механизъм, използван от протокола за безжична мрежа 802.11 за намаляване на сблъсъци на кадри, въведени от възли, които могат да комуникират с безжична точка за достъп (AP), но не могат директно да комуникират с други възли, асоциирани към тази AP (проблем на скрития възел).

Заглавната част на рамката за RTS, CTS и потвърждение (ACK) съдържа контролни полета за метаданни, продължителност, информация за MAC адреса на приемника и последователност за проверка на рамката. Освен това RTS рамката съдържа MAC адреса на предавателя.

Този протокол е проектиран при предположението, че всички възли имат еднакви обхвати на предаване и не решава проблема със скрития възел.

RTS/CTS кадрите могат да причинят нов проблем, наречен проблем с открития терминал, при който безжичен възел, който е наблизо, но е свързан с друга точка за достъп [101], подслушва обмена и след това получава сигнал да се откаже и да спре предаването за времето, посочено в RTS.

3.1.6. Кратко междукадрово пространство (SIFS)

Това е времето в микросекунди необходимо на безжичния интерфейс да обработи получен кадър и да отговори с друг кадър. Това е разликата във времето между първия изпратен символ и последния приет символ. Времето SIFS се състои от закъснението в радиочастта на приемника и забавянето на обработката на MAC, което зависи от използвания физически слой [76].

3.2. Подходи за определяне на местоположението на безжични потребители

Познаването на местоположенията на активните първични предаватели позволява на вторичните потребители да предвидят потенциално „бяло петно“ [6],[7] в електромагнитния спектър и по този начин да използват по-гъвкави стратегии за споделяне на спектъра.

Предполага се, че първичните или оторизираните потребители не споделят информация относно местоположението си в централна база от данни, поради което измерванията се правят само на базата на постъпилите в приемника сигнали.

Вторичните (неоторизираните) потребители могат да работят в обхвата на първичните потребители, когато заделените честоти ресурси са свободни или не се използват напълно в даден географски район. През последните години усилията са насочени в разработването на алгоритми за оценка на спектъра в честотната и времева област, но по-малко в пространствената област.

В подхода с наслагване на спектъра множество потребители, лицензирани и нелицензирани, могат да споделят ресурсите в мрежа. Също така множество мрежи могат да съществуват съвместно, при което предаванията в една мрежа могат да интерферират с предавания в други мрежи. В такъв случай, координирано и кооперирано следене на спектъра във времевата, честотната и пространствената област се предпочита, тъй като комплексно може да се определи статуса на достъп до спектъра, зает от лицензираните потребители в различни местоположения на мрежата.

Информацията за следене на спектъра може да се използва за получаване на карта на спектъра, която може да бъде приложена от нелицензираните потребители за вземане на коректни решения за достъпа. Често за повишаване достоверността на получените данни се използва централизиран модел за обработка и съставяне на карта на източниците на електромагнитно излъчване.

3.2.1. Класификация и изисквания към алгоритмите за определяне на местоположението

За да е възможно изчисляването на конкретни параметри в мрежа с централизирана йерархия, някои приложения на безжичните когнитивни мрежи изискват сензорните възли да са наясно с тяхното положение спрямо сензорната мрежа. В литературата този проблем за определяне на местоположението или позицията на потребител се нарича локализация [116].

Освен в когнитивните мрежи, проблемът с локализацията намира широко приложение и в автономните автомобили, оказване на спешна помощ и обществена сигурност. Например точността на алгоритмите за локализация в мрежите от второ поколение е достигала до няколко стотици метра, а в мрежите от четвърто поколение до десет метра, в системите от пето поколение и по-малко, чрез използване на системите за глобално позициониране [28].

1) Класификация на алгоритмите за локализация

Определяне на позицията на даден първичен потребител е пряко свързано с понятията измерване на разстояние и определяне на положение. Това дава основание алгоритмите за определяне на позицията да бъдат класифицирани като базираци се на разстояние или положение. За разстояние може да се счита радиусът на кръг или сфера, а положението е точка в пространството, която се описва с набор от определени координати. Това може да са разстояния или ъгли във връзка с други точки, разположени локално или глобално, в трикоординатното пространство на Земята [10]. По-голямата част от съществуващите алгоритми за локализация могат да бъдат класифицирани, както е показано на следващата фигура 26 [42].

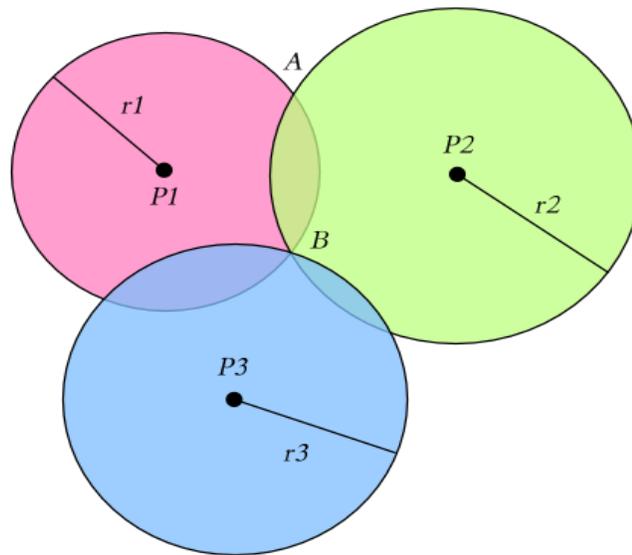


Фигура - 26 Класификация на алгоритмите за оценка на местоположението

Когато алгоритмите използват информация за разстоянието между няколко съседни възела, основните методи за определяне на местоположението на неизвестните предаватели са трилатерация (използва три известни разстояния) и триангулация (базира се на информацията за една отсечка (база) и прилежащите към нея ъгли).

По-конкретно, трилатерацията е метод за определяне на относителната позиция на обекти, използвайки геометрията на триъгълниците въз основа на известните позиции на две или повече референтни точки и измереното разстояние между обекта и всяка референтна точка. За точното и еднозначно определяне на местоположението на точка от 2D равнина само с трилатерация, обикновено са необходими най-малко 3 отправни точки (най-

малко 4 точки са необходими в 3D равнина). Недостатък е необходимостта от допълнителен хардуер, повишени енергийни и изчислителни разходи.



Фигура - 27 Определяне на местоположение посредством трилатерация

Алгоритмите за определяне на местоположение, които се базират на свързаност, се наричат алгоритми за близост или свързано базирани. Те осигуряват груба точност, но при голям брой радиомаяци с припокриващи се области на предаване е възможна по-точна локализация. Същевременно са стабилни по отношение на флуктоациите в канала за връзка тъй като информацията за близост до друг радиомаяк се взема за дълъг период от време.

Според йерархията на управление могат да бъдат с централизирано или разпределено управление. При централизирания подход управляващото устройство, наричано сензорен контролер (например точка на достъп или базова станция), получава информация от отделните устройства и посредством централен процесор изчислява местоположението. Недостатък е необходимостта от служебни канали за обмен, повишени изисквания към мощността на захранващите батерии, зависимост от изправността на

сензорния контролер, възможно е също и получаване на големи закъснения. Не е подходящ при изграждане на ad-hoc мрежи.

При разпределения подход се извършва локална обработка, но е необходима информация от съседни възли и радиомаяци, за да могат да определят тяхната позиция. При този подход се избягват недостатъците на централизирания подход, но за сметка на по-неточното определяне на местоположението.

2) Изисквания към алгоритмите за локализация

Изискванията, предявявани към алгоритмите за определяне на местоположението, са [5]:

- да осигуряват висока точност;
 - възлите да могат да определят своята позиция за възможно най-кратко време;
 - да имат възможности за добавяне и премахване на възли –
- Масшабируемост на сензорната мрежа;
- да запазват работоспособността си при влошаване на електромагнитната обстановка;
 - да осигуряват възможност за автоматична пренастройка и селектиране на сигналите, представляващи интерес;
 - ниска консумирана енергия;
 - да бъдат адаптивни по отношение на промяната в броя на маяковите възли – ако броят на наличните маякови възли се промени, алгоритъмът все още трябва да може да предоставя оценки на местоположението. Точността на оценките на възлите обаче се променя с промяна броя на налични маякови възли;
 - да бъдат универсални, така че да може да изчислява местоположенията на възлите при всякакви условия на променяща се среда и време.

3.2.2. Методи за оценка на местоположението

В алгоритмите за определяне на местоположението, базирани на обхват, информацията относно разстоянието до даден елемент на мрежата е от критично значение. По тази причина оценката на някои или няколко от параметрите на постъпващите в антената сигнали е важна. Такива параметри [2],[112] могат да бъдат:

- мощност на приетия сигнал (RSS- Received Signal Strength) – силата на постъпилите в приемната антена сигнал;
- време на пристигане (ToA). Разстоянието между предавателя и приемника се равнява на “времето на полет”, т.е. времето за предаване на сигнали, които се разпространяват със скоростта на светлината. Разстоянието може да се определи чрез измерване на времето на пристигане (ToA – Time of Arrival) на сигнала в приемника, когато съществува синхронизация между таймерите на предавателя и приемника;
- разлика във времето на пристигане TDoA-Time Diference of Arrival) – използва се разликата във времената на приетите сигнали от различни точки с предварително известни координати [118];
- ъгъл на постъпване (AoA) – представлява техника за обработка на сигнала, която извършва оценка на местоположението на постъпващите от кореспондента електромагнитни вълни [118].

3.2.3. Подход за приложение на информацията за пространственото разположение на потребителите за подобряване на използването на електромагнитния спектър

От изложеното дотук ясно се вижда, че методите за определяне на пространственото положение на оторизираните потребители на радио-комуникационни мрежи бързо се развиват. Същевременно областите на практическото им използване все още не са класифицирани и изследвани достатъчно задълбочено. Предвид тази ситуация, по-нататък в настоящия параграф ще бъде обоснован подход за приложение на информацията за пространственото разположение на оторизираните потребители на радио-

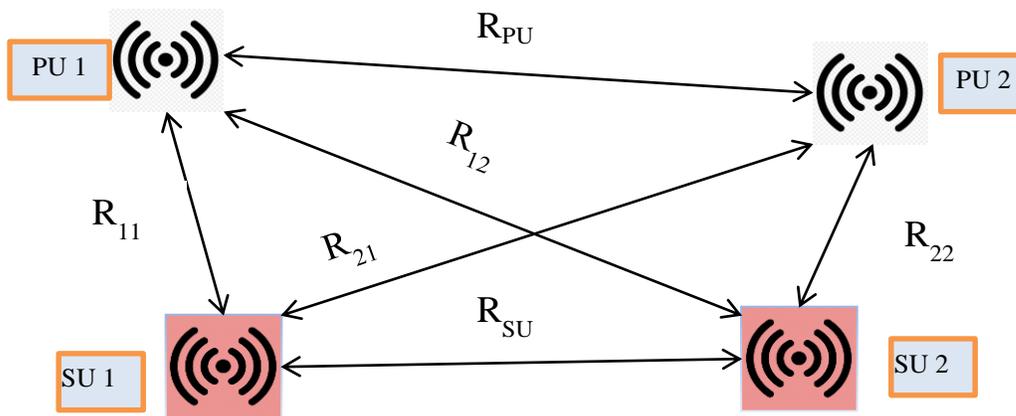
комуникационните мрежи, насочен към подобряване ефективността на използване на ограничения природен ресурс – електромагнитния спектър.

По-конкретно, нека оторизирани потребители (primary users) на някаква радио-комуникационна мрежа са $PU 1$ и $PU 2$ (фиг. 28). Освен това се предполага, че използвайки методите от предходния параграф, специализирана измервателна апаратура и методите на изкуствен интелект [18] за обработка на информация, неоторизирани потребители (secondary users - $SU 1$ и $SU 2$) са измерили с достатъчна точност следните параметри:

П 1) Географско местоположение на $PU 1$ и $PU 2$;

П 2) Мощност на сигналите P_{PU} [W] излъчвани от предавателите на $PU 1$ и $PU 2$, ширината на честотната им лента F [Hz], както и скоростта на предаване на информацията $I_{r_{PU}}$ [$\frac{b}{s}$];

П 3) Спектрална плътност N_{n0} [$\frac{W}{Hz}$] на шумовете в текущия времеви момент.



Фигура - 28 Сценарий за разполагане на двойка първични и двойка вторични потребители

Както е известно, мощността на излъчваните от предавателя сигнали намалява обратно пропорционално на изминатото от тях разстояние. По принцип това дава възможност на оторизирани и неоторизирани

потребители да използват едновременно честотната лента F [Hz] без да си създават взаимни електромагнитни смущения, ако мощността на сигналите P_{SU} на вторичните потребители е избрана адекватно.

Действително, въз основа на П 1 вторичните потребители изчисляват разстоянията $R_{PU}, R_{11}, R_{12}, R_{21}, R_{22}$. С R_0 ще бъде означено минималното разстояние между всички двойки „оторизиран потребител – неоторизиран потребител“:

$$R_0 = \min\{R_{11}, R_{12}, R_{21}, R_{22}\}. \quad (20)$$

Следователно, максималната мощност на сигналите на неоторизираните потребители на входа на приемниците на оторизираните потребители ще бъде

$$N_{SU} = \frac{P_{SU}}{4\pi R_0^2}. \quad (21)$$

Аналогично, мощността на сигналите на оторизираните потребители на входа на приемниците на оторизираните потребители ще бъде

$$P_{recPU} = \frac{P_{PU}}{4\pi R_{PU}^2}. \quad (22)$$

Като се използва Теоремата на Шенън-Хартли [20], въз основа на П 2 може да се изчисли капацитетът C на канала в текущия времеви момент:

$$C = F \log_2 \left(1 + \frac{P_{recPU}}{N_n} \right). \quad (23)$$

Ако $C > I_{rPU}$, тогава (без да пречат на оторизираните потребители) неоторизираните потребители могат да използват сигнали с мощност P_{SU} , определена от условието

$$I_{rPU} = F \log_2 \left(1 + \frac{P_{recPU}}{N_n + N_{SU}} \right). \quad (24)$$

Следователно

$$\begin{aligned}
 I_{r_{PU}} &= F \log_2 \left(1 + \frac{P_{recPU}}{N_n + N_{SU}} \right) \Rightarrow \frac{I_{r_{PU}}}{F} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{recPU}}{N_n + N_{SU}} \right) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow 2^{\frac{I_{r_{PU}}}{F}} = 1 + \frac{P_{recPU}}{N_n + N_{SU}} \Rightarrow N_n + N_{SU} = \frac{P_{recPU}}{2^{\frac{I_{r_{PU}}}{F}} - 1} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow N_{SU} = \frac{P_{recPU}}{2^{\frac{I_{r_{PU}}}{F}} - 1} - N_n
 \end{aligned} \tag{25}$$

След като се отчете (25) в (21) се установява, че допустимата мощност на сигналите на неоторизираните потребители, при която не се влошава скоростта на предаване на информацията между оторизираните потребители, е

$$P_{SU} = \left(\frac{P_{recPU}}{2^{\frac{I_{r_{PU}}}{F}} - 1} - N_n \right) 4\pi R_0^2. \tag{26}$$

Тъй като разстоянието R_{SU} между неоторизираните потребители е известно за тях, от (21) се вижда, че мощността на сигналите на входовете на техните приемници, е

$$P_{recSU} = \frac{P_{SU}}{4\pi R_{SU}^2}. \tag{27}$$

Следователно, скоростта на предаване на информацията, която може да постигнат неоторизираните потребители в текущия времеви момент, е

$$I_{r_{SU}} = F \log_2 \left(1 + \frac{P_{recSU}}{N_n + N_{PU}} \right). \tag{28}$$

3.3.Изводи по глава трета

1. Безжичните комуникационни мрежи за динамичен достъп до честотните ресурси представят възможности за създаването на самонастройващи се, адаптивни, самообучаващи се, високоефективни комуникационни мрежи и могат да смекчат проблема с честотно предоставяне на канали в многопотребителска среда.

2. Информацията за разположението на източниците на електромагнитно излъчване е от ключово значение за подобряване използването на електромагнитния спектър. Методите за определяне на местоположение на базиращи се на ъгъла на постъпване в антената (информацията за изменение на фаза, амплитуда или честота) имат значителни предимства пред тези за измерване на приетата мощност, но трябва да се отчитат и характеристиките на изследваните сигнали, влиянието, което средата оказва (многолъчевост), тяхната сложност и разходи за внедряване.

3. Безжичните локални мрежи изградени по стандарт IEEE 802.11 са проектирани да разпределят ресурси между потребителите и са подходящи за използване от вторични потребители базиращи се на подхода описан в параграф 3.2.3 с оглед максимизиране на критерия за ефективност при спазване на предварително зададени ограничения.

Глава 4. Подходи за реализиране на софтуерно дефинирани радио-комуникационни системи чрез ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране

4. Подходи за използване на получената информация от работната среда за реализиране на софтуерно дефинирана система с динамично използване на ресурси

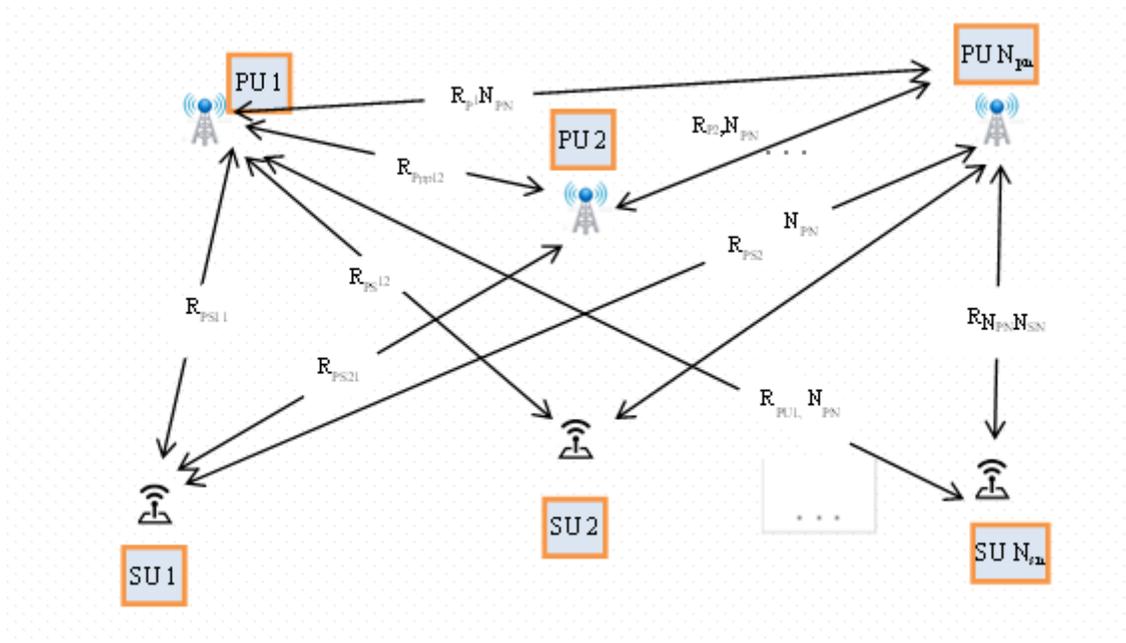
Създаването на радио комуникационна мрежа базирана на софтуерно дефинирано радио (SDR РКМ) в екстремални условия като: разгръщане на военни контингенти при международни кризи, провеждане на спасителни операции при природни бедствия и техногенни аварии, проследяване и противодействие на наркотрафиканти, терористични групи и др. има голямо значение за въоръжените сили, полицията и гражданската защита. В такива ситуации основното изискване към SDR РКМ е осигуряването на шумозащитени и сигурни комуникации. Предвид на това, в настоящата глава се решават пета и шеста задачи на дисертационния труд, свързани с изграждането на шумозащитени и сигурни комуникации чрез прилагането на различни сигнали със сложна вътрешна структура, криптографски инструменти, както и специализирани протоколи за обмен на съобщения.

Изложението в параграфа е структурирано както следва. Първо, въз основа на анализите, направени в глава II и глава III на дисертационния труд, е обоснован алгоритъм за приложение на информацията за пространственото разположение на потребителите в процеса на автоматизирано управление на радио-комуникационни мрежи (РКМ), реализиращи концепцията на SDR чрез OFDM. Второ, анализират се основните физически свойства на сложните сигнали, осигуряващи скритост и сигурност на комуникациите. Трето,

разработена е компютърна лаборатория за анализ и синтез на сложни комплементарни фазово манипулирани (ФМ) сигнали. Четвърто, обоснован е подход за изграждане на SDR ПКМ чрез използване на технологията OFDM и сложни комплементарни сигнали.

4.1. Алгоритъм за приложение на информацията за пространственото разположение на потребителите в процеса на автоматизирано управление на софтуерно дефинирана радио-комуникационна мрежа, реализирана чрез ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране

Въз основа на анализите, направени в глава II и глава III на дисертационния труд, в настоящия параграф се обосновава алгоритъм за изграждане на радио-комуникационни мрежи (ПКМ), реализиращи концепцията на SDR чрез OFDM.

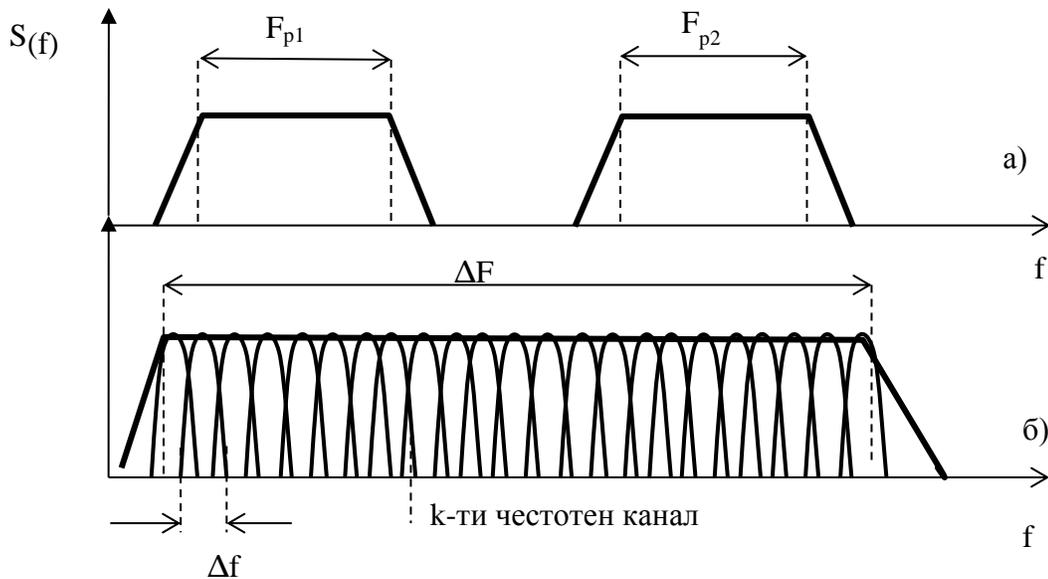


Фигура - 29 Обща геометрична структура на позициите на потребителите на първичните и на вторичната SDR ПКМ

По-конкретно, нека потребителите (primary users) на вече съществуващите РКМ (primary networks - PNs) са $PU 1, PU 2, \dots, PU N_{PN}$, а потребителите (secondary users) на SDR РКМ (secondary network - SN), реализирана на физическо ниво по технологията OFDM, са $SU 1, SU 2, \dots, SU N_{SN}$ (фиг. 29). Също така, предвид на технологиите за следене и откриване на честотни ресурси в SDR РКМ и базовите принципи на OFDM РКМ (анализирани в глава II и глава III съответно), могат да се направят следните допускания.

Д 1) Честотната лента ΔF на вторичната на SDR РКМ обхваща честотните ленти на всички първични РКМ (фиг. 30а).

Д 2) Честотната лента ΔF на вторичната SDR РКМ, реализирана на физическо ниво по технологията OFDM, е разделена на N честотни подканала с ширина $\Delta f = 1/T_c$, където T_c е продължителността на символния интервал. Следователно, $\Delta F = N\Delta f = N/T_c$ (фиг. 30 б).



Фигура - 30 Честотни ленти на първичните (а) и на вторичната SDR РКМ, реализирана на физическо ниво по технологията OFDM (б)

Д 3) В текущия времеви кадър (time frame), използвайки специализирана измервателна апаратура и методите на изкуствен интелект за обработка на информация, са измерени и/или определени с достатъчна точност следните параметри:

П 1) Географско местоположение на всеки от потребителите $PU 1, PU 2, \dots, PU N_P$ и $SU 1, SU 2, \dots, SU N_S$ на първичните и вторичната РКМ;

П 2) Мощност на сигналите $P_{P_i,k} [W], i = 1, 2, \dots, N_P, k = 1, 2, \dots, N$, излъчвани от предавателя на потребителя $PU i, i = 1, 2, \dots, N_P$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), $k = 1, 2, \dots, N$, на вторичната SDR РКМ;

П 3) Скорост на приемане на информацията $I_r(k)_i \left[\frac{b}{s} \right]$ от потребителя $PU i, i = 1, 2, \dots, N_P$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), $k = 1, 2, \dots, N$, на вторичната SDR РКМ;

П 4) Спектрална плътност $P(k)_{n_0} \left[\frac{W}{Hz} \right]$ на шумовете в k -тата честотна подлента (k -тия канал), $k = 1, 2, \dots, N$, на вторичната SDR РКМ.

По отношение на определянето на параметрите П 2 и П 3 е необходимо да се направи следното пояснение. По принцип мощността на използваните сигнали $P_{PU} [W]$ и скоростта на предаване на информацията $I_{r_{PU}} \left[\frac{b}{s} \right]$ са известни от техническата документация на съответната първична РКМ. Най-често обаче честотната лента F_P , използвана от първичната РКМ, обхваща няколко честотни подленти (честотни канали) на вторичната OFDM РКМ, чиято ширина $\Delta f = 1/T_S$ се определя от продължителността на символния интервал T_S . Ето защо в най-обща ситуация е изпълнено:

$$\frac{F_P}{\Delta f} = K_{ol} > 1. \quad (29)$$

От (29) следва, че параметрите П 2 и П 3 трябва да се изчисляват по формулите:

$$P(k)_{P_i} = \begin{cases} \frac{P_P}{K_{ol}}, & i = 1, 2, \dots, N_P, k = 1, 2, \dots, N, \\ 0, & \end{cases} \quad (30)$$

$$Ir(k)_i = \begin{cases} \frac{I_{rP}}{K_{ol}}, & i = 1, 2, \dots, N_P, k = 1, 2, \dots, N. \\ 0, & \end{cases} \quad (31)$$

В (30) и (31) стойностите $P(k)_{Pi} = 0$ и $Ir(k)_i = 0$ се отнасят за случаите, когато потребителят $PU i$ не предава и/или не приема сигнали чрез първична РКМ по k -тата честотна подлента (k -тия канал) на вторичната SDR РКМ.

Следва специално да се отбележи, че съгласно анализът на SDR РКМ, направен в глава I, във всеки времеви кадър (time frame) работата на сървъра за управление на SDR РКМ се разделя на следните два етапа:

Етап 1: Определяне на ограниченията при използването на радиочестотния спектър в SDR РКМ, които е необходимо да се спазват, за да не се наруши нормалната работа на първичните РКМ;

Етап 2: Разпределение на честотните канали между потребителите на вторичната SDR РКМ, максимизиращо критерия за ефективност на работата на вторичната SDR РКМ при спазване на ограниченията, установени на предходния етап.

Предвид на горния извод, подходът за изграждане на SDR РКМ, използващ информацията за пространственото разположение на потребителите, представен в § 3.2.3, трябва да бъде доразвит така, че да бъде приложим за общия случай, когато потребителите на първичните и вторичната РКМ са повече от двама и са разположени на произволни позиции на местността (фиг. 29). В резултат може да се формулира следният общ алгоритъм за работа на сървъра за управление на SDR РКМ.

АЛГОРИТЪМ

за управление на софтуерно дефинирана радио комуникационна мрежа, реализирана на физическо ниво по технологията OFDM

Етап 1: Определяне на ограниченията при използването на софтуерно дефинирана радио комуникационна мрежа, реализирана на физическо ниво по технологията OFDM

2.2) Множество на разстоянията между потребителите на вторичната SDR ПКМ и потребителите на първичните ПКМ:

$$Csp = \{R_{11}, R_{12}, \dots, R_{lm}, \dots, R_{N_s N_p}\}. \quad (35)$$

В (35) R_{lm} е разстоянието между l -тия потребител ($SU l$) на вторичната SDR ПКМ ($l = 1, 2, \dots, N_s$) и m -тия потребител ($PU m$) на първичните ПКМ ($m = 1, 2, \dots, N_p$).

Стъпка 3: Изчисляване на мощностите на допълнителните шумове, създадени от работата на предавателите на потребителите на вторичната SDR ПКМ, на входовете на приемниците на потребителите на първичните ПКМ

Както е известно, когато се използват ненасочени антени, максималните мощности на сигналите от k -тата подлента (k -тия честотен канал) на потребителите на вторичната SDR ПКМ на входовете на приемниците на потребителите на първичните ПКМ са:

$$Psp(k)_{lm} = \begin{cases} P_s(k)_l, \\ \frac{P_s(k)_l}{4\pi R_{lm}^2}, \\ 0, \end{cases} \quad (36)$$

$$k = 1, 2, \dots, N, \quad l = 1, 2, \dots, N_s, \quad m = 1, 2, \dots, N_p, \quad l \neq m.$$

В (36) са използвани следните означения:

- $Psp(k)_{lm}$ е мощността на сигналите на потребителя $SU l, l = 1, 2, \dots, N_s$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), постъпили на входа на приемника на потребителя $PU m, m = 1, 2, \dots, N_p$;

- $P_s(k)_l$ е мощността на предавателя на потребителя $SU l, l = 1, 2, \dots, N_s$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), която се определя на етап 2, Стъпка 6 от работата на сървъра за управление на SDR ПКМ (т.е. на етапа на разпределение на честотните OFDM канали между потребителите на вторичната SDR ПКМ);

- R_{lm} е определеното на Стъпка 2 разстояние между потребителя $SU l, l = 1, 2, \dots, N_s$ и потребителя $PU m, m = 1, 2, \dots, N_p$;

- стойностите $Psp(k)_{lm} = 0$ се отнасят за случаите, когато в текущия времеви кадър (time frame) потребителят $PU m$ не приема сигнали чрез първична РКМ в k -тата честотна подлента (k -тия канал).

Стъпка 4: Изчисляване на мощностите на сигналите на входовете на приемниците на потребителите на първичните РКМ

Аналогично на (36), максималните мощности на сигналите от k -тата подлента (k -тия честотен канал) на входовете на приемниците на потребителите на първичните РКМ са:

$$Pp(k)_{uv} = \begin{cases} \frac{Pp(k)_u}{4\pi R(k)_{puv}^2}, \\ 0, \end{cases} \quad (37)$$

$$k = 1, 2, \dots, N, \quad u = 1, 2, \dots, N_p, \quad v = 1, 2, \dots, N_p, \quad u \neq v.$$

В (37) са използвани следните означения:

- $Pp(k)_{uv}$ е мощността на сигналите на потребителя $PU u, u = 1, 2, \dots, N_p$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), постъпили на входа на приемника на потребителя $PU v, v = 1, 2, \dots, N_p$;

- $Pp(k)_u$ е мощността на предавателя на потребителя $PU u, u = 1, 2, \dots, N_p$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), която е изчислена по (30);

- $R(k)_{puv}$ е определеното на Стъпка 1 разстояние между потребителите $PU u, u = 1, 2, \dots, N_p$ и $PU v, v = 1, 2, \dots, N_p$, използващи k -тата честотна подлента (k -тия канал) (т.е. $R(k)_{puv} \in Cp_k$);

- стойностите $Pp(k)_{uv} = 0$ се отнасят за случаите, когато в текущия времеви кадър (time frame) потребителят $PU v$ не приема сигнали чрез първична РКМ в k -тата честотна подлента (k -тия канал) от потребителя $PU u$ (т.е. потребителят $PU u$ не излъчва сигнали или неговите сигнали се екранират от хълмове или сгради).

Стъпка 5: Изчисляване на максимално допустимите мощности на сигналите на предавателите на потребителите на вторичната SDR РКМ

Съгласно Теоремата на Шенън-Хартли [20], П 4 и (9), възможната максимална скорост на предаване на информация по k -тата честотна подлента от потребителя $PU u$ към потребителя $PU m$ (т.е. капацитетът $Imax(k)_m$ на k -

тия честотен канал, оценен от гледна точка на потребителя $PU m$) се определя по формулата:

$$I_{max}(k)_{um} = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{Pp(k)_{um}}{\Delta f P(k)_{n_0}} \right). \quad (38)$$

В (38) $\Delta f P(k)_{n_0}$ е мощността на шумовете в k -тия честотен канал.

Ако $I_{max}(k)_{um} > I_r(k)_m > 0$ (т.е. ако възможната максимална скорост на предаване на информация по k -тия честотен канал към потребителя $PU m$ е по-голяма от реално използваната скорост), тогава потребителите на вторичната SDR РКМ могат да използват k -тия честотен канал без да пречат на потребителя $PU m$, ако мощностите на техните сигнали $Psp(k)_{lm}$ осигуряват изпълнението на равенството

$$I_r(k)_m = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{Pp(k)_{um}}{\Delta f P(k)_{n_0} + Ps(k)_{lm}} \right), \quad (39)$$

$k = 1, 2, \dots, N, \quad l = 1, 2, \dots, N_s, \quad m, u = 1, 2, \dots, N_p, \quad u \neq m.$

Следователно

$$\begin{aligned} I_r(k)_m &= \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{Pp(k)_{um}}{\Delta f P(k)_{n_0} + Ps(k)_{lm}} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{I_r(k)_m}{\Delta f} &= \log_2 \left(1 + \frac{Pp(k)_{um}}{\Delta f P(k)_{n_0} + Ps(k)_{lm}} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow 2^{\frac{I_r(k)_m}{\Delta f}} &= 1 + \frac{Pp(k)_{um}}{\Delta f P(k)_{n_0} + Ps(k)_{lm}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta f P(k)_{n_0} + Ps(k)_{lm} &= \frac{Pp(k)_{um}}{2^{\frac{I_r(k)_m}{\Delta f}} - 1} \Rightarrow \\ \Rightarrow Ps(k)_{lm} &= \frac{Pp(k)_{um}}{2^{\frac{I_r(k)_m}{\Delta f}} - 1} - \Delta f P(k)_{n_0}. \end{aligned} \quad (40)$$

След като се отчете (40) в (35) се установява, че в k -тия честотен канал допустимите мощности на сигналите на потребителите на вторичната SDR РКМ (т.е. мощностите, при които скоростта на предаване на информация към потребителя $PU m$ не спада под номиналната скорост в резултат на едновременното използване на k -тия честотен канал и от потребителя $SU l$), са

$$Ps(k)_l = \left(\frac{Pp(k)_{um}}{2^{\frac{Ir(k)_m}{\Delta f} - 1}} - \Delta f P(k)_{n_0} \right) 4\pi R_{lm}^2, \quad (41)$$

$$k = 1, 2, \dots, N, \quad l = 1, 2, \dots, N_S, \quad m = 1, 2, \dots, N_P.$$

Ако $Ir(k)_m = 0$ (т.е. ако не се предава информация по k -тия честотен канал към потребителя $PU m$), тогава потребителите на вторичната SDR ПКМ могат да използват k -тия честотен канал без да пречат на потребителя $PU m$, дори ако мощностите на техните сигнали $Psp(k)_{lm}$ са максимално възможни, съгласно техническите характеристики на вторичната SDR ПКМ, т.е.:

$$Ps(k)_l = P_{max} s(k)_l, \quad (42)$$

$$k = 1, 2, \dots, N, \quad l = 1, 2, \dots, N_S.$$

Етап 2: Разпределение на OFDM каналите между потребителите на вторичната SDR ПКМ, максимизиращо скоростта на предаване на информация във вторичната SDR ПКМ при спазване на ограниченията, установени на предходния етап.

Стъпка 6: Изчисляване на максимално възможните скорости на предаване на информация от потребителите на вторичната SDR ПКМ.

На базата на множеството Cs (Стъпка 2, формула (34)) на разстоянията между потребителите на вторичната SDR ПКМ и на множеството на максимално допустимите мощности на сигналите на предавателите им (изчислени на Стъпка 5, формули (41) и (42)), мощностите на сигналите на входовете на приемниците на потребителите на вторичната SDR ПКМ, се изчисляват по формулата:

$$Ps(k)_{lw} = \frac{Ps(k)_l}{4\pi R_{Slw}^2}, \quad (43)$$

$$k = 1, 2, \dots, N, \quad l = 1, 2, \dots, N_S, \quad w = 1, 2, \dots, N_S, \quad l \neq w.$$

В (43) са използвани следните означения:

- $Ps(k)_{lw}$ е мощността на сигналите на потребителя $SU l, l = 1, 2, \dots, N_S$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), постъпили на входа на приемника на потребителя $SU w, w = 1, 2, \dots, N_S$;

- $P_s(k)_l$ е мощността на предавателя на потребителя $SU l, l = 1, 2, \dots, N_S$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), която е изчислена на предходната стъпка по (41) или (42);

- $R(k)_{slw}$ е определеното на Стъпка 2 разстояние между потребителите $SU l, l = 1, 2, \dots, N_S$ и $SU w, w = 1, 2, \dots, N_S$, при използване на k -тата честотна подлента (k -тия канал).

Аналогично на (39), скоростите на предаване на информацията, които могат да постигнат потребителите на вторичната SDR РКМ в текущия времеви момент, се изчисляват по формулата

$$I_r(k)_{lw/u} = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_s(k)_{lw}}{\Delta f P(k)_{n_0} + Pps(k)_{uw}} \right), \quad (44)$$

$$k = 1, 2, \dots, N, \quad l, w = 1, 2, \dots, N_S, \quad m, u = 1, 2, \dots, N_P, \quad l \neq w, \quad u \neq m.$$

В (44) са използвани следните означения:

- $I_r(k)_{lw/u}$ е възможната максимална скорост на предаване на информацията от потребителя $SU l$ към потребителя $SU w$ по k -тата честотна подлента (k -тия канал) при използване (от потребителя $SU l$) на сигнали с допустима мощност;

- $P_s(k)_{lw}$ е мощността на сигналите на потребителя $SU l, l = 1, 2, \dots, N_S$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), налична на входа на приемника на потребителя $SU w, w = 1, 2, \dots, N_S$, съгласно (43);

- $\Delta f P(k)_{n_0}$ е мощността на шумовете в k -тия честотен канал;

- $Pps(k)_{uw}$ е мощността на сигналите на потребителя $PU u, u = 1, 2, \dots, N_P$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), налична на входа на приемника на потребителя $SU w, w = 1, 2, \dots, N_S$, която се изчислява аналогично на (36) по формулата:

$$Pps(k)_{uw} = \frac{Pp(k)_u}{4\pi R_{uw}^2} \quad (45)$$

$$k = 1, 2, \dots, N, \quad u = 1, 2, \dots, N_P, \quad w = 1, 2, \dots, N_S.$$

В (45) са използвани следните означения:

- $Pp(k)_u$ е мощността на предавателя на потребителя $PU u, u = 1, 2, \dots, N_P$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), която е изчислена по (30);

- $R(k)_{lw}$ е определеното на Стъпка 2 разстояние между потребителите $PU u, u = 1, 2, \dots, N_P$ и $SU w, w = 1, 2, \dots, N_S$.

Стъпка 7: Разпределение на OFDM каналите между потребителите на вторичната SDR РКМ, максимизиращо скоростта на предаване на информация във вторичната SDR РКМ.

Целта на тази стъпка е намирането на еднопосочните комуникационни съединения (линии) „предаване на информация от потребителя $SU l, l = 1, 2, \dots, N_S$ - приемане на информация от потребителя $SU w, w = 1, 2, \dots, N_S$ “, за които скоростта на предаване на информация е максимална за всеки честотен канал. За постигане на тази цел се построяват $N \times N_S$ на брой двумерни масива, всеки от които може да се представи чрез таблица от следния вид:

Таблица №6 Максимално възможни скорости на предаване на информация от потребител $SU l$ към потребител $SU w, w = 1, 2, \dots, N_S$ по k -тия честотен канал при смущаващо въздействие от потребител $PU u, u = 1, 2, \dots, N_P$

		Потребител $SU w$					
		1	2	...	w	...	N_S
Потребител $PU u$	1	$Ir(k)_{l1/1}$	$Ir(k)_{l2/1}$	...	$Ir(k)_{lw/1}$	...	$Ir(k)_{lN_S/1}$
	2	$Ir(k)_{l1/2}$	$Ir(k)_{l2/2}$	...	$Ir(k)_{lw/2}$	...	$Ir(k)_{lN_S/2}$

	u	$Ir(k)_{l1/u}$	$Ir(k)_{l2/u}$	...	$Ir(k)_{lw/u}$	...	$Ir(k)_{lN_S/u}$

	N_P	$Ir(k)_{l1/N_P}$	$Ir(k)_{l2/N_P}$	...	$Ir(k)_{lw/N_P}$	...	$Ir(k)_{lN_S/N_P}$
Min елемент в стълба		$Ir(k)_{l1}$	$Ir(k)_{l2}$		$Ir(k)_{lw}$		$Ir(k)_{lN_S}$

Анализът на w -тия стълб на табл. 6 показва, че ако по k -тия честотен канал се предава информация от потребител $SU l$ към потребител $SU w$ тогава скоростта на предаване на информация се определя от потребителя $PU u$,

който в най-голяма степен смущава посоченото съединение. По тази причина скоростта на предаване на информация от потребител $SU l$ към потребител $SU w, w = 1, 2, \dots, N_S$, по k -тия честотен канал е

$$Ir(k)_{lw} = \min_{u = 1, 2, \dots, N_p} \{Ir(k)_{lw/1}, Ir(k)_{lw/2}, \dots, Ir(k)_{lw/N_p}\}. \quad (46)$$

Скоростите на предаване на информация за всички стълбове, определени чрез (46), са представени в последния ред на табл. 6.

Тъй като по принцип потребител $SU l$ може да предава информация към всеки потребител $SU w, w = 1, 2, \dots, N_S$, скоростта на предаване на информация е максимална за този потребител $SU w_0$, за който е изпълнено:

$$Ir(k)_{lw_0} = \max_{w = 1, 2, \dots, N_S} \{Ir(k)_{l1}, Ir(k)_{l2}, \dots, Ir(k)_{lN_S}\} \quad (47)$$

Предвид на (47) може да се обобщи, че комуникационното съединение „предаване на информация от потребителя $SU l$ - приемане на информация от потребителя $SU w_0$ “, при което скоростта на предаване на информация по k -тия честотен канал е най-висока, се определя от максималния елемент в последния ред на табл. 6.

След като се приложи описаната процедура за всеки потребител $SU l, l = 1, 2, \dots, N_S$ и за всеки честотен канал се намират еднопосочните комуникационни съединения (линии) „предаване на информация от потребителя $SU l, l = 1, 2, \dots, N_S$ - приемане на информация от потребителя $SU w, w = 1, 2, \dots, N_S$ “, максимизиращи скоростта на предаване на информация във вторичната SDR РКМ.

В заключение на този параграф е необходимо да се отбележат специално следните обстоятелства.

Първо, критерият „максимална скорост на предаване на информация“ за разпределение на OFDM каналите между потребителите на вторичната SDR РКМ е подходящ за много случаи, но не е универсален. Ето защо в ситуации, когато са налице специфични изисквания към функционирането на вторичната SDR РКМ, тогава на етапа на разпределение на OFDM каналите

между потребителите следва да се използва някаква комбинация от подходите, анализирани в § 1.5.

Второ, в случаите, когато вторичната SDR РКМ се използва за нуждите на полицията, армията, гражданската защита и др. подобни, на преден план излиза проблемът за осигуряване на максимално шумозащитена и сигурна комуникация. Предвид на това, в следващите параграфи от тази глава посоченият проблем се анализира в повече детайли.

4.2. Основни свойства на сложните сигнали, използвани при изграждането на радиокомуникационни мрежи с висока шумозащитеност

Най-напред сложните сигнали (СС) със свръх големи бази са били използвани в първите космически системи за свързка и в стратегическите военно-комуникационни системи на САЩ и бившия СССР в началото на 60-те години на миналия век. От тогава до сега е натрупан богат инженерен опит в проектирането и експлоатацията им, който убедително показва, че СС притежават следните положителни свойства:

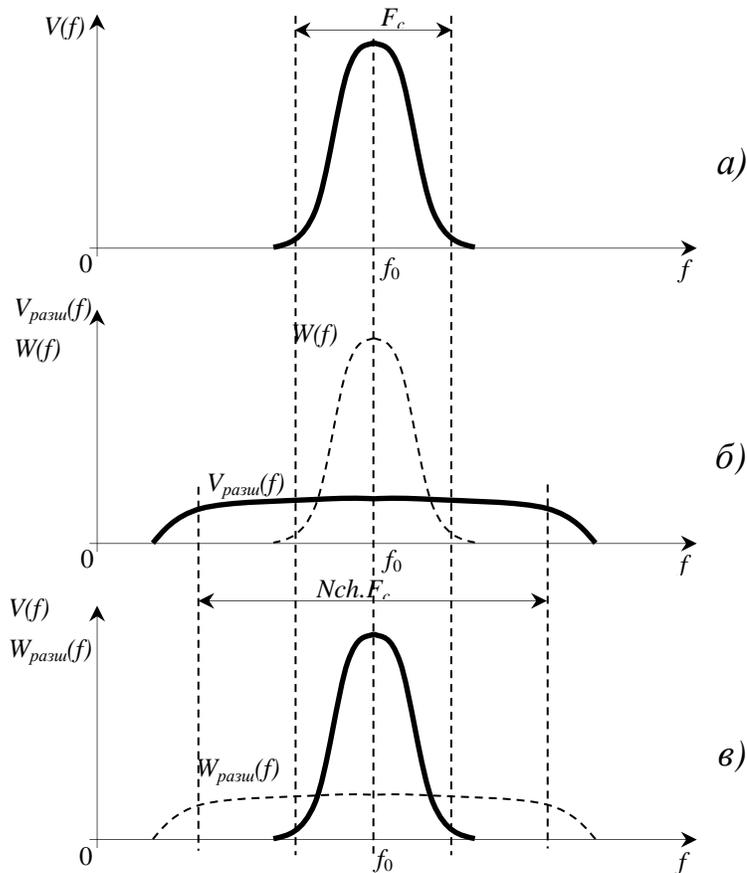
- осигуряват висока шумозащитеност на комуникационните системи;
- позволяват организирането на едновременната работа на много абонати в обща честотна лента при асинхронно-адресен принцип на работа на системата за свързка на базата на кодовото разделяне на абонатите (т.е. на тях се базират CDMA (code division multiple access) технологиите, използвани широко в съвременните мобилни комуникации);
 - позволяват успешна борба с негативните ефекти, породени от многолъчевото разпространение на радиовълните, чрез разделяне на преките и отразени лъчи;
 - обезпечават електромагнитна съвместимост на радиоелектронната апаратура;
 - осигуряват много добро използване на електромагнитния спектър.

Положителните свойства на СС от гледна точка на изграждането на РКМ с висока шумозащитеност произтичат от тяхната сложна вътрешна структура. По-конкретно, под управлението на специална *разширяваща*

функция (разширяващ сигнал) всеки един информационен символ от предаваните данни се трансформира в последователност от елементарни импулси с малка продължителност, наречени *елементарни импулси* или *чипове*. Формално-математически тази операция се описва с израза [8],[9].

$$v_{\text{разш}}(t) = v(t)g(t). \quad (48)$$

В (48) $v(t)$ е прост сигнал, пренасящ един информационен символ от предавателя към приемника, $g(t)$ е разширяващата функция, а $v_{\text{разш}}(t)$ е резултантният сложен сигнал, чиято спектрална плътност $V_{\text{разш}}(f)$ има вида, показан на фиг. 31 б.



Фигура - 31 Повишаване шумоустойчивостта на РКМ в резултат на използването на сложни сигнали

Разширяващата функция е уникална за всеки конкретен получател на информация и в неговия приемник се извършва корелационно приемане чрез

сравняване на приетата разширяващата функция с предварително заложената.

Формално-математически тази операция се описва с израза [8],[9].

$$v_{\text{разш}}(t)g^{-1}(t) = [v(t)g(t)]g^{-1}(t) = v(t). \quad (49)$$

Тук $g^{-1}(t)$ е сигнал, чието действие е обратно на действието на разширяващата функция, използвана в предавателя. По тази причина той се нарича *обратна разширяваща функция (сигнал)*. В резултат спектралната плътност $V_{\text{разш}}(f)$ на полезните сигнали се свива до първоначалния си вид $V(f)$, показан на фиг. 31 в.

От друга страна, под въздействието на обратната разширяваща функция смущаващият сигнал $w(t)$ се трансформира в сигнала

$$w(t)g^{-1}(t) = w_{\text{разш}}(t), \quad (50)$$

като неговата спектрална плътност $W_{\text{разш}}(f)$ има вида, показан на фиг. 31 в. На входа на приемника обаче има честотно-избирателен филтър, който пропуска за по-нататъшна обработка само спектралните компоненти в честотната лента F_c с централна честота f_0 . Следователно в резултат на използването на СС отношението сигнал/шум по амплитуда $q_{\text{ин}}$ на изхода на приемника се подобрява право пропорционално на разширяването на спектъра сигналите [8],[9], като

$$q_{\text{ин}}^2 = 2Bq_0^2. \quad (51)$$

Тук $B = V_{\text{разш}}T_c, B \gg 1$ е базата на СС, T_c е продължителността на сигнала, а q_0 е отношението сигнал/шум по амплитуда на входа на приемника.

От (23) се вижда, че $q_{\text{ин}}$ може да бъде достатъчно голямо дори при много малки стойности на q_0 – достатъчно е да се избере база B на СС с необходимата големина. Следователно приемането на СС със съгласуван филтър или корелатор се съпровожда с усиление на сигнала (или подавяне на смущението) $2B$ пъти. Именно за това величината [8],[9]:

$$K_{\text{СС}} = \frac{q_{\text{ин}}^2}{q_0^2}. \quad (52)$$

се нарича *коэффициент на усилване на комуникационните системи със сложни сигнали* (КССС) при обработката. От (51) и (52) следва, че:

$$K_{CC} = 2B. \quad (53)$$

Аналогично, приемането на информация, пренасяна със СС, се характеризира с отношение сигнал/шум по мощност [8],[9]:

$$h^2 = \frac{q_{ин}^2}{2} = Bq_0^2. \quad (54)$$

Съотношенията (40) и (41) са фундаментални в теорията на комуникационните системи със СС. Те са получени за смущения от вида на бял шум с равномерна спектрална плътност на мощността в границите на честотната лента, ширината на която е равна на ширината на спектъра на СС. В най-общ случай е изпълнено:

$$K_{CC} \approx 2B, \quad (55)$$

като степента на приближение зависи както от вида на смущението, така и от базата на СС [8],[9].

От (54) ясно се вижда, че използването от РКМ на СС води до повишаване на тяхната шумоустойчивост B пъти. Действително, нека отношението сигнал/шум по мощност на изхода на приемника, осигуряващо нормална работа на РКС, е $q_{ин}^2 = q_0^2$. Ако започне подавяне РКМ със смущения, влошаващи отношението сигнал/шум по мощност до стойност $q_{ин}^2 = \frac{1}{B}q_0^2$, тогава използването на сложни сигнали с база B напълно ще компенсират вредния ефект на смущенията, тъй като $q_{ин}^2 = B \frac{1}{B}q_0^2 = q_0^2$ [8],[9].

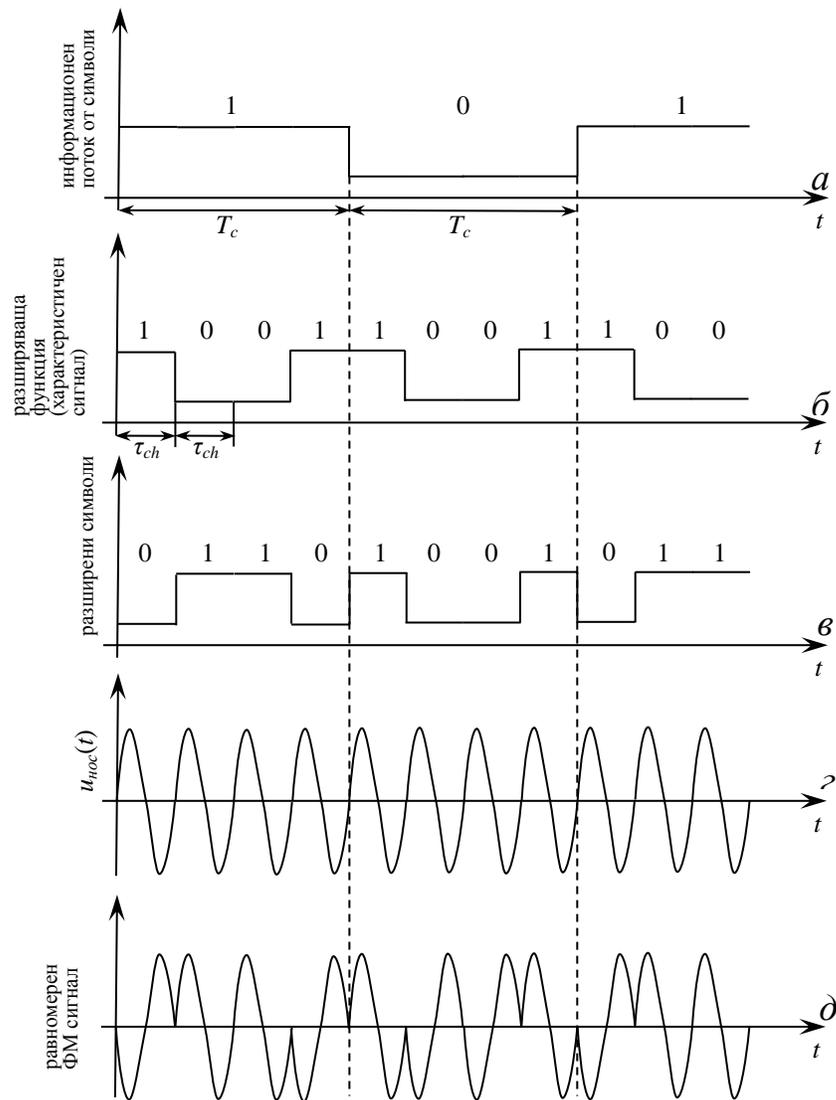
Технологично генерирането на СС може да се осъществи по два основни метода, наречени *директно разширяване на спектъра* (*direct spread spectrum*) чрез фазова манипулация и *скокообразно изменение на носещата честота* (*frequency hopping*) [8],[9]. Първият от тях – директно разширяване на спектъра – се пояснява с помощта на фиг. 32.

На фиг. 32 а е показан потокът от символи 101..., който трябва да се пренесе от предавателя към приемника. Разширяващата функция (фиг. 32 б) е $g(t) = \{1001\}$, т.е. тя е съставена от $N_{ch} = 4$ *елементарни импулса* (*чипа*).

При това съотношението между продължителностите на символите T_c и чиповете τ_{ch} е [8],[9].

$$N_{ch} = \frac{T_c}{\tau_{ch}}. \quad (56)$$

Операцията (20) е реализирана като *сума по модул 2* на всеки символ и разширяващата функция (фиг. 32 в). Резултатът от нейното изпълнение е разширяване на честотната лента на сигналите N_{ch} пъти, тъй като ширината на спектъра на разширените символи е $F_{CC} \approx \frac{1}{\tau_{ch}} = \frac{N_{ch}}{T_c}$, а базата $B = T_c F_{CC} = N_{ch} \tau_{ch} \frac{1}{\tau_{ch}} = N_{ch}$



Фигура - 32 Директно разширяване на спектъра чрез фазова манипулация

С помощта на носещото трептене (фиг. 32 г)

$$u_{\text{нос}}(t) = U_{m0} \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (57)$$

спектърът на разширените символи (фиг. 32 в) се пренася във високочестотната част на електромагнитния спектър около носещата честота f_0 (фиг. 31 б).

4.3. Компютърна система за анализ и синтез на комплементарни сигнали

Комплементарните сигнали са тип сигнали, чиято вътрешна структура може да бъде много сложна. По тази причина тези сигнали в най-голяма степен са подходящи за изграждането на РКМ с висока шумозащитеност. Отчитайки този факт, в настоящия параграф е представена компютърна система за анализ и синтез на комплементарни сигнали, която може да се използва успешно при разработването на SDR РКМ за нуждите на въоръжените сили, полицията и гражданската защита.

Както е известно, комплементарните фазово манипулирани (ФМ) сигнали са въведени от Марсел Голай със следното определение [56].

Определение 1: Два бинарни ФМ сигнала, чиито математически модели са последователности от бинарни отчети $\{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$, $a(i), b(i) \in \{-1, +1\}, i = 0, 1, \dots, N_1$, се наричат комплементарна двойка, ако сумата на техните автокорелационни функции (АКФ) няма странични листа (т.е. тя е цифров делта-импулс):

$$R_{CP}(r) = R_{aa}(r) + R_{bb}(r) = \begin{cases} 2N_1, & r = 0, \\ 0, & r = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N_1 - 1). \end{cases} \quad (58)$$

В (58) неперидичните АКФ $R_{aa}(r)$ и $R_{bb}(r)$ на бинарните ФМ сигнали $\{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$ се определят като в известната формула за изчисляване

на взаимно-корелационната функция (ВКФ) на два сигнала $\{v_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{v_2(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$:

$$R_{v_1 v_2}(r) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N_1-1-|r|} v_1(i) v_2^*(1+|r|), & -(N_1-1) \leq r \leq 0, \\ \sum_{i=0}^{N_1-1-r} v_1(i) v_2^*(1+r), & 0 \leq r \leq N_1-1, \end{cases} \quad (59)$$

се постави $\{v_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$, $\{v_2(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$ и $\{v_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$, $\{v_2(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$ съответно.

Както беше отбелязано, в (59) $\{v_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{v_1(0), v_1(1), \dots, v_1(N_1-1)\}$ и $\{v_2(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{v_2(0), v_2(1), \dots, v_2(N_1-1)\}$ са два произволни сигнала, съставени от редицата отчети $v_1(i), v_2(i), i = 0, 1, \dots, N_1-1$, представляващи комплексни числа, изразяващи амплитудата и началната фаза на елементарните фазови импулси (чиповете), които ги изграждат. Освен това, символът „*“ означава комплексно спрягане, $R_{v_1 v_2}(r)$ е листът на ВКФ на сигналите $\{v_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{v_2(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$ при времево отместване $r\tau_{ch}, r = 0, 1, \dots, N_1-1$, а τ_{ch} е продължителността на елементарните импулси (чиповете). Тъй като продължителността на чиповете τ_{ch} е постоянна при генерирането и цифровата обработка на сигналите, тя се пропуска (не се изписва) във формулите.

Предвид комутативността на операцията събиране, от (58) се вижда, че редът на бинарните ФМ сигнали, формиращи комплементарната двойка, няма значение. С други думи както $\{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$, така и $\{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$ са комплементарна двойка.

Много важно свойство на комплементарните двойки ФМ сигнали е съществуването на метод за синтез на производна комплементарна двойка ФМ сигнали с дължина $N_1 N_2$, ако са известни две комплементарни двойки ФМ сигнали с дължина N_1 и N_2 съответно (не е необходимо двете двойки комплементарни ФМ сигнали да са различни). След прилагане на метода достатъчен брой пъти е възможно да се синтезират комплементарни двойки

ФМ сигнали с дължина $N_0 = N_1^{l_1} N_2^{l_2}$, така че тя да е по-голяма от което и да е предварително зададено число.

Недостатък на комплементарните двойки ФМ сигнали е, че за изминалите 60 години са открити само: една комплементарна двойка с дължина $N_1 = 2$, две нееквивалентни комплементарни двойки с дължина $N_1 = 10$, една комплементарна двойка с дължина $N_1 = 20$ и една комплементарна двойка с дължина $N_1 = 26$. По тази причина комплементарните двойки ФМ сигнали, въведени с Определение 1, могат да имат само дължини от вида

$$N_0 = 2^{l_0} N_1^{l_1} N_2^{l_2}, \quad N_1, N_2 \in \{2, 10, 26\}. \quad (60)$$

Ето защо класическата концепция на Голай е разширена от Ценг и Лю [120], които наричат комплементарно множество всяко множество от K на брой бинарни ФМ сигнали, ако тяхната сумарна АКФ няма странични листа (т.е. тя е цифров делта-импулс). При тази трактовка, комплементарните двойки на Голай са частен случай на комплементарните множества на Ценг и Лю при $K = 2$. На свой ред концепцията на Ценг и Лю може да обобщи като се приеме, че фазата на сигналите в комплементарните множества може да се манипулира и на повече от две нива. Подобно обобщение е напълно оправдано като се отчитат възможностите на съвременната техника за генериране на ФМ сигнали [122] и перспективата за получаване на широка гама от комплементарни ФМ сигнали с голяма структурна сложност. Този анализ води до следното определение.

Определение 2: Множеството от K на брой ФМ сигнали:

$$\{a_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{a_2(i)\}_{i=0}^{N_2-1}, \dots, \{a_K(i)\}_{i=0}^{N_K-1} \\ a_k(i) \in \left\{ e^{j \frac{2\pi l}{m_k}}, l = 0, 1, \dots, m_k - 1, k = 1, 2, \dots, K \right\}, j = \sqrt{-1}, \quad (61)$$

е обобщено комплементарно множество, ако сумата на техните автокорелационни функции (АКФ) няма странични листа (т.е. тя е цифров делта-импулс):

$$R_{CS}(r) = \sum_{k=1}^K R_{a_k a_k}(r) = \begin{cases} \sum_k^K N_k = N_1 + N_2 + \dots + N_K, & r = 0, \\ 0, & r = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \max\{N_1, N_2, \dots, N_K\}. \end{cases} \quad (62)$$

В (62) неперидичните АКФ $R_{a_k a_k}(r)$ се изчисляват с помощта на (59).

Предвид комутативността на операцията събиране, от (62) се вижда, че редът на бинарните ФМ сигнали, формиращи обобщено комплементарно множество, няма значение.

От анализа, направен по-горе, ясно се вижда, че комплементарните сигнали могат да имат много сложна вътрешна структура, което ги прави особено подходящи като разширяващи функции (фиг. 32) при изграждането на SDR РКМ с разширен спектър, притежаващи висока шумозащитеност и устойчивост на функционирането в екстремални условия. Предвид на този факт, за решаване на пета и шеста задачи на дисертационния труд в средата на Матлаб беше разработена компютърна програма за автоматизиран анализ и синтез на комплементарни сигнали. Възможностите на програмата се илюстрират по-нататък в този параграф с два конкретни примера, а нейният листинг е представен в приложението към дисертационния труд.

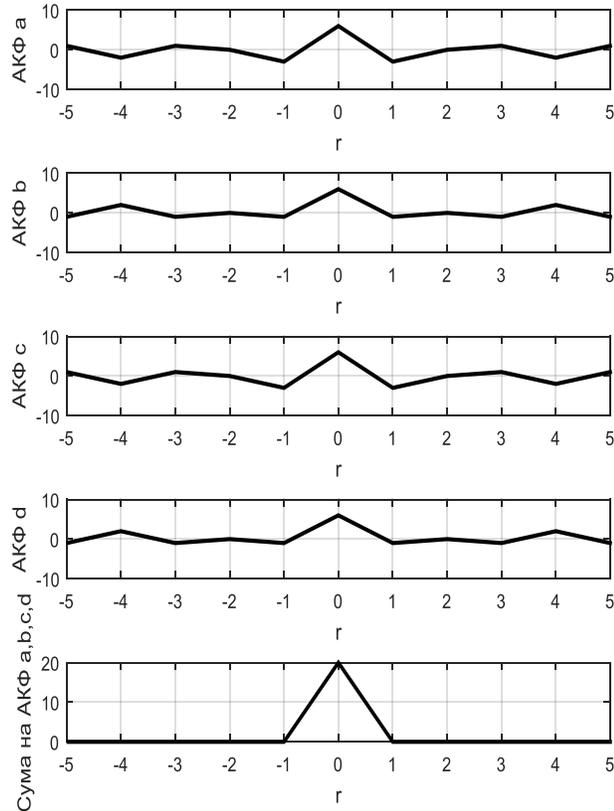
*Листинг 1 СВОЙСТВА НА МНОЖЕСТВА ОТ ОБОБЩЕНИ
КОМПЛЕМЕНТАРНИ СИГНАЛИ*

```
clear all;clc;
%Въвеждане на началните параметри
K=4;N=6;ExpCS(1,:)= [1 1 1 1 0 0];ExpCS(2,:)= [1 1 -1 -1 0 0];
ExpCS(3,:)= [1 -1 -1 1 -1 1];ExpCS(4,:)= [1 -1 -1 -1 1 -1];
%Изчисляване на авто-корелационите функции
%на комплементарното множество сигнали
RSumACF=zeros(1,2.*N-1);
for Ics=1:1:K;
    C1=ExpCS(Ics,:);C2=ExpCS(Ics,:);
    SL1=xcorr(C1,C2);RACF(Ics,:)=(round(1000.*SL1))/1000.;
    RSumACF=RSumACF+RACF(Ics,:);
end
%Изчертване на графиките на АКФ на комплементарната двойка
сигнали
shift=-N+1:1:N-1;
S1=RACF(1,:);S2=RACF(2,:);S1=RACF(3,:);S2=RACF(4,:);S5=RSumACF;
figure;
subplot(5,1,1);plot(shift,S1,'k-','LineWidth',2);
xlabel('r');ylabel('АКФ a');grid on;
subplot(5,1,2);plot(shift,S2,'k-','LineWidth',2);
```

```

xlabel('r');ylabel('АКФ a');grid on;
subplot(5, 1, 3);plot(shift, S1,'k-', 'LineWidth',2);
xlabel('r');ylabel('АКФ c');grid on;
subplot(5, 1, 4);plot(shift, S2,'k-', 'LineWidth',2);
xlabel('r');ylabel('АКФ d');grid on;
subplot(5, 1, 5);plot(shift, S5,'k-', 'LineWidth',2);
xlabel('r');ylabel('Сума на АКФ a,b,c,d');grid on;

```



Фигура - 33 Автокорелационни функции на комплементарното множество сигнали, дефинирани с (34)

Пример 1: Синтезиране на комплементарното множество от $K = 4$ ФМ сигнала с дължини $N_1 = N_2 = 4, N_3 = N_4 = 6$:

$$\begin{aligned}
 \{a(i)\}_{i=0}^3 &= \{1, 1, 1, 1\}, \{b(i)\}_{i=0}^3 = \{1, 1, -1, -1\}, \\
 \{c(i)\}_{i=0}^5 &= \{1, -1, -1, 1, -1, 1\}, \{d(i)\}_{i=0}^5 = \{1, -1, -1, -1, 1, -1\}.
 \end{aligned} \tag{63}$$

Непериодичните АКФ $R_{aa}(r), R_{bb}(r), R_{cc}(r)$ и $R_{dd}(r)$ на бинарните ФМ сигнали $\{a(i)\}_{i=0}^3, \{b(i)\}_{i=0}^3, \{c(i)\}_{i=0}^5$ и $\{d(i)\}_{i=0}^5$ от (63), са показани на фиг. 33а, фиг. 33б, фиг. 33в и фиг. 33г съответно. Както се вижда от фиг. 33д, сумата на АКФ на ФМ сигналите (63) няма странични листа (т.е. тя е цифров делта-импулс).

Следва да се отбележи, че ако комплементарното множество (63) се използва за директно разширяване на спектъра на каналните радио-сигнали (т.е. като система от разширяващи функции), тогава базата на СС е

$$B = V_{\text{разш}} T_c = \sum_{k=1}^4 F_{\text{СС}}(k) T_c = \sum_{k=1}^4 \left[\frac{N_{\text{ch}}(k)}{T_c} \right] T_c = 20. \quad (64)$$

Пример 2: Синтезиране на фамилия от $K_{fam} = 3$ взаимно ортогонални обобщени комплементарни множества, съдържащи $K = 3$ ФМ сигнала с дължини $N_1 = N_2 = N_3 = 3$:

$$\begin{aligned} \{a_1(i)\}_{i=0}^2 &= \{1, 1, 1\}, \{b_1(i)\}_{i=0}^2 = \{1, w, w^2\}, \{c_1(i)\}_{i=0}^2 = \{1, w^2, w\}, \\ \{a_2(i)\}_{i=0}^2 &= \{1, w, w^2\}, \{b_2(i)\}_{i=0}^2 = \{1, w^2, w\}, \{c_3(i)\}_{i=0}^2 = \{1, 1, 1\}, \\ \{a_3(i)\}_{i=0}^2 &= \{1, w^2, w\}, \{b_3(i)\}_{i=0}^2 = \{1, 1, 1\}, \{c_3(i)\}_{i=0}^2 = \{1, w, w^2\}. \end{aligned} \quad (65)$$

В (64) w е някой от двата комплексни трети корени от единицата:

$$w \in \left\{ e^{j\frac{2\pi}{3}} = \frac{-1+j\sqrt{3}}{2}, e^{j\frac{2\pi}{3}2} = \frac{-1-j\sqrt{3}}{2} \right\}. \quad (66)$$

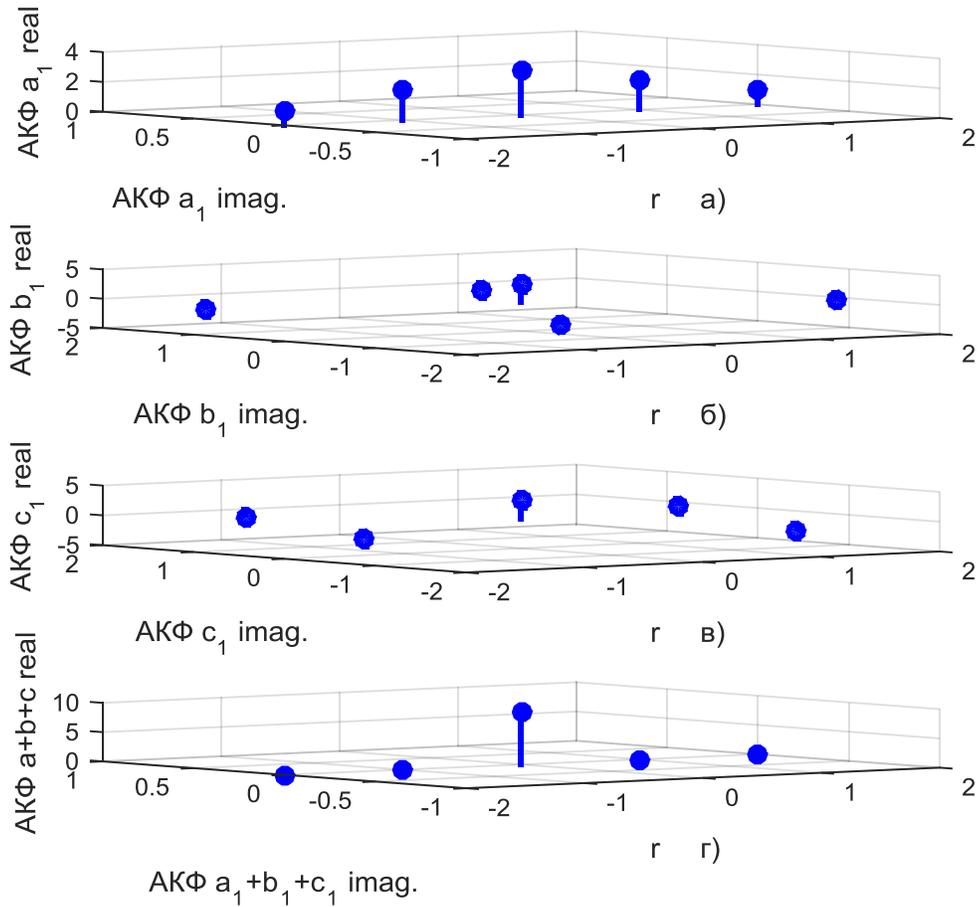
Непериодичните АКФ $R_{a_1 a_1}(r), R_{b_1 b_1}(r)$ и $R_{c_1 c_1}(r)$ на ФМ сигналите $\{a_1(i)\}_{i=0}^2, \{b_1(i)\}_{i=0}^2$ и $\{c_1(i)\}_{i=0}^2$ от първото обобщено комплементарно множество на фамилията от сигнали (65), получени с помощта на компютърната програма за автоматизиран анализ и синтез на комплементарни сигнали, са показани на фиг. 34а, фиг. 34б и фиг. 34в съответно. Както се вижда от фиг. 34г, сумата на АКФ на ФМ сигналите $\{a_1(i)\}_{i=0}^2, \{b_1(i)\}_{i=0}^2$ и $\{c_1(i)\}_{i=0}^2$ няма странични листа (т.е. тя е цифров делта-импулс).

Листинг 2 СВОЙСТВАТА НА КОМПЛЕМЕНТАРНИ ТРОЙКИ СИГНАЛИ
clear all;clc;

```

%Изчисляване на комплексните отчети на сигналите
w(1)=-0.5+i*((sqrt(3.0))./2);w(2)=w(1)*w(1);
%Въвеждане на началните параметри
K=3;N=3;ExpCS(1,:)=[1 1 1];ExpCS(2,:)=[1 w(1) w(2)];ExpCS(3,:)=[1
w(2) w(1)];
%Изчисляване на авто-корелационите функции
%на комплементарната тройка сигнали
RSumACF=zeros(1,2.*N-1);
for Ics=1:1:K;
    C1=ExpCS(Ics,:);C2=ExpCS(Ics,:);
    SL1=xcorr(C1,C2);RACF(Ics,:)=(round(1000.*SL1))/1000.;
    RSumACF=RSumACF+RACF(Ics,:);
end
%Изчертаване на 3-D графика на ПАКФ
for Ics=1:1:K;
    RACFRe(Ics,:)=real(RACF(Ics,:));RACFim(Ics,:)=imag(RACF(Ics,:));
end
RSumACFRe=real(RSumACF);RSumACFim=imag(RSumACF);
shift=-N+1:1:N-1;
figure;
subplot(4,1,1);stem3(shift,RACFim(1,:),RACFRe(1,),'filled','b-
','LineWidth',2);
xlabel('r          а');ylabel('AKФ a_1 imag. ');zlabel('AKФ a_1
real');grid on;
subplot(4,1,2);stem3(shift,RACFim(2,:),RACFRe(2,),'filled','b-
','LineWidth',2);
xlabel('r          б');ylabel('AKФ b_1 imag. ');zlabel('AKФ b_1
real');grid on;
subplot(4,1,3);stem3(shift,RACFim(3,:),RACFRe(2,),'filled','b-
','LineWidth',2);
xlabel('r          в');ylabel('AKФ c_1 imag. ');zlabel('AKФ c_1
real');grid on;
subplot(4,1,4);stem3(shift,RSumACFim,RSumACFRe,'filled','b-
','LineWidth',2);
xlabel('r          г');ylabel('AKФ a_1+b_1+c_1 imag. ');zlabel('AKФ
a+b+c real');grid on;

```



Фигура - 34 Автокорелационни функции на първото комплементарно множество сигнали на фамилията взаимно ортогонални сигнали, дефинирана с (63)

$$B = V_{\text{разш}} T_c = \sum_{k=1}^3 F_{CC}(k) T_c = \sum_{k=1}^3 \left[\frac{N_{ch}(k)}{T_c} \right] T_c = 9. \quad (67)$$

Въпреки положителните им свойства, до началото на 90-те години на миналия век комплементарните сигнали не са били използвани масово в радио-комуникационните системи (РКС), тъй като съгласно анализа, направен в [83], за тяхното реализиране са необходими

$$N_{fch} = m_c \frac{K}{2}, \quad (68)$$

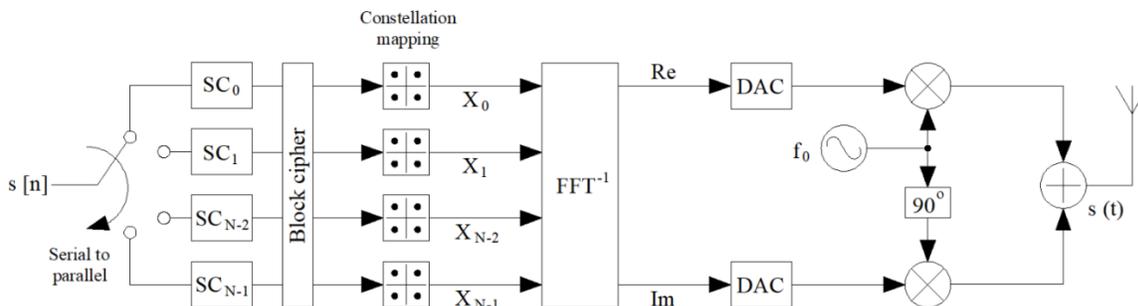
независими честотни канала. В (68) коефициентът m_c има стойност 1 ($m_c = 1$), ако се използва само бинарна фазова манипулация, или стойност 2, ако се използва фазова манипулация на повече от 2 нива.

Коректността на (68) се демонстрира от фиг. 33 и фиг. 34, от които се вижда, че сигналното съзвездие на елементарните фазови импулси, изграждащи ФМ сигналите (65) и (67), се реализира чрез квадратурна амплитудна модулация (quadrature amplitude modulation - QAM).

Днес проблемът за осигуряване на достатъчен брой независими честотни канали, позволяващи приложението на обобщени на комплементарни множества, успешно може да се реши с помощта на технологията OFDM.

4.4. Подход за реализиране на софтуерно дефинирани радио-комуникационни системи чрез ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране и сложни комплементарни сигнали

От данните, систематизирани в § 3.1, се вижда, че чрез технологията OFDM лесно могат да се реализират независимите честотни канали, необходими за комуникация чрез комплементарни сигнали, както и да се реализира и криптографска защита на изпращаните съобщения. Предвид на тези факти, при анализа в настоящия параграф ще бъде използвана фиг. 35 [119].



Фигура - 35 Структурна схема на модифициран OFDM предавател [71]

Както беше посочено в § 4.1, OFDM сигналите се формират чрез N хармонични подносещи честоти, които са разделени с честотни интервали с еднаква ширина Δf . По-конкретно, цялата честотна лента ΔF , заемана от един OFDM сигнал, е разделена на N честотни подканала с ширина $\Delta f = 1/T_c$, където T_c е продължителността на символния интервал. Следователно, $\Delta F = N\Delta f = N/T_c$. Този технически подход осигурява основното предимство на OFDM комуникационните системи – способността да противостоят на сложни условия в канала чрез адекватно канално изравняване (адаптиране на спектъра на каналните сигнали към честотната предавателна характеристика на канала).

Това изравняване се опростява от факта, че OFDM сигналят реално е ансамбъл от бавно модулирани тяснолентови сигнали. Действително, на Фиг. 35 $s[n]$ е последователен поток от бинарни символи, които трябва да бъдат изпратени към приемника по комуникационния канал с ширина ΔF . За тази цел преди бързото обратно преобразование на Фурие (БПФ, inverse fast Fourier transform - FFT^{-1}), информационният поток $s[n]$ се разделя на N паралелни подпотока, след което всеки от тях се преобразува в подпоток от елементарни фазови импулси (чипове, символи), използвайки фазова (BPSK, QPSK, 8-PSK) или квадратурна амплитудно-фазова (QAM) модулация. При използване на BPSK модулация, съответният подпоток от символи се състои от цифрите +1 и -1. При прилагане на QPSK, 8-PSK, QAM модулация резултатът е подпоток от комплексни числа. Тъй като подпотоците са независими, методите за модулация могат да бъдат различни. По тази причина количеството битове, пренасяни от символите във всеки подпоток, също може да бъде различно. С други думи, различните подпотоци могат да имат различни скорости на предаване на информация. Тук следва да се отбележи специално, че обратното БПФ се изчислява за всеки N едновременно пристигащи символи, при което се получава цифров сигнал от N отчета в честотната област, които са комплексни числа. След това, два цифро-аналогови преобразувателя (ЦАП, digital-to-analog converters - DACs)

превръщат поотделно сумите на реалните и имагинерните части на честотните отчети в два аналогови сигнала, които модулират амплитудно двете носещи трептения $u_c(t) = U_m \cos(2\pi f_0)$, $u_s(t) = U_m \sin(2\pi f_0)$, като тук f_0 е високата носеща честота. Накрая двете амплитудно модулирани носещи трептения $u_c(t)$, $u_s(t)$ се сумират и формират сигнала $s(t)$, който се излъчва от антената.

Възможността за изграждане на шумозащитени и сигурни SDR РКМ чрез използване на технологията OFDM и сложни комплементарни произтича от следните обстоятелства.

Първо, съвременните комуникационните и компютърни мрежи са съставени от относително самостоятелни обособени единици (персонални компютри, различни терминали, друга комуникационна техника), които обработват, предават и/или приемат информация като отворени системи (ОС, Open System – OS). При това, съгласно концепцията за защита при взаимодействие на ОС (OSI - Open System Interconnection) са дефинирани следните основни служби (услуги) за сигурност (ISO 7498-2, 1989):

- *служба (услуга) за секретност на данните* – обезпечава защита на съдържанието на данните, т. е. конфиденциалност на съдържанието на данните;

- *служба (услуга) за секретност на потока от данни* – осигурява защита срещу анализ на трафика или с други думи – конфиденциалност на сеансите на връзка;

- *служба (услуга) за поддържане на целостта на данните* – открива въздействия върху поток от данни без възстановяване или с възможност за възстановяване, както и прекъсвания при предаването на данни;

- *служба (услуга) за потвърждения* – осигурява на източника доказателство за правилната доставка на данните, а на получателя – доказателство за произхода на получените данни (верификация на сеансите на връзка);

- *служба (услуга) за автентификация и контрол на достъпа.*

Второ, шумозащитеността е много важен показател за ефективността на комуникационните и компютърните мрежи тъй като тя характеризира

способността на тези мрежи да се противопоставят на мерките за радиоелектронно подавяне (РЕП).

Както е известно, в общия случай РЕП включва два последователни етапа - радиотехническо разузнаване (РЕР) и радиопротиводействие. Целта на РЕР е установяването на работата (излъчването) на радиоелектронната система и определяне на нейните параметри, необходими за организация на радиопротиводействието. На тази база при радиопротиводействието се създават такива условия, които биха затруднили работата на системата или въобще биха привели до срив изпълнението на задачата.

Способността на системата да противостои на РЕР се нарича скритост, а способността на системата да изпълнява своите задачи в условията на РЕП се нарича шумоустойчивост.

РЕР се състои в последователното изпълнение на три основни задачи: откриване сигналите на разузнаваната система, анализ на структурата на откритите сигнали (определяне на техните параметри) и разкриване на съдържащата се в сигналите информация. Последната задача има и самостоятелно значение, защото разкриването на предаваната информация, позволява по-ефективно да се организира РЕП.

Във връзка със задачите, които решава РЕР, скритостта е три вида: енергетическа, структурна и информационна (т.е. криптоустойчивост).

Енергетическата скритост се характеризира със способността системата да остане незабелязана от разузнавателните приемни устройства. Структурната скритост характеризира способността на системата да затрудни максимално разкриването на принципите на модулация на сигнала, неговите честотни и временни параметри. Следователно за увеличаване на структурната скритост е необходимо в системата да могат да се използват голям брой сигнали, както и да е възможно достатъчно бързо да се изменя формата на сигналите.

Информационната скритост се характеризира със способността на системата да противостои на мерките, насочени към разкриване на смисъла на информацията, предавана с помощта на сигнали. Информационната скритост

се нарича още криптоустойчивост и представлява важен самостоятелен научен проблем.

Анализът, направен в този параграф показва, че с помощта на технологията OFDM и комплементарни сигнали могат да се изградят шумозащитени и сигурни SDR РКМ, подобряващи качеството на функциониране на следните служби (услуги) в OSI-модела.

1) *Служба (услуга) за секретност на потока от данни*

Конфиденциалността на сеансите на връзка и защитата срещу анализ на трафика се основава на следните свойства на комплементарните сигнали, анализирани в предходния параграф.

Първо, комплементарните сигнали използват широка честотна лента ΔF_{CS} , в резултат на което тяхната спектралната плътност

$$P_{0CS} = \frac{P_{CS}}{\Delta F_{CS}} \quad (69)$$

е много малка (в (69) P_{CS} е мощността на излъчените сигнали, необходима за осигуряване на нормална работа на приемника). Ниските стойности на спектралната плътност P_{0CS} на използваните комплементарни сигнали прави практически невъзможно тяхното откриване от разузнавателните приемници.

Тук следва специално да се отбележи, че в случаите на извънредни обстоятелства като природни бедствия, аварии и катастрофи базата B на излъчваните комплементарни сигнали може да се повиши много съществено чрез използване на голям брой честотни канали и/или елементарни фазови импулси (чипове), което осигурява устойчива и надеждна комуникация с екипите, извършващи спасителни операции в засегнатата област [82].

Второ, фамилии от обобщени комплементарни множества могат да бъдат генерирани като се използват голям брой технологии за фазова модулация и различен брой независими честотни канали.

Трето, в комуникационния канал на OFDM системата с ширина ΔF , съдържащ N подканала, могат да бъдат използвани едновременно както фамилии от обобщени комплементарни множества така и много други сложни ФМ сигнали с оптимални корелационни [83],[84], [85], ([86], [122]). Това води

до необходимостта в разузнавателните приемници да бъдат взети под внимание много голям брой от възможни последователни подреждания (формиращи пермутации с повторения на подканалите $k = 0, 1, \dots, N - 1$) на алгоритмите за QAM.

Последните две обстоятелства, както и ниската вероятност за прехващане, затрудняват изключително много задачата за анализ на трафика на OFDM комуникационна система, използваща комплементарни сигнали.

2) Служба (услуга) за секретност на потока от данни

Защитата на съдържанието (смисъла) на данните се основава на следните свойства на OFDM комуникационните системи [119].

Първо, конфиденциалността на всеки подпоток $X_0, X_1, \dots, X_{N-2}, X_{N-1}$ (фиг. 35) може се осигури чрез използването на различни (индивидуално назначени) поточни шифри (означени като $SC_0, SC_1, \dots, SC_{N-2}, SC_{N-1}$ (stream cipher - SC) на фиг. 35).

Второ, съвременните блокови шифри се характеризират с висока криптоустойчивост по принцип. Същевременно, от фиг. 35 се вижда, че в OFDM комуникационните системи може да се използва блоков шифър за криптиране на потока от блокове, съставени от всички символи $X_0, X_1, \dots, X_{N-2}, X_{N-1}$ във всеки тактов (символен) интервал T_c .

В заключение следва специално да се отбележи, че от една страна технологията OFDM и комплементарни сигнали, а от друга страна средства за сигурност като: цифрови подписи, средства за автентификация и контрол на достъпа, средства за обезпечаване на целостта на данните и др. могат да се прилагат от службите за сигурност самостоятелно или в комбинация.

При отчитане на типа на модулацията (1024QAM), валидните подносещи, защитните интервали и конфигурация от типа 8*8 MIMO публикувани от Хуауей [67] може да се изчисли теоретичната скорост за дадено устройство както следва:

$$\text{Скорост на устройството за } 2.4 \text{ GHz} = \frac{4 \cdot 10 \text{ bits} \cdot \frac{5}{6} \cdot 468}{(12,8+0,8) \cdot 10^{-6}} = 1147 \cdot \frac{10^6 \text{ bit}}{s} = 1147 \text{ Mb/s} \quad (70)$$

$$\text{Скорост на устройството за } 5 \text{ GHz} = \frac{8 \cdot 10 \text{ bits} \cdot \frac{5}{6} \cdot 1960}{(12,8+0,8) \cdot 10^{-6}} = 9607 \cdot \frac{10^6 \text{ bit}}{\text{s}} = 9607 \text{ Mb/s} \quad (71)$$

4.5. Изводи по глава IV

В Глава IV са получени следните основни резултати.

1. Синтезиран е общ алгоритъм за приложение на информацията за пространственото разположение на потребителите в процеса на автоматизирано управление на РКМ, реализиращи концепцията на SDR чрез OFDM (§ 4.1).
2. Разработена е компютърна лаборатория за анализ и синтез на сложни комплементарни ФМ сигнали (§ 4.3), което позволява да се минимизират така наречените взаимни смущения (multi access interferences - MAIs), предизвикани от едновременното използване на комуникационния канал от много потребители.
3. Обоснован е подход за изграждане на SDR РКМ, притежаващи висока шумозащитеност и устойчивост на функционирането в екстремални условия, чрез използване на технологията OFDM и сложни комплементарни сигнали.

Заклучение

В резултат на изследването в рамките на дисертационния труд са получени следните основни резултати:

- **Научен принос:**

1. Разработен е алгоритъм за приложение на информацията за пространственото разположение на потребителите в процеса на автоматизирано управление на софтуерно дефинирана радио-комуникационна мрежа, реализирана чрез ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране § 4.1.

- **Научно-приложни приноси:**

1. Анализирани са методите и техниките за следене на електромагнитната среда и е представен подход за компютърно подпомагано предоставяне на честотни канали § 2.
2. Обоснована е класификация и изисквания към алгоритмите за определяне на пространственото местоположение на потребителите и подход за приложение на добитата информацията за подобряване на използването на електромагнитния спектър § 3.2.1.
3. Разработен е подход за реализиране на софтуерно дефинирани радио-комуникационни системи за скрит (шумозащитен) обмен на данни, чрез използване на сложни комплементарни сигнали в система базираща се на ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране § 4.4.

- **Приложни приноси:**

1. Анализирани са предизвикателствата в безжичните комуникационни мрежи и системи и са показани методите за решаване на задачата за динамичен достъп до честотните ресурси § 1.1, § 1.5.

2. Обоснован е подход за изграждане на софтуерни архитектури за автоматизирано следене и управление на радиочестотния спектър § 2.6.
3. Анализирани са стандартите за споделено използване на честотни ресурси в нелицензирания диапазон и структурата на канал за предаване на данни с използване на ортогонално честотно разделяне и мултиплексиране § 3.1.

- **Списък на публикациите по дисертацията**

1. Неделчев М., Богданов Р., Софтуерно дефинирани радиосистеми с военно предназначение – предимства и предизвикателства, *Списание СЮ*, ISSN 1312 – 5605, месец Юли 2019 г.
2. Неделчев М., Обзор на техниките за следене на честотния спектър, *Годишник на НВУ „Васил Левски“ Част I*, ISSN 1312 6148, 2019 година *стр. 13-20*
3. Неделчев М., Беджев Б., Подход за приложение на информацията за пространственото разположение на потребителите за подобряване на използването на електромагнитния спектър, *Международна научна конференция „Отбранителни технологии 2020“* ISSN 2367-7902, Шумен, 2020, *стр.253-259*
4. Nedelchev M., Marinov D, Stoyanov D., Parvanov S., Д. „An approach for building secure communication by means of complementary signals“, *Proceedings of University of Ruse - 2022*, volume 61, book 3.2., *pp 153-160*

5. Литература

[1] Ангелов И., „Приложение на технологията на когнитивното радио за военни цели,“ в СЮ , СЮ Media, 2017

[2] Ангелов К., „Енергетично индуцирани смущения при услугите от службата за стереофонично радиоразпръскване“, Габрово, Международна научна конференция „Унитех“, 2018

[3] Беджев Б., Неделчев, М, „Подход за приложение на информацията за пространственото разположение на потребителите за подобряване на използването на електромагнитния спектър“, Международна научна конференция „Отбранителни технологии 2020,“Шумен, , ISSN 2367-7902, стр.253-259.,2020

[4] Беджев, Б., „Анализ и синтез на системи от сигнали”, Шуменски Университет „Епископ Константин Преславски”, Факултет по Технически науки, стр.107-109, 2008

[5] Беджева М., Игнатова Т., , Analysis of the accuracy of geodesical maps prepared by means of UAVs, Proceedings of university of Ruse, volume 58 (на български), ISSN 2603-4123 (online), 2019

[6] Богданов Р., Когнитивното радио – следващ етап в развитието на радиокомуникациите, Списание СЮ, бр. 9, https://cio.bg/digitalizacia/2012/10/03/3444395_kognitivnoto_radio_sledvasht_etap_v_razvitiето_na/, 2012

[7] Богданов Р., Състояние и перспективи за развитие на технологията SDR, Сборник научни трудове на научна конференция на Факултет „А, ПВО и КИС”, 13-15 ноември 2011, част 1 „Комуникационни и информационни системи”, Шумен, Химера, 2012, стр. 186-192

[8] Варакин Л. Е., Системы связи с шумоподобными сигналами - М.: Радио и связь, 1985. – 384 с

[9] Диксон Р. К., Широкополосные системы, Перевод с англ. – М.: Связь, 1979.- 304 с

[10] Желязков Г, Иванов Д., , Методи и технологии за локализация на статични и динамични обекти, Списание на Институт по информационни и комуникационни технологии – БАН, [http://www.iict.bas.bg/acomin/events/8-10-October-](http://www.iict.bas.bg/acomin/events/8-10-October-2013/Methods%20and%20Technologies%20for%20Localization%20of%20Dynamic%20and%20Static%20Objects.pdf)

2013/Methods%20and%20Technologies%20for%20Localization%20of%20Dynamic%20and%20Static%20Objects.pdf ,2013

[11] Иванов В., Проектиране на част от елементите на софтуерно дефинирано радио, Дипломна работа, Шумен, 2019

[12] Коляденко Ю.Ю., Ткаченко А.М., Методи вирішення задач динамічного розподію спектра в системах когнітивного радіо, Съема Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку (EMC-2021)» 32-34, 2021

[13] Комисия за регулиране на съобщенията <https://crc.bg/bg/statii/166/tipovi-razresheniya-radiochestoten-spektr>, (Достъпна на 16.09.2021)

[14] Марков М. Теория на графите, <https://docplayer.bg/>

[15] Николов Л., Дисертационен труд на тема „изследване на реалната шумоустойчивост на комуникационните системи при предаване на цифрови сигнали в усложнена радиокомуникационна среда“, София, 2017

[16] Пасарелски Р., „Пето поколение (5G) – мобилни системи и технологии за комуникации на бъдещето, XXV conference Telecom 2017, 26-27 October,NSTC, Sofia, Bulgaria, ISSN: 1314-2690, Издателска група на Съюза на учените в България - София

[17] Пулков В. К., „Подход за предоставяне на повсеместна свързаност и ефективно управление на ресурси в потребителски ориентирани свръх плътни унифицирани безжични мрежи за достъп,“ София, 2019.

[18] Славянов К., „COMINT software implementation in a mission planning process”, II International Scientific Conference CONFSEC(на български), Proceedings VOL 2, pp. 221-224,ISSN print, 2603-2945 ISSN online, 2603-2953,Year 2, Issue 2(4),<http://confsec.eu/sbornik/2-2018.pdf>, 2018

[19] Сопронюк, И. И., Лысечко, В. П., Ухова, Е. А. Метод мониторинга спектра в когнитивных радиосетях на основе использования информационного критерия Акайке. Системы обработки информации, 2011:5, 108-112.

[20] Теорема на Шанън-Хартли
https://bg.wikipedia.org/wiki/Теорема_Шанън_Хартли

[21] Хубенов Д, Дисертационен труд на тема „Анализ и проектиране на когнитивни мрежи“, Шумен, 2018

[22] Чанев С., „Активни направления за повишаване на възможностите за противодействие на БЛА на бойното поле” Сборник научни трудове на Международната научна конференция „Отбранителни технологии“ DefTech 2021, Факултет “Артилерия, ПВО и КИС”, стр. 92-99, 2021

[23] Abdullahi M. M., Sani S. M. и Muazu M. B., „Cooperative Spectrum Sensing and Determination of Optimum Threshold in Cognitive Radio System,“ International Journal of Computer Applications, DOI:10.5120/21867-5198, vol. 122, pp. 32-38, July, 2015

[24] Aftab A. и Mufti M.N., „Spectrum Sensing Through Implementation of USRP2,“ в Master Thesis Electrical Engineering, Karlskrona, Sweden, November 2010.

[25] Akyildiz, Ian F., et al. "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey." Computer networks 50.13 (2006): 2127-2159.

[26] Asenov O. и Pulkov V., Multimedia and network Quality of Service, Aalborg, Denmark: Communications, Navigation, Sensing and Services, 2013

[27] Atanasov V. T., “SMART EDUCATIONAL CLUSTER CONCEPTUALIZATION”, Proceedings of International Scientific Conference “Defense Technologies” DefTech 2019, Faculty of Artillery, Air Defense and Communication and Information Systems, Shumen, 2019, p. 173, ISSN 2367-7902

[28] Awareness in 5G-Italy-White-eBook, Marsan M., Melazzi N., Buzzi S., 5G-Italy-White-eBook, page 167-184, Parma, ITALY

[29] Awin F.A., Alginahi Y.M., Abdel-Raheem E. “Technical Issues on Cognitive Radio-Based Internet of Things Systems: A Survey”, Article in IEEE Access, August 2019, Vol. 7., DOI: 10.1109, 2019

[30] Bedzhev, B., & Iliev, M.,. A General Method for Synthesis of Families of Orthogonal Complementary Codes. Technological Developments in Networking. Education and Automation, Springer, USA, 2010, No 1, pp. 487-492, Print ISBN 978-90-481-9150-5, Online ISBN 978-90-481-9151-2, 2010

[31] Bertsekas D., Dynamic Programming and Optimal Control, vol.1, Athena Scientific 2005

[32] Brunato M., Channel assignment algorithms in cellular networks, Universita degli studi di Trento, Dottorato di Ricerca in matematica, Chapter 3 Review of CA Algorithms, pp 9-14, 2001

[33] César A., Hernández-S., Luis F., Pedraza-Martínez, Enrique Rodríguez de la Colina , Fuzzy feedback algorithm for the spectral handoff in cognitive radio networks , Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, No. 80, pp. 47-62, 2016

[34] Christophe Moy, Amor Nafkha, Malek Naoues, , Reinforcement learning demonstrator for opportunistic spectrum access on real radio signals. IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum

[35] Clancy T. C., Achievable capacity under the interference temperature model, in Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), May 2007, pp. 794–802.

[36] Clancy T., W. Arbaugh, Measuring interference temperature, in Proceedings of Virginia Tech Wireless Personal Communications Symposium, June 2006.

[37] Coudé R., Radio Mobile Handbook, free radio propagation simulation program, URL <http://www.ve2dbe.com/english1.html>, (Accessed on 16.09.2021), 2007

[38] Electronic Communications Committee, , “Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to develop least restrictive

technical conditions for frequency bands addressed in the context of WAPECS Final Report”, 2008

[39] ETRI, Case study on spectrum management and monitoring in Korea, April 2018

[40] ETSI, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 14.2.0 Release 14), Document Number ETSI TS 136 211 V14.2.0 (2017-04), 2017, Available at https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/14.02.00_60/ts_136211v140200p.pdf

[41] European Commission ,” Radio Spectrum Policy Group”, RSPG13-538, 2013

[42] Farooq-i-Azam M., Naeem Ayyaz M.,() Location and Position Estimation in Wireless Sensor Networks, COMSATS Institute of Information Technology, Lahore, Pakistan, 2016

[43] FCC, „Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies,“ Notice of proposed rule making and order:, 2005.

[44] Federal Communications Commission (FCC) FCC: ET Docket No 03-108 Notice of proposed rule making and order: Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies.

[45] Federal Communications Commission, “Revision of Part 15 of the Commission’s Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems”, ET Docket 98-153, 2002

[46] Federal Communications Commission, Et docket no 03-237 notice of inquiry and notice of proposed rulemaking, FCC 03-289,. Available at <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-03-289A1.pdf> . , November 2003

[47] Federal Communications Commission: spectrum policy task force report, Federal Communications Commission ET Docket 02-135,. Available at <https://transition.fcc.gov/sptf/files/IPWGFfinalReport.pdf> . , November 2002

[48] Fehske A., J. Gaeddert, and J. H. Reed, A new approach to signal classification using spectral correlation and neural networks, in Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), , pp. 144–150., November 2005

[49] Fette B. A., B. Fette, Cognitive Radio Technology. Newnes, 2006.

[50] Ganesan G., Y. G. Li, Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks, in Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), November 2005, pp. 137–143.

[51] Garhwal, Anita; BHATTACHARYA, Partha Pratim. A survey on dynamic spectrum access techniques for cognitive radio. arXiv preprint arXiv:1201.1964, 2012.

[52] Ghasemi A., E. S. Sousa, Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environment, in Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), November 2005, pp. 131–136.

[53] Ghosh G., Das P. и Chatterjee S., Cognitive Radio And Dynamic Spectrum Access –A Study,“ International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN), том 6, pp. 43-58, March, 2014

[54] Ghosh, G., Das, Prasun. Chatterjee, Subhajit. Cognitive radio and dynamic spectrum access-A study. International Journal of Next-Generation Networks, 2014, 6.1: 43.

[55] GNU radio, „https://wiki.gnuradio.org/index.php/What_is_GNU_Radio%3F“, [Онлайн].

[56] Golay, M. (1961). Complementary series, IRE Transactions on Information Theory, 1961, vol. IT – 7, №2, pp. 82 – 87

[57] Gonzales C, C. B. Dietrich и J. H. Reed, „Understanding the software communications architecture,“,“ IEEE Communications Magazine, Том. %1 от %2vol. 47, no. 9., pp. pp. 50-57.,, 2008.

[58] Gultchev S., K. Moessner , D. Thilakawardana, T. Dodgson и R. Tafazolli , „Evaluation of Software Defined Radio Technology“, Centre for Communication Systems Research, University of Surrey

[59] Halldórsson, M.M., Halpern, J.Y., Li, L.E. . et al. On spectrum sharing games. *Distrib. Comput.* 22, 235–248 <https://doi.org/10.1007/s00446-010-0098-0>, 2010

[60] Hatfield D., P.Weiser, Property rights in spectrum: taking the next step, in *Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, November 2005, pp. 43–55.

[61] Hayes M. H., *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. Wiley, 1996.

[62] Haykin S., Cognitive radio: brain-empowered wireless communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005

[63] Hernández-Suárez C.A., Pedraza-Martínez L.F., Rodríguez de la Colina E, 2016. Fuzzy feedback algorithm for the spectral handoff in cognitive radio networks *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, No. 80, pp. 47-62

[64] https://bg.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0_%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F

[65] <https://habr.com/ru/post/332092/>

[66] <https://habr.com/ru/post/487138/>

[67] <https://habr.com/ru/company/huawei/blog/>

[68] <https://habr.com/ru/users/MikhailShpak/>

[69] <https://ieeexplore.ieee.org/browse/standards/dictionary?queryText=sdr&activeStatus=true>.

[70] https://rakurs.niir.ru/index_EN.html

[71] <https://ru.wikipedia.org/wiki/OFDM>

[72] [https://ursi.org/proceedings/procGA05/pdf/CP5.12\(0253\).pdf](https://ursi.org/proceedings/procGA05/pdf/CP5.12(0253).pdf)

[73] <https://web.archive.org/web/20110609125008/http://www.cotsjournalonline.com/articles/view/100056>.

[74] <http://www.jstor.com/stable/25060852>

- [75] <https://www.lstelcom.com/en/products/spectrum-management/spectra/>
- [76] https://www.litepoint.com/wp-content/uploads/2019/05/WiFi_Japan_Seminar_Sept2019_rev2.pdf
- [77] <https://www.nutaq.com/blog/short-history-software-defined-radio-sdr-technology>.
- [78] <https://www.rra.go.kr/en/intro/history.do>
- [79] <https://www.rtelecom.net/bg/product/225/planar-808-1-vektoren-analizator-na-mrezhi-100khz-8-0ghz.html>
- [80] <https://www.ve2dbe.com/english1.html>
- [81] https://www.wirelessinnovation.org/Introduction_to_SDR.
- [82] Iliev, M., & Bedzheva, M.,. An approach for application of UAVs for observation of processes in agriculture, Proceedings of 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE 2020), 12-14 November 2020, Ruse, Bulgaria, 2020
- [83] Iliev, M., Bedzhev, B., Bedzheva, M., & Kanchev, K. Approaches for Implementation of Golay's Complementary signals and Welty's Quaternary Signals in Radio-Communication Systems, Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Information Technologies (InfoTech-2021), 16-17 September 2021, St. St. Constantine and Elena, Bulgaria, 2021
- [84] Iliev, M., Bedzhev, B., Bedzheva, M., & Kanchev, K., A Survey of Periodic Binary Nearly Perfect Signals with Lengths $N \equiv 1 \pmod{4}$, Proceedings of 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2019, June 6 – 8, 2019, Varna, Bulgaria, 2019
- [85] Iliev, M., Bedzhev, B., Bedzheva, M., & Yanakiev, P., A Method for Synthesis of Nearly Ideal Phase Manipulated Signals, Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Information Technologies - InfoTech-2020, 17-18 September 2020, St. St. Constantine and Elena, Bulgaria
- [86] Iliev, M., Bedzheva, M., Kanchev, K., & Bedzhev, B.), A Survey of Periodic Binary Nearly Perfect Signals with Lengths $N \equiv 3 \pmod{4}$, Proceedings of 29th Annual Conference of the European Association for Education in Electrical

and Information Engineering – EAEEIE 2019, 4th - 6th September 2019, University of Ruse, Ruse, Bulgaria, 2019

[87] ISO 7498-2,. Information processing systems - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model - Part 2: Security Architecture, URL: <https://www.iso.org/standard/14256.html> ,1989

[88] ITU-R , Handbook on computer aided techniques for spectrum management (eds.), Chapter 3 Spectrum management data and database management, 22-28, 2015

[89] ITU-R, Handbook on computer aided techniques for spectrum management (eds.) Chapter 3 Spectrum management data and database management, pp129-136, 2015

[90] Jayakrishnan U., Venugopal V. , Algorithms for Dynamic Spectrum Access with Learning for Cognitive Radio, arXiv:0807.2677v4 [cs.NI] 6 Feb 2010

[91] Kacev I., “Analysis of the opportunities for employment unmanned aerial vehicles class mini in artillery formation”, Proceedings of International Scientific Conference “Defense Technologies” DefTech 2021, Faculty “Artillery, AD and CIS”, Shumen, Bulgaria pp 116-123, 2021

[92] Kaviarasu A. и Devapriya S., „SNR Based Adaptive Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks,“ International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), том 3, № 3, pp. 1438-1442, March,2014.

[93] Kaviarasu A. и Devapriya S., „SNR Based Adaptive Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks,“ International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), том 3, № 3, pp. 1438-1442, March,2014.

[94] Khan F. и Nakagawa K., „Comparative study of spectrum sensing techniques in cognitive radio networks,“ в Computer and Information Technology (WCCIT), 2013 World Congress, Тунисиса, June, 2013.

[95] Krutova O , Pavlyuk A., "Planning procedures for spectrum monitoring networks in the VHF/UHF frequency range," International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCEurope.2012.6396919. , 2012

[96] Krutova O. E., Kogan V. V. and Pavliouk A. P., "Advanced software for planning and optimization of spectrum monitoring networks," IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, pp. 76-79, doi: 10.1109/EMCECO.2005.1513067. , 2005

[97] Kuo-Chun H., Xiangpeng J., Dipankar R., „*MAC Protocol Adaptation in Cognitive Radio Networks: An Experimental Study*“, <https://www.winlab.rutgers.edu/~therom/PID892318.pdf>

[98] Kulev N. Zh., Bogdanov R. A., Hubenov D. K., “ADALM-PLUTO BUILD SDR SYSTEM TESTING”, Proceedings of International Scientific Conference “Defense Technologies” DefTech 2019, Faculty of Artillery, Air Defense and Communication and Information Systems, Shumen, p.392, ISSN 2367-7902, 2019,

[99] Kulev N. Zh., Yosifov Y. V., Hubenov D.K., “5G concepts for wireless communications”, Proceedings of International Scientific Conference “Defense Tehnologies”, Shumen, p.209, ISSN 2367-7902, 2018

[100] Kulev N. Zh., Yosifov Y.V., “Investigation of the logical channels used by mobile operators”, International Scientific Conference 2016, Shumen, Bulgaria, p.310, ISSN2367-7902, 2016

[101] Khorov, Evgeny & Kiryanov, Anton & Lyakhov, A. & Bianchi, Giuseppe. (2018). A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs. IEEE Communications Surveys & Tutorials. PP. 1-1. 10.1109/COMST.2018.2871099.

[102] Larsson E. G., Jorswieck E. A., Lindblom J. and Mochaourab R. Game Theory and the Flat-Fading Gaussian Interference Channel: Analyzing Resource Conflicts in Wireless Networks, , IEEE signal processing magazine, pp18-27. <http://dx.doi.org/10.1109/MSP.2009.933370>,2009

[103] Lavender T., Hogg T. (2015) “Licensed shared access:A report for the UK Spectrum Policy Forum”, October 2015

[104] Miden G. J., „KUAR: A Flexible Software-Defined Radio Development Platform,“, “ 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Dublin, 2007.

[105] Mitola III J., Maguire G. Q., „Cognitive radio: making software radios more personal”, IEEE Personal communication magazine vol.6, , pp 13-18, 1999

[106] Mitola J.III, „Software Radio Architecture: Object-Oriented Approaches to Wireless Systems Engineering,“ ISBN: 978-0-471-38492-2, 2000.

[107] Olanrewaju B.S., Osunade O., “Survey of Related Technologies for Improved Spectrum Efficiency”, IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), e-ISSN: 2250-3021, p-ISSN: 2278-8719, www.iosrjen.org, Volume 2, Issue 11, November 2012, pp 25-33.

[108] Onidare S.O, Navaie K., Ni Q., , “On the Spectrum and Energy Efficiency in Dynamic Licensed Shared Access Systems: A Multiobjective Optimization Approach”, Vol.7, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2019.2952686, 2019

[109] OpenAirInterface, „https://www.openairinterface.org/?page_id=466,“ [Онлайн]. Available: https://www.openairinterface.org/?page_id=466.

[110] Recommendation ITU-R SM.1537-1, (08/2013), Automation and integration of spectrum monitoring systems with automated spectrum management

[111] Report ITU-R SM.2356-2, Procedures for planning and optimization of spectrum-monitoring networks in the VHF/UHF frequency range, 06/2018

[112] Rohde & Schwarz ,“An Introduction to Direction Finding Methodologies“, <https://www.rohde-schwarz.com/direction-finding>

[113] Shivapanchakshari T. G., Aravinda H. S., (2017) “Review of Research Techniques to Improve System Performance of Smart Antenna”, Open Journal of Antennas and Propagation, 2017, 3-98 <http://www.scirp.org/journal/ojapr>, ISSN Online: 2329-8413,ISSN Print: 2329-8421

[114] Shukair M., „Qualcomm,“ [Онлайн]. Available: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2019/06/20/how-5g-massive-mimo-transforms-your-mobile-experiences>.

[115] Slavov D., Marinova N., Radev I., A comparative analysis of digital spectrum analyzers, Proceedings of International Scientific Conference “Defense Technologies” DefTech 2021, Faculty “Artillery, AD and CIS”, Shumen, Bulgaria (Оригинално заглавие: Славов, Д., Маринова, Н., Радев, Ив., 2021. Сравнителен анализ на цифрови спектрални анализатори. Шумен: Сборник научни трудове на Международната научна конференция „Отбранителни технологии“ DefTech 2021, Факултет “Артилерия, ПВО и КИС”), 2021

[116] Slavov Delyan, Atanasova Alexandra, Dimov Dimitar, (2021), Analysis of location methods for improving the use of the electromagnetic spectrum, Proceedings of International Scientific Conference “Defense Technologies” DefTech 2021, Faculty “Artillery, AD and CIS”, Shumen, Bulgaria (Оригинално заглавие: Славов, Д., Атанасова, А., Димов, Д., 2021. Анализ на методите за определяне на местоположение за подобряване използването на електромагнитния спектър. Шумен: Сборник научни трудове на Международната научна конференция „Отбранителни технологии“ DefTech 2021, Факултет “Артилерия, ПВО и КИС”), 2021

[117] Software Defined Radio Forum ,Transceiver Facility Specification “Where software defines the radio”, Working Document SDRF-08-S-0008-V1.0.0, 2009, Available at https://www.wirelessinnovation.org/assets/work_products/Specifications/sdrf-08-s-0008-v1.0.0%20transceiver%20facility%20specification-2009-01-28%20rev.pdf

[118] Spectrum Monitoring with Hybrid AOA/TDOA Geolocation,(2014), White Paper, https://cdn.rohde-schwarz.com/us/campaigns_2/a_d/Spectrum-Monitoring-with-Hybrid-AOA-TDOA-Geolocation.pdf

[119] Stoynov, D., Raev, D., & Radev, I., Approaches for providing cybersecurity of present power line communications, Proceedings of International Scientific Conference “Defense Technologies” DefTech 2022, 28-30 September 2022, Shumen, Bulgaria, ISBN: 2367-7902, 2022.

[120] Tseng, C., & Liu, S.. Complementary sets of sequences, IEEE Transactions on Information Theory, 1972, vol. IT- 18, №5, p. 644 – 652, 1972

[121] Vinogradov E., , State of the art- Ways for increasing spectrum efficiency and implementation of new radio technologies, Information technology and telecommunication vol.4 №1, pp 68-78, 2016

[122] Yanakiev, P., & Bedzheva, M., 2018. Computer laboratory for automated synthesis of phase manipulated signals, Proceedings of International Scientific Conference “UniTech’18”, 16-17 November 2018, Gabrovo, Bulgaria, pp. II.11 – II.15, ISBN: 1313-230X (Оригинално заглавие: Янакиев, П. и Беджева, М.,2018. Компютърна лаборатория за автоматизиран синтез на фазово манипулирани сигнали, МНК УНИТЕХ 2018, 16-17.11.2018, Габрово, ISBN 1313-230X).

[123] Yousef Q., Pradyumna J., Sharath K., Hani A., ECE/CS 570 , Application specific procesors, Project final report

1. Декларация за оригиналност на резултатите

Декларирам, че настоящият дисертационен труд съдържа оригинални резултати, получени при проведени от мен научни изследвания. 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 образователна и научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис: кап. инж. Мирослав Неделчев

Декларация за защита на класифицираната информация

Декларирам, че в разработения от мен дисертационен труд не съществува класифицирана информация по смисъла на Закона за защита на класифицираната информация и правилника за неговото прилагане.

Подпис: кап. инж. Мирослав Неделчев