



**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

АВТОР: К-Н ИНЖ. МИРОСЛАВ ГЕОРГИЕВ НЕДЕЛЧЕВ

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

АВТОРЕФЕРАТ

**НА ДИСЕРТАЦИЯ 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“**

НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ

ДОЦ. Д-Р ИНЖ. РОСЕН АТАНАСОВ БОГДАНОВ

**ШУМЕН
2023**

Дисертационният труд се състои от 143 листа.

Основен текст - 130 листа.

Брой на фигурите - 35

Брой на таблиците - 6

Брой на листингите - 3

Брой на литературните източници - 123

Брой на публикациите по дисертацията – 4

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от катедра „Комуникационни мрежи и системи“ във факултет „Артилерия, ПВО и КИС“ при Национален военен университет „Васил Левски“.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 7.07.2023 г. от 11.00. часа в зала 08311 на факултет „Артилерия, ПВО и КИС“, гр. Шумен, ул. „Карел Шкорпил“ на открито заседание на научно жури в състав:

От квотата на външните членове:

1. проф. д.т.н. инж. Михаил Илиев – Русенски университет „Ангел Кънчев“, П.Н 5.3.

2. доц. д-р инж. Валентин Ангелов Мутков – Русенски университет „Ангел Кънчев“, П.Н 5.3.

3. доц. д-р инж. Тихомир Спирдонов Трифонов – Шуменски Университет „Епископ Константин Преславски П.Н 5.3.

Резервен член: доц. д-р инж. Адриана Найденова Бороджиева – Русенски университет „Ангел Кънчев“, ПН 5.3.

От квотата на вътрешните членове:

1. професор д.т.н Борислав Йорданов Беджев – П.Н 5.3.

2. доц. д-р Николай Жечев Кулев - П.Н 5.3

Резервен член: подп. доц. д-р инж. Линко Георгиев Николов – П.Н 5.3.

Материалите по защитата са на разположение на интересующите се в стая 08305 на факултет „Артилерия, ПВО и КИС“, гр. Шумен, ул. „Карел Шкорпил“ 1.

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 радио комуникационна мрежа за динамичен достъп до честотните ресурси, чрез ортогонално разделяне и мултиплексиране. Предложен е и подход за реализиране на софтуерно дефинирани радио-комуникационни 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

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.

1.1.5. Технологии за динамичен достъп до спектъра.

За да се подобри ефективността на спектъра, се допуска съвместно съществуване и използване [104] на радиосистемите в един и същ честотен диапазон, чрез парадигмата за динамичен достъп до спектъра. Под динамично управление на спектъра се разбира способността на радио оборудването 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 [107] 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 [80] 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],[98],[99].

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

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 [109]:

- 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;

1.2.2. Софтуер за наблюдение и оптимизиране използването 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.

Повечето софтуерни архитектури осигуряват 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).

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

Самият термин "Software Defined Radio" е предложен през 1991 г. от Joseph Mitola, който пръв публикува доклад [104] по темата през 1992 г..

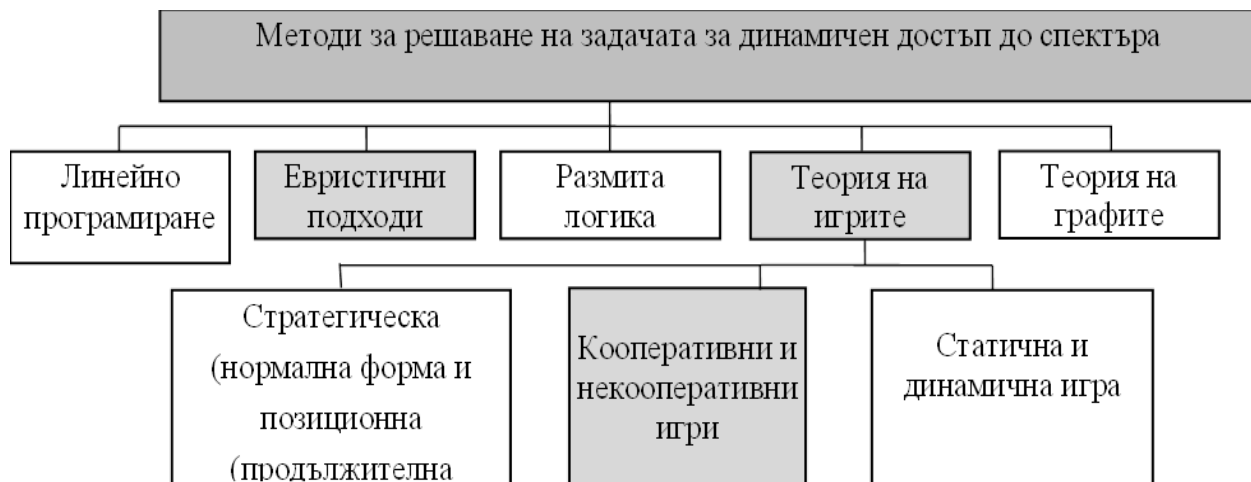
1.4. Етапи на развитие на SDR



Фигура - 7 Етапи в развитието на SDR [1]

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],[101].



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

1.6. 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

2.2. 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 и модулацията .;

- 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.

2.2.1. Следене на границата на интерференция

2.2.2. 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] .

2.2.3. 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].

2.3. 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.

2.4. Вземане на решение за достъп до радиочестотния спектър

Някои от изследователските въпроси, свързани с вземане на решение за достъп до радиочестотния спектър на нелицензирани 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.

- ***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.

2.5. 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

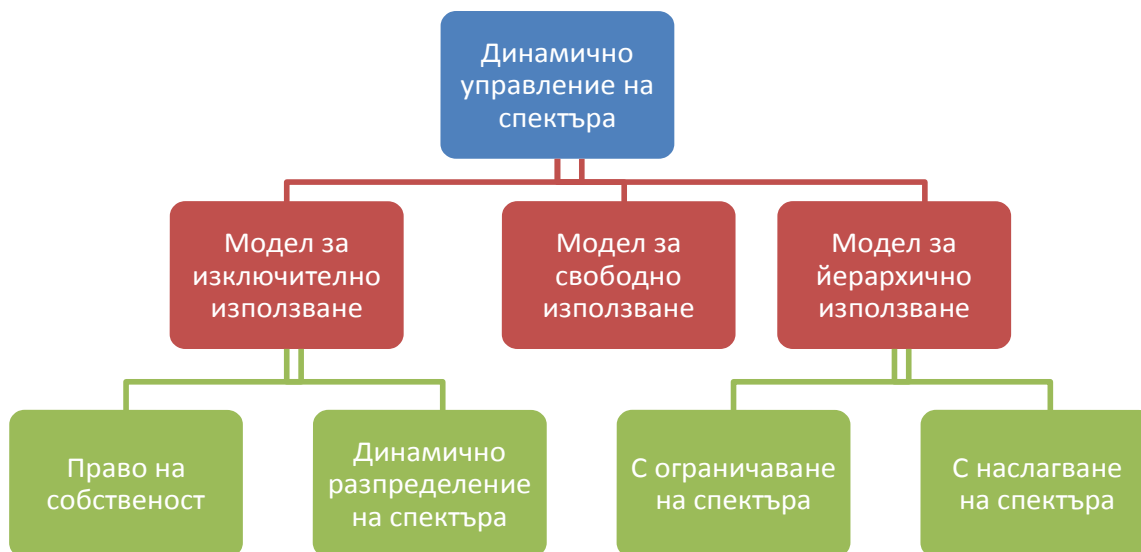
прекъсване, както на приложението, така и на услугата, поради промяна в околната радиосреда [40], [43], [46].

2.6.Динамичен достъп до спектъра.

2.6.1. 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 фиг 14.



Фигура - 14 Способи за достъп до честотния спектър

2.6.2. 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 [120]:

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

2.6.3. Следене на спектъра в когнитивните мрежи

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.

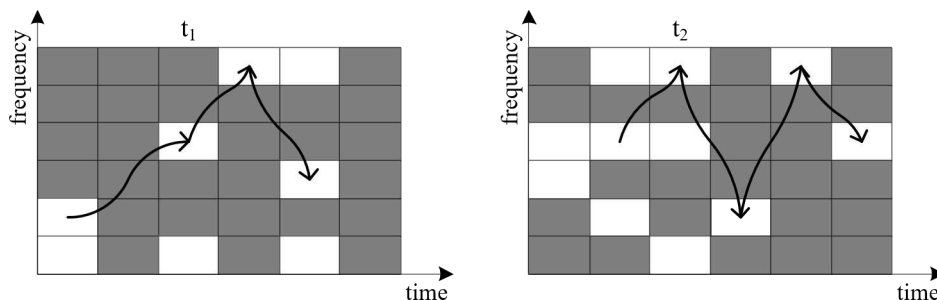
- Правилно определяне на спектралните дупки.
- Наблюдение на спектъра в реално време.

Най-общо тези места се класифицират, като [93]:

- 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.

- Времени 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.



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

2.7. Подход за компютърно подпомагано предоставяне на честотни канали

2.7.1. Рискове и ползи от компютърно подпомаганото управление на спектъра

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:

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

2.7.3. 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.

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.

2.7.4. Топология и свързаност

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 [115].

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 антена та	ДН Д	Височи на на антенат а	Поляризац ия	Надморс ка височина	Профи л на терена
...	...	...	...	...	...

2.7.5. Алгоритми за назначаване на честоти и канали

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.

2.8. Изводи по глава втора

1. Изборът на ресурси (канални) 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.

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

3.2.1. Безжична локална мрежа по стандарт IEEE 802.11

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 . 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;

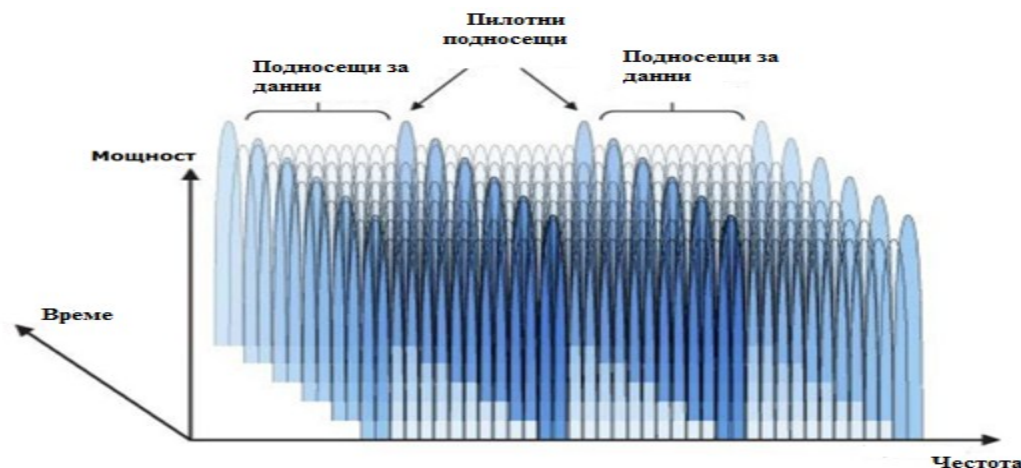
Заявка за изпращане/Изчистване за изпращане (RTS/CTS)

Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Намалено междуканално пространство (SIFS)

Фигура - 20 Технологии зареализиране 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.

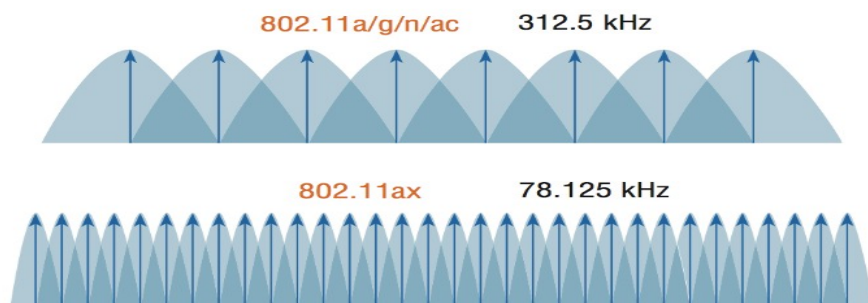


Фигура - 21 Ресурсни елементи на система за безжичен достъп, работеща на принципите на OFDM [66]

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

Пилотните подносещи са проектирани да синхронизират предавателя и приемника [70]. 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.



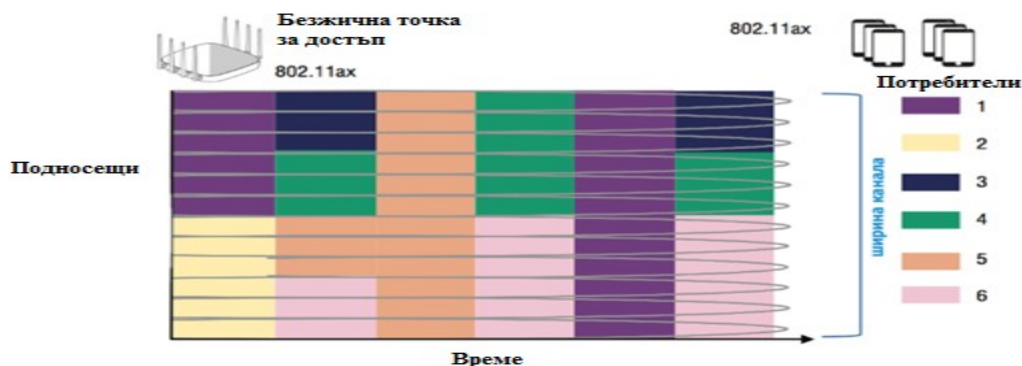
Фигура - 22 Ширина на подносещите [70]

3.2.3. Функции предоставяни от OFDMA в IEEE 802.11 ax

1) Ресурсно разпределяне

В [67] е описан процеса на разпределяне на ресурсите за 20 MHz канал съдържащ 242 подносещи, е разделен на два канала от по 106 подносещи, 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 подносещи и изпраща данни до потребители 3, 4, 5 и 6. При третото предаване OFDMA може да изпрати цялата мощност на канала с 242 подносещи 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 [67]

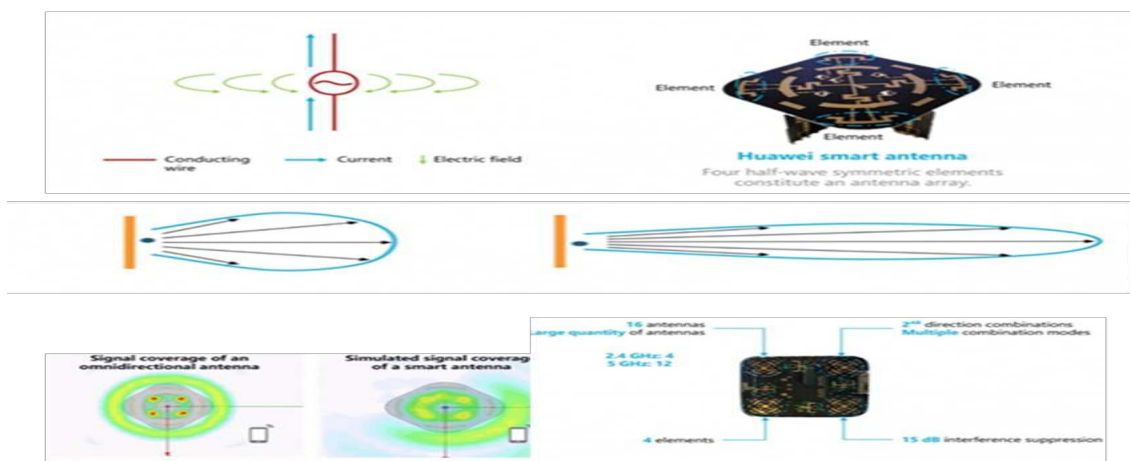
2) **Пространствено разделяне:**

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).

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 [67].

Натоварването върху тях може да се регулира в реално време, образувайки модели на разпространение в зависимост от пространствената позиция на потребителя [113], 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) [66].



Фигура - 25 Формиране на пространствен поток [67]

3.3. 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.

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.

3.3.1. 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 [115].

3.3.2. 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],[111] могат да бъдат:

- мощност на приетия сигнал (RSS- Received Signal Strength) – силата на постъпилия 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 [117];

➤ ъгъл на постъпване (AoA) – представлява техника за обработка на сигнала, която извършва оценка на местоположението на постъпващите от кореспондента електромагнитни вълни [117].

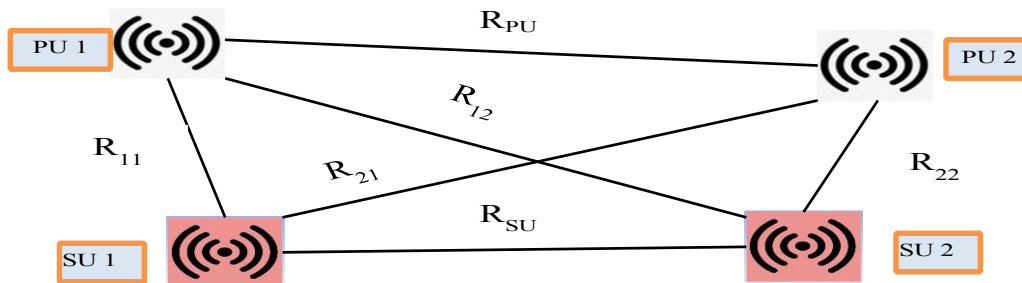
3.3.3. Подход за приложение на информацията за пространственото разположение на потребителите за подобряване на използването на електромагнитния спектър

По-конкретно, нека оторизираните потребители (primary users) на някаква радио-комуникационна мрежа са $PU1$ и $PU2$ (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, неоторизираните потребители (secondary users - $SU1$ и $SU2$) са измерили с достатъчна точност следните параметри:

П 1) Географско местоположение на $PU1$ и $PU2$;

П 2) Мощност на сигналите P_{PU} [W] излъчвани от предавателите на $PU1$ и $PU2$, 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 оторизираните и неоторизираните 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.

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

Максималната мощност на сигналите на неоторизираните потребители на входа на приемниците на оторизираните потребители ще бъде

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

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

Следователно

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

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

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

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

$$P_{rec\ SU} = \frac{P_{SU}}{4\pi R_{SU}^2}. \quad (27)$$

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

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

3.4. 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. Идеалната форма на сумарната АКФ на комплементарните сигнали дава възможност в приемниците на комуникационните системи сигналите, преминали различни пътища, да бъдат обработени поотделно. В резултат на това се минимизира така нареченото собствено или междусимволно смущаване (inter-symbol interference - ISI), породено от многолъчевото разпространение на радио вълните.

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

4.2. 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

АЛГОРИТЪМ

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

$$\begin{aligned}
Cp_1 &= \left\{ R(1)_{pi_1i_2}, R(1)_{pi_1i_3}, \dots, R(1)_{pi_{N_{p_1}-1}i_{N_{p_1}}} \right\}, \\
Cp_2 &= \left\{ R(2)_{pi_1i_2}, R(2)_{pi_1i_3}, \dots, R(2)_{pi_{N_{p_2}-1}i_{N_{p_2}}} \right\}, \\
&\dots\dots\dots, \\
Cp_k &= \left\{ R(k)_{pi_1i_2}, R(k)_{pi_1i_3}, \dots, R(k)_{pi_{i_m}i_m}, \dots, R(k)_{pi_{N_{p_k}-1}i_{N_{p_k}}} \right\}, \\
&\dots\dots\dots, \\
Cp_N &= \left\{ R(N)_{pi_1i_2}, R(N)_{pi_1i_3}, \dots, R(N)_{pi_{N_{p_N}-1}i_{N_{p_N}}} \right\}.
\end{aligned} \tag{32}$$

- $Cp_k, k=1, 2, \dots, N$ е множеството на разстоянията между потребителите на първичните РКМ, използващи k -тата подлента (k -тия канал), $k=1, 2, \dots, N$;
- $R(k)_{p_i i_m}$ е разстоянието между l -тия и m -тия потребители от множеството $Cp_k, k=1, 2, \dots, N$;

- N_{pk} е броят на потребителите на първичните РКМ, използващи k -тата подлента (k -тия канал), $k=1,2,\dots,N$ (ако $N_{pu}=0$ тогава множество C_{pu} е празно).

Очевидно:

$$N_p \geq N_{p1}, N_{p2}, \dots, N_{pk}, \dots, N_{pN}. \quad (33)$$

Стъпка 2: Определяне разстоянията между потребителите на първичната РКМ и потребителите на вторичната SDR РКМ

Информацията за географско местоположение на всеки от потребителите $PU1, PU2, \dots, PU_{N_p}$ и $SU1, SU2, \dots, SU_{N_s}$ на първичните и вторичната РКМ (П1) дава възможност да се изчислят елементите на следните множества:

2.1) Множество на разстоянията между потребителите на вторичната SDR РКМ:

$$Cs = \{R_{s11}, R_{s12}, \dots, R_{slm}, \dots, R_{sN_s-1N_s}\}; \quad (34)$$

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

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

В (35) R_{lm} е разстоянието между l -тия потребител ($SU1$) на вторичната SDR РКМ ($l=1,2,\dots,N_s$) и m -тия потребител ($PU m$) на първичните РКМ ($m=1,2,\dots,N_p$).

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

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 РКМ на входовете на приемниците на потребителите на първичните РКМ са:

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

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

В (36) са използвани следните означения:

- $P_{sp}(k)_{lm}$ 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 РКМ (т.е. на етапа на разпределение на честотните OFDM канали между потребителите на вторичната SDR РКМ);

- 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 $P_{sp}(k)_{lm}=0$ 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:

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

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

В (37) са използвани следните означения:

- $P_p(k)_{uv}$ 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 $PU v, v=1,2,\dots,N_p$;

- $P_p(k)_u$ 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. $R(k)_{puv} \in C_p(k)$);

- стойностите $P_p(k)_{uv}=0$ 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 PUu (т.е. потребителят PUu 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 PUu към потребителя PUm (т.е. капацитетът $I_{max}(k)_m$ на k -тия честотен канал, оценен от гледна точка на потребителя PUm) 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 $I_{max}(k)_{um} > Ir(k)_m > 0$ (т.е. ако възможната максимална скорост на предаване на информация по k -тия честотен канал към потребителя PUm 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 PUm , ако мощностите на техните сигнали $Psp(k)_{lm}$ осигуряват изпълнението на равенството

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

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

Следователно

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

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

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

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

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

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

$$k=1,2,\dots,N, l=1,2,\dots,N_s.$$

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

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

На базата на множеството C_s (Стъпка 2, формула (34)) на разстоянията между потребителите на вторичната SDR PKM 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 PKM, се изчисляват по формулата:

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

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

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 $SU w, w=1,2,\dots,N_s$;

- $Ps(k)_l$ 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 PKM в текущия времеви момент, се изчисляват по формулата

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

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

В (44) са използвани следните означения:

- $Ir(k)_{lw/lu}$ 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;

- $Ps(k)_{lw}$ е мощността на сигналите на потребителя $SU l, l=1,2,\dots,N_s$ в k -тата честотна подлента (k -тия канал), 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:

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

$$k=1,2,\dots,N, u=1,2,\dots,N_p, w=1,2,\dots,N_s.$$

В (45) са използвани следните означения:

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

- $R(k)_{lw}$ е определеното на Стъпка 2 разстояние между потребителите $PUu, u=1,2,\dots,N_p$ и $SUw, w=1,2,\dots,N_s$.

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

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 $PUu, u=1,2,\dots,N_p$

		Потребител $SU w$					
		1	2	...	w	...	N_s
Потребител	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:

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

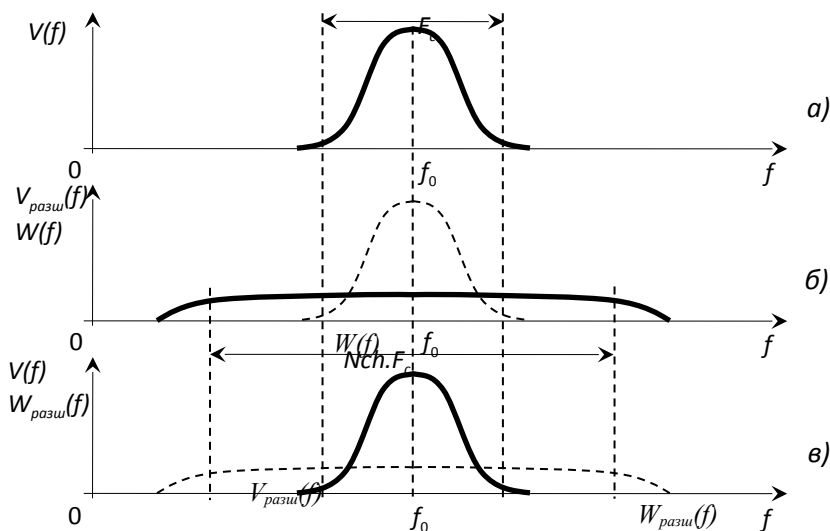
Предвид на (47) може да се обобщи, че комуникационното съединение „предаване на информация от потребителя $SU l$ - приемане на информация от потребителя $SU w_0$ “, при което скоростта на предаване на информация по k -тия честотен канал е най-висока, се определя от максималния елемент в последния ред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

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

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].

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

В (48) $v(t)$ е прост сигнал, пренасящ един информационен символ от предателя към приемника, $g(t)$ е разширяващата функция, а $v_{разш}(t)$ е резултантният сложен сигнал, чиято спектрална плътност $V_{разш}(f)$ 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].

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

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 $V_{разш}(f)$ 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

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

като неговата спектрална плътност $W_{разш}(f)$ 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_{un} на изхода на приемника се подобрява право пропорционално на разширяването на спектъра сигналите [8],[9], като

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

Тук $B=V_{разш}T_c, B \gg 1$ 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_{un} 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]:

$$K_{CC}=\frac{q_{un}^2}{q_0^2}. \quad (52)$$

се нарича *коефициент на усиление 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]:

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

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].

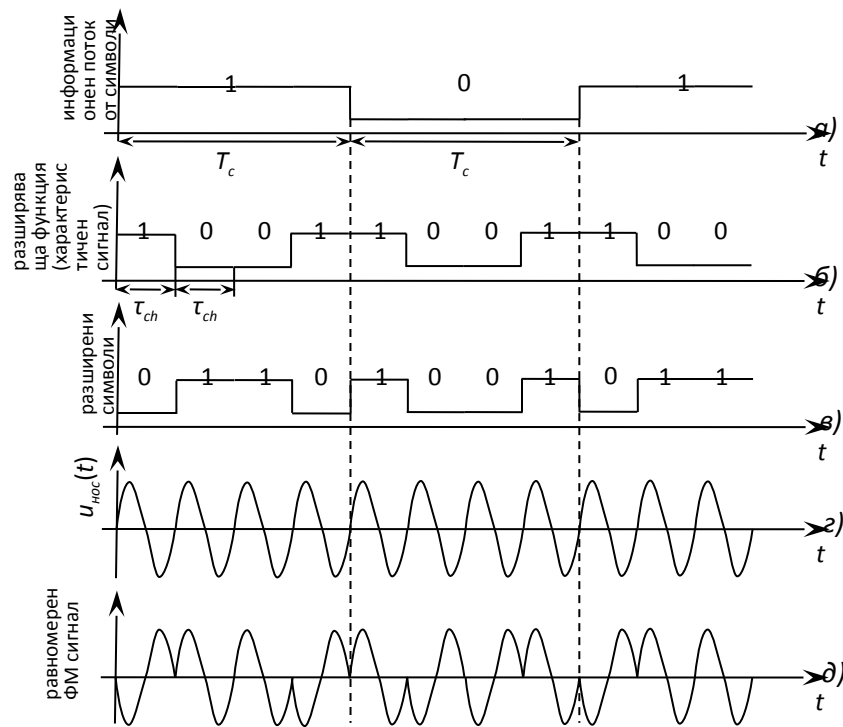
От (54) ясно се вижда, че използването от РКМ на СС води до повишаване на тяхната шумоустойчивост B пъти. Действително, нека отношението сигнал/шум по мощност на изхода на приемника, осигуряващо нормална работа на РКС, е $q_{un}^2 = q_0^2$. Ако започне подавяне РКМ със смущения, влошаващи отношението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

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

(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



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).

4.4. Компютърна система за анализ и синтез на комплементарни сигнали

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) непериодичните 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 „ $\dot{}$ “ 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 $N_0 = N_1^l N_2^l$, 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

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

Определение 2: Множеството от K на брой ФМ сигнали:

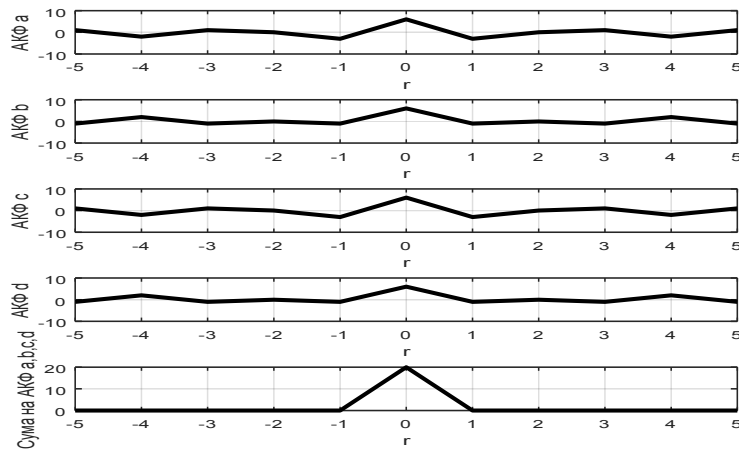
$$\{a_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{a_2(i)\}_{i=0}^{N_2-1}, \dots, \{a_K(i)\}_{i=0}^{N_K-1} \\ a_k(i) \in \left\{ e^{j \frac{2\pi l}{m_k}}, l=0, 1, \dots, m_k-1, k=1, 2, \dots, K \right\}, j=\sqrt{-1}, \quad (61)$$

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

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

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

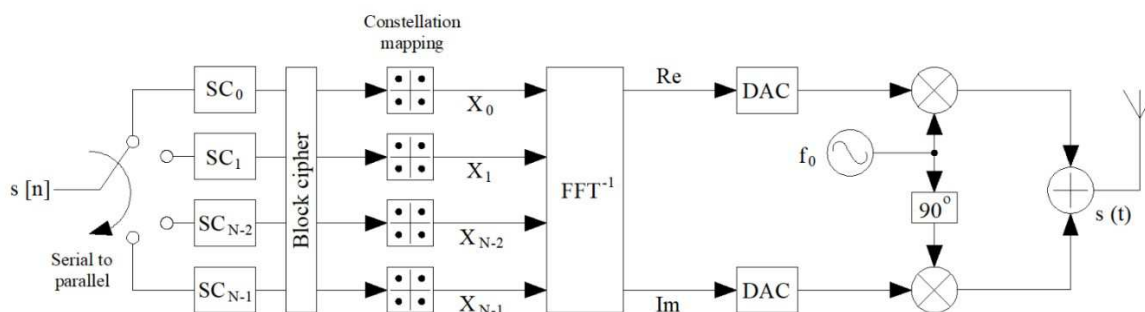
Предвид комутативността на операцията събиране, от (62) се вижда, че редът на бинарните ФМ сигнали, формиращи обобщено комплементарно множество, няма значение.



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

4.5. 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 [118].



Фигура - 35 Структурна схема на модифициран OFDM предавател [70]

Възможността за изграждане на шумозащитени и сигурни SDR PKM 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).

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 радио-електронно подавяне (РЕП).

4.6. 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 PKM, 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 PKM, 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 § 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 информация 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 OFDM § 3.1.

• **Списък на публикациите по дисертацията**

1. Неделчев М., Богданов Р., Софтуерно дефинирани радиосистеми с военно предназначение – предимства и предизвикателства, *Списание CIO*, 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

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



VASIL LEVSKI NATIONAL MILITARY UNIVERSITY

FACULTY OF "ARTILLERY, AIR FORCE AND CIS"

9713 Shumen , str . Karel Shkorpil " №1

phone : (054)801 040; fax :(054) 877,463; email:

decanat@aadcf.nvu.bg

AUTHOR: CAPT. ENG. MIROSLAV GEORGIEV NEDELICHEV

**"RESEARCH ON THE POSSIBILITIES OF BUILDING A
SOFTWARE-DEFINED RADIO SYSTEM FOR DYNAMIC
ACCESS TO FREQUENCY RESOURCES"**

AUTO-REFERENCE

**ON THE DISSERTATION FOR OBTAINING THE EDUCATIONAL
AND SCIENTIFIC DEGREE OF „DOCTORATE OF
PHILOSOPHY„**

FIELD OF HIGHER EDUCATION

**5. " TECHNICAL SCIENCES ",
PROFESSIONAL FIELD**

**5.3. " COMMUNICATION AND COMPUTER TECHNIQUES ",
SCIENTIFIC SPECIALTY**

02.07.20. " COMMUNICATION NETWORKS AND SYSTEMS "

SUPERVISOR

ASSOCIATE PROFESSOR ROSEN ATANASOV BOGDANOV, PH.D

SHUMEN

2023

The dissertation consists of 143 sheets.

Main text - 130 pages.

Number of figures - 35

Number of tables - 6

Number of listings - 3

Number of literary sources - 123

Number of publications on the dissertation – 4

The dissertation work has been discussed and scheduled for defense by the Department of "Communication Networks and Systems" in the Faculty of "Artillery, Air Defense and CSI" at Vasil Levski National Military University.

The defense of the dissertation will take place on 07.07.2023 at 11.00. o'clock in room 08311 of the Faculty of Artillery, Air Defense and CSI, Shumen, Karel Shkorpil Street , at an open meeting of a scientific jury composed of:

From the quota of external members:

1. Prof. Ph.D. Eng. Mihail Iliev - University of Rousse "Angel Kanchev",
2. Mutkov , Ph.D., Eng. - University of Rousse "Angel Kanchev"
3. Assoc. Prof. Dr. Eng. Tihomir Spiridonov Trifonov - Shumen University "Bishop Konstantin Preslavski

Reserve member: Assoc. Prof. Dr. Eng. Adriana Naydenova Borodzhieva - University of Ruse "Angel Kanchev"

From the quota of internal members:

1. Professor Borislav Yordanov Bedjev , Ph.D.
2. Assoc. Dr. Nikolay Zhechev Kulev Ph.D

Reserve member: Associate Professor Linko Georgiev Nikolov, Ph.D.

Defense materials are available to those interested in room 08305 of the Artillery, Air Defense and CSI Faculty, Shumen, 1 Karel Shkorpil Street .

INTRODUCTION

1. Scientific novelty of the dissertation work

The scientific novelty of the dissertation consists in:

- Analysis of the development of software-defined radio systems, allowing more efficient use of radio frequency resources.
- Analysis of spectrum monitoring methods and definition of possible solutions for building the system for dynamic access to frequency resources.
- Study of the properties and characteristics of software-defined radio systems for building a system for dynamic access to frequency resources based on orthogonal division and multiplexing .
- Analysis of software-defined systems as a means of mitigating the frequency distribution problem and its flexible use.

The object of the research is the software-defined radio systems that allow to use more efficiently those parts of the radio spectrum that are unused or lightly loaded.

The subject of the research is the capabilities of software-defined radio systems and networks for dynamic access, with a view to improving the usability of the radio spectrum .

2. Purpose and tasks of the dissertation work

The current dissertation work aims at the analysis of software-defined radio systems and the synthesis of algorithms for secure information exchange by using complex signals and the received information about the spatial location of users to ensure dynamic access to frequency resources.

To achieve the set goal, it is necessary to solve the following tasks:

1. Analysis of the development of software-defined wireless communication networks and systems, with the aim of discovering opportunities for their improvement and the creation of adaptive, highly efficient communication networks.

2. Comparative analysis of radio environment access models and decision-making algorithms for more efficient spectrum management in the ever-changing electromagnetic environment.

3. Analysis of spectrum monitoring methods in existing radio communication systems and definition of possible solutions for building the system for dynamic access to frequency resources.

4. Analysis of methods for determining the location of electromagnetic energy sources in a mixed multi-user environment.

5. Synthesis of algorithms for dynamic access to frequency resources.

6. Research of the properties and characteristics of complex signals and their integration into software defined radio systems.

Solving the above tasks provides an opportunity to improve the degree of use of the radio frequency spectrum in communication and information systems.

3. Structure of the dissertation

This dissertation consists of an introduction, four chapters and a bibliography.

In the introduction , the topicality of the topic of the dissertation is substantiated, the goal is formulated and the tasks of the research, the object and the subject of the research are defined.

In the first chapter, modern concepts for improving the usability of frequency resources, software architectures for automated monitoring and existing software-defined radio projects are analyzed and presented. The architecture and research to develop and create a single unified platform to meet the requirements for software defined radio systems and capabilities to ensure the efficient use of radio frequency spectrum is presented. The problems in realizing and deploying platforms in complex self -tuning radio networks and the challenges in controlling reconfigurability are described .

The second chapter presents the methods and techniques for monitoring frequency resources. Monitoring of the interference boundary and opportunities to optimize the overall process of detecting frequency resources. Sharing models and frequency resource sharing requirements are presented.

An approach to computer-aided provisioning of frequency channels, the possible risks and requirements for the format of the data to be shared are presented.

In the third chapter, the approaches to building a system based on the resource sharing paradigm, the approaches to determining location, as an essential element in determining the output power in broadcasting, are presented. An approach for building secure communications through complementary signals is presented.

In the fourth chapter, approaches are presented for using the received information on the spatial location of users to implement automated management of a software-defined radio communication network for dynamic access to frequency resources, through orthogonal division and multiplexing . An approach for realizing software-defined radio-communication systems through orthogonal frequency division and multiplexing , through the use of complex complementary signals, is also proposed.

4. Scientific-methodical and pedagogical usefulness

The scientific-methodical and pedagogical usefulness is expressed in the accessible and methodically consistent research of the problems, bringing the results to engineering implementation, using the obtained results as a basis for further improvement of modern communication systems.

Chapter 1. Contemporary approaches for increasing the efficiency in using the spectrum and implementing new technologies

1. Challenges to wireless radio communication systems and technological solutions for shared use of the radio frequency spectrum

1.1. Approaches to efficient use of the electromagnetic spectrum

Strict regulation and restriction of access to appropriate frequencies is a limitation to the entry and use of new technologies. This necessitates looking for other approaches for coexistence, more efficient use of different wireless systems while maintaining quality of service (QoS) requirements, in order to achieve maximum compaction of the radio frequency spectrum.

1.1.5. Technologies for dynamic spectrum access.

To improve spectrum efficiency, coexistence and usage is allowed [104] of radio systems in the same frequency range, through the dynamic spectrum access paradigm. Dynamic spectrum management refers to the ability of radio equipment to autonomously and dynamically optimize its basic parameters in order to provide opportunities for planning, assigning and allocating frequency resources. The efficient use of the spectrum [107] is achieved by , when a device prioritizes resources or limits emissions to a certain permissible level or causes minimal disruption to the work of the main users.

Software-defined radio (SDR) and cognitive radio (CR) systems provide a technological solution [80] to implement shared and dynamic access models and represent an additional tool for flexible spectral and energy-efficient use of the electromagnetic spectrum [1],[6], [26],[51],[98],[99].

1.2. Approaches to building software architectures for automated spectrum monitoring and management

1.2.1. Functional requirements for software architecture

With a view to their upgrade and in accordance with the ITU-R recommendations, requirements for the functionality of the compatible databases to which they must comply are also described. Such can be [109]:

- remote access to system resources;
- automatic detection of violations;
- frequency assignment and licensing;
- integration of tool(s) to support planning and implementation;
- automated measurement of signal parameters;

1.2.2. Software for monitoring and optimizing the use of the spectrum based on the estimation of the incidence angles

In order to unify the regulatory process and provide dynamic access capabilities, the ITU develops and promotes the use of computer-aided spectrum management.

Most software architectures provide graphical and context menu and options for interaction with external databases, resources and maps, which can be raster and vector maps (political, coastal, regional, marine).

1.3. Analysis of the creation, development and application areas of software defined radio in wireless communication systems as a means of sharing frequency resources

1.3.1. Occurrence of SDR

The term "Software Defined Radio" itself was proposed in 1991 by Joseph Mitola , who first published a report [104] on the subject in 1992.

1.4. Stages of SDR development

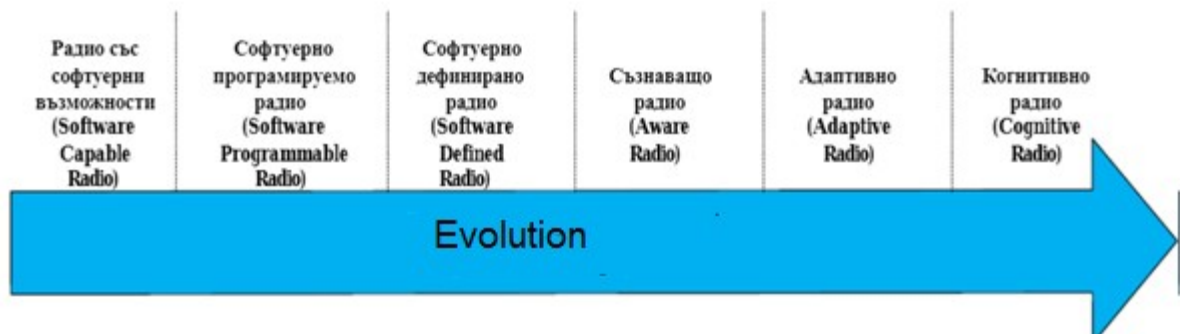


Figure - 7 Stages in SDR Development [1]

1.5. Approaches to solving the dynamic spectrum access problem

Studying the behavior of wireless communication units using dynamic spectrum access algorithms as part of an integrated system or network is an extremely difficult task and its simplification would lead to a loss of information. That is why it is necessary to use complicated methods to solve it. Such, for example, can be game theory or heuristic approaches, as shown in figure 8 [4], [12] , [33], [34], [59] , [63], [101].

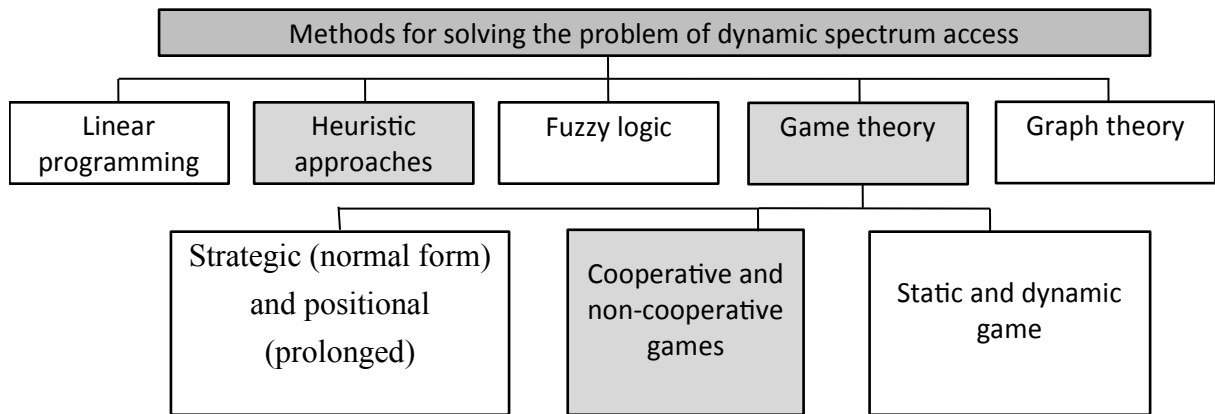


Figure - 8 Methods for solving a dynamic spectrum access task [12]

1.6. Conclusions on chapter one

Based on the analysis of the software-defined radio systems and the effective use of the frequency spectrum, the following conclusions can be drawn:

1. To address the problem of providing "new" frequency resources, a single unified software-defined hardware platform should be built to achieve an architecture approaching the ideal software-defined radio, thereby providing a means to efficiently and flexible use of radio spectrum.

2. Collective use of the spectrum allows an unlimited number of independent users and/or devices to access the spectrum in the same frequency range of the collective users at the same time and in the specific geographical region under a predefined set of conditions.

3. The mass implementation of SDR technologies in different types of wireless communication systems will lead to easier control over the concept of dynamic access to frequency resources, with a significant limitation of interfering sources in a multi-user environment.

Chapter 2. Analysis of frequency resource detection systems

2. Monitoring methods and frequency resource detection techniques

2.2. Monitoring of frequency resources

Software-defined and, in particular, cognitive radio are very often used to build networks with an episodic structure, due to the ability to dynamically access the spectrum [16].

The main advantages in such a scenario are:

- coexistence of SDR devices in an environment with unknown policies;
- ability to work in an environment with unknown sources of interference;
- capabilities to accumulate broadcast environment statistics, synthesize signals, and change power and modulation.;
- eliminating errors in frequency planning.

Along with the advantages of SDR, there are also a number of challenges and risks [28]:

- risk of interference to undetected receivers;
- danger of briefly disrupting the telecommunications infrastructure;
- difficulty in optimally sharing the frequency spectrum between different radio networks .

2.2.1. Monitoring the interference boundary

2.2.2. Spectrum monitoring in multi-user networks

Multiple users, licensed and unlicensed, can share radio spectrum on a network. Also, multiple networks can coexist, where transmissions on one network can interfere with transmissions on other networks. In such a case, coordinated and cooperative spectrum monitoring is preferred because it can detect the status of spectrum access by licensed users at different network locations. The spectrum tracking information can be used to obtain a spectrum map that can be used by unlicensed users to make correct access decisions [36] .

2.2.3. Optimizing the spectrum tracking period in multichannel networks

Multichannel transmission (e.g. transmission based on orthogonal frequency division multiplexing OFDM) is typical in a software-defined radio network . However, the number of available channels will be greater than the number of available interfaces in the radio transmitter. Therefore, only a small number of available channels can be watched simultaneously. The choice of the channels among all available to be monitored affects the ability to determine the status of a

given channel (busy, free, partially busy) and the efficiency of the system as a whole [15].

2.3.Spectrum management

The primary purpose of spectrum management is to monitor and manage access to spectrum holes by unlicensed users. Research questions in spectrum management are related to spectrum analysis and spectrum access decisions.

2.4. Decision-making on access to radio frequency spectrum

Some of the research questions related to making a decision on access to the radio frequency spectrum of unlicensed users are:

- ***Decision Model*** . Access to radio spectrum requires a decision model. The complexity of this decision model depends on the parameters used in the spectrum analysis. The decision model becomes more complex with an unlicensed user intent on maximizing performance while minimizing disruption to the licensed user. Stochastic optimization methods are a good tool for modeling and solving the spectrum access decision problem.

- ***Competition / cooperation in a multi-user environment*** .

When a software defined radio system has multiple users (licensed and unlicensed), their privileges will influence the spectrum access decision. These users may or may not cooperate in accessing the spectrum [36], [50]. In a non-cooperative environment, each user has his own goal, while in a cooperative environment, all users can cooperate to achieve a single goal.

2.5. Spectrum mobility issues

Spectrum mobility features in a radio network with dynamic spectrum access allow an unlicensed user to dynamically change its operating spectrum based on a change in surrounding free spectrum conditions. The most researched issues in spectrum mobility concern the switching between available frequency bands to ensure smooth access to the spectrum without interruption, both to the application and to the service, due to a change in the surrounding radio environment [40], [43], [46].

2.6.Dynamic spectrum access .

2.6.1. Spectrum sharing models.

The collective use of the spectrum allows an unlimited number of independent users and/or devices to access the spectrum in the same frequency range of the collective users at the same time and in the specific geographical region under a predefined set of conditions.

There are three main spectrum management models [54], as shown in Figure 13. In the exclusive use model, the licensed user has exclusive rights to the resources.

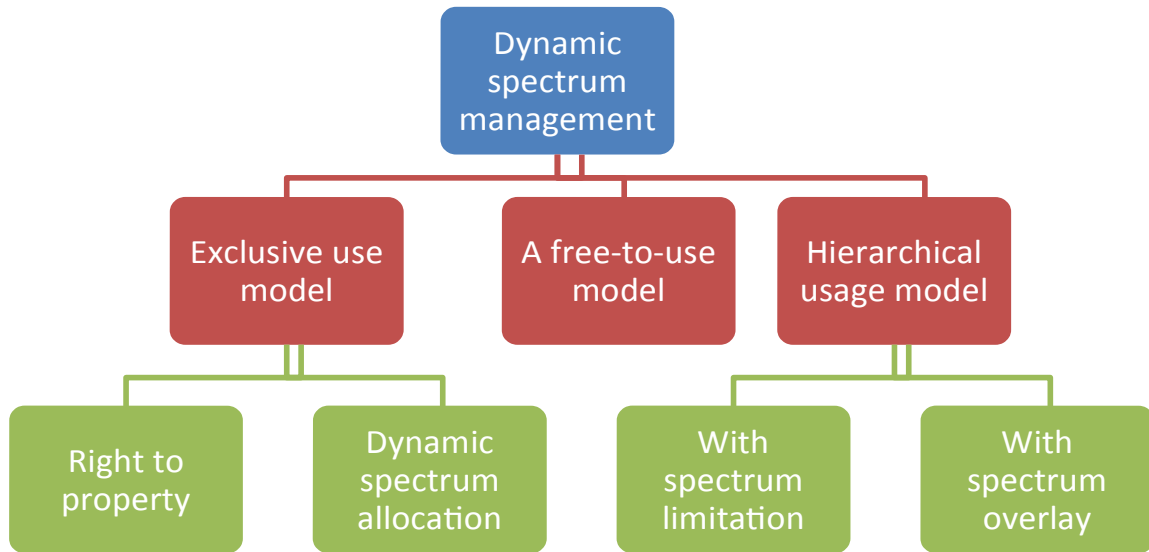


Figure - 13 Models for dynamic spectrum access

The implementation of these models are based on software defined radio systems (SDR) and cognitive radio [29] and according to the frequency resource access techniques are classified as shown in Fig.14.

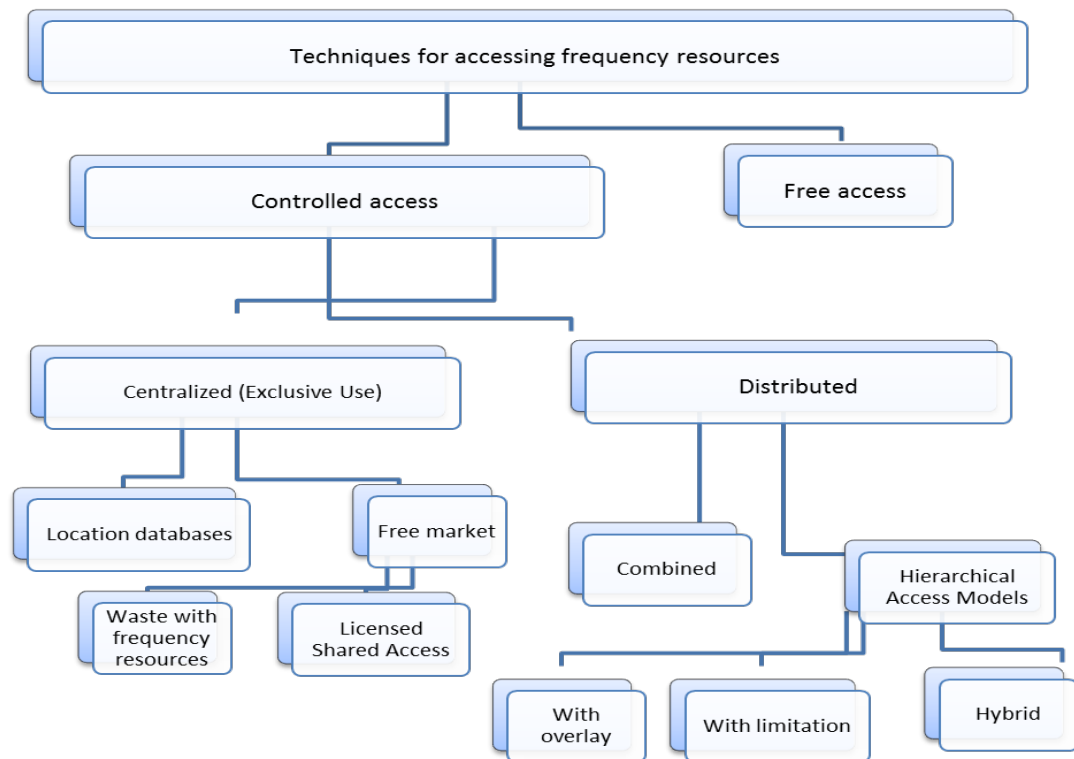


Figure - 14 Ways to access the frequency spectrum

2.6.2. Resource sharing requirements

Dynamic spectrum access models, and especially licensed shared access, impose the following requirements on users:

- lack of operating restrictions for the main licensee ;
- that there is no harmful interference between the primary and secondary users when working together;
- clearly defined locations.

To recognize unused spectrum and detect unoccupied channels, while maintaining a low interference limit, the following methods are used [120]:

- spectrum determination based on measurements;
- use of a geolocation database;
- use of radio beacons .

2.6.3. Spectrum monitoring in cognitive networks

The main problem to be solved in any of the dynamic access methods is to determine a decision threshold [62] at which there will be no or minimal impact on the PUs .

- Correct determination of spectral holes.
- Real-time spectrum monitoring.

In general, these places are classified as [93]:

- Spatial holes - represent the difference in the use of some frequencies by primary users in a given geographical region. For example, some lanes in densely populated areas with many users will be heavily congested, while in places with few users they will be free.

- Time slots – represent the availability of frequency resources for certain hours of the day.

- Spectral holes – represent holes or white spots in the spectrum that can be due to the type of modulation used by primary users, defined guard intervals to avoid interference in cellular networks, etc.

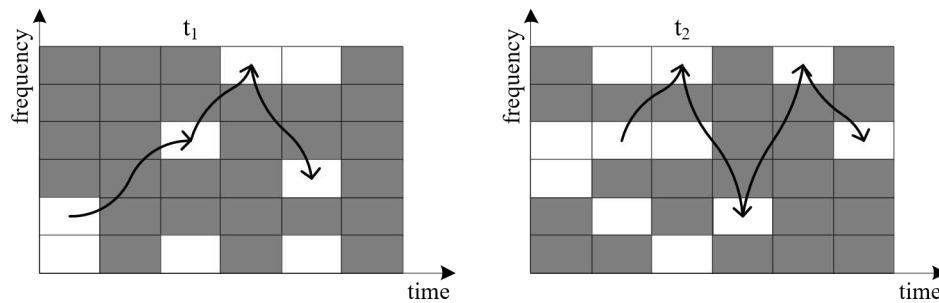


Figure - 15 Spectral holes and displacement in free parts of the frequency band [17]

2.7. An approach to computer-aided frequency channel assignment

2.7.1. Risks and benefits of computer-aided spectrum management

The lack of a complete set of regulatory requirements with detailed models, dependencies, interconnections, type and number of interfaces is a prerequisite for incorrect implementation, operation and subsequent upgrading and integration of automated spectrum management systems.

In computer systems and networks, the main risks are related to unauthorized access, alteration, theft or inability to access information. To reduce the negative

consequences of intentional or unintentional threats to information security, additional measures should be taken, such as:

2.7.2. Requirements and format of information stored in databases

2.7.3. Type of spectrum management data.

Interaction between nodes is provided through relational databases that provide information about connections for a given service, right of use or deployment, such as what type of transmitter is used in a given geographic area.

In order to achieve high compatibility and efficiency of electronic information exchange methods, strict compliance with approved standards is required. When the exchange of information crosses national borders, these are international standards. When specialized data files are to be exchanged, a uniform data format must be provided between all users with the ability to reliably retrieve the information.

2.7.4. Topology and connectivity

To control the preset norms, monitoring stations are used, which measure spectrum occupancy and monitor the levels of electromagnetic emissions and their compliance with national and international regulations and license conditions, as well as identify sources of unauthorized emissions and interference [115].

An example of sharing data is shown in Table 3.

Table 3 Data format

Frequency MHz	Channel no	Name of the station	Power	Latitude	Longitude	Location	Condition (call sign)
...	...	...	...	...	...	...	...

Antenna type	VAT	Antenna height	Polarization	Altitude	Name, profile
...	...	...	...	...	...

2.7.5. Frequency and channel assignment algorithms

The prescan procedure uses all possible channels and assigns those that have minimal overlap and are designed to maximize channel reuse, resulting in more efficient use of the frequency spectrum.

2.8. Conclusions on chapter two

1. The selection of resources (channels) in a multi-user environment should meet the interference boundary tracking requirements with careful selection of tracking and usage periods to achieve optimal system performance within the hardware limitations of the radio.

2. Software-defined radio systems and cognitive radio provide an additional tool for flexible spectral and energy-efficient use of the electromagnetic spectrum and provide a technological solution for using shared and dynamic access models.

3. Software- defined radio systems enable the implementation of policies for measuring the parameters of the surrounding electromagnetic environment and easy transition from distributed to centralized access to frequency resources and vice versa.

4. Computer-aided techniques for monitoring and managing the electromagnetic spectrum provide opportunities for its compaction, but preserves the traditional policy of access to frequency resources and deters their occupation by flexible technologies, and hence the efficient use of the radio frequency spectrum.

Chapter 3. Approaches to building systems for flexible use of the electromagnetic spectrum

3. Shared spectrum wireless systems

The problem of shared use of frequency resources manifests itself to a greater extent for networks operating in the unlicensed range, therefore, ways to efficiently use the environment through intelligent antenna devices, multiplexing, free resource detection, collision avoidance protocols are constantly being sought. , spatial separation and others.

3.2. Standards for shared use of frequency resources in the unlicensed range

3.2.1. Wireless LAN according to the IEEE 802.11 standard

In order to ensure high spectral efficiency and reduce intersymbol interference and limit the negative effects of multipath propagation *in* modern broadband wireless communication systems, multiple access technologies based on

the principle of orthogonal frequency division of channels are widely used [30]. *frequency-division multiplexing*).

As is known, OFDM signals are formed by N harmonic subcarrier frequencies that are separated by frequency intervals of equal width Δf . In general, they can be divided into two large groups, as shown in Figure 20.

WLAN technologies at the physical layer

Orthogonal frequency division and multiplexing OFDM

OFDMA

WLAN technologies at the channel layer

Multiple access with carrier recognition and collision avoidance;

Consolidation of channels;

Request to Send/Clear to Send (RTS/CTS)

Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Reduced Interframe Space (SIFS)

Figure - 20 WLAN implementation technologies on the physical and channel layer of the OSI model

Essentially, OFDMA is a multi-user variant of the widely used OFDM technology for frequency-division parallel data transmission by dividing the communication channel into subcarriers using a fast Fourier transform .

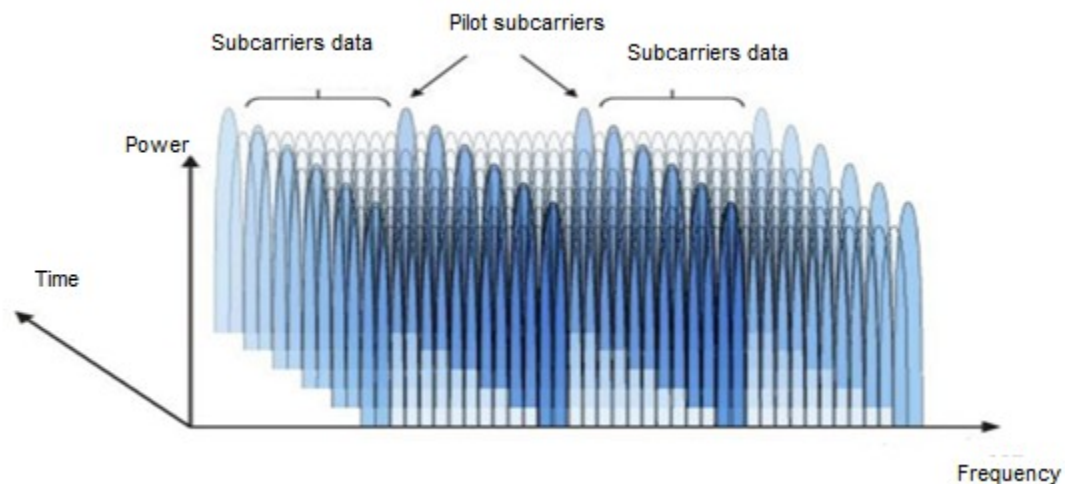


Figure - 21 Resource elements of a wireless access system operating on OFDM principles [66]

3.2.2. The data transmission channel structure based on OFDMA.

Pilot subcarriers are designed to synchronize the transmitter and receiver [70]. They are located close together and carry a large amount of information without requiring the separation of frequency bands. This is easily seen when looking at Figure 22 and comparing legacy 802.11 standards with 802.11ax.

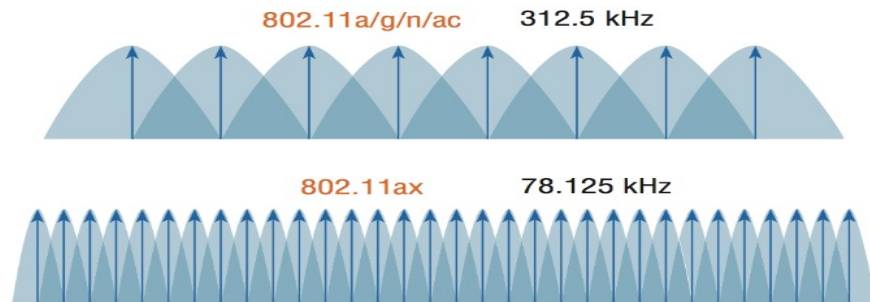


Figure - 22 Width of subcarriers [70]

3.2.3. Functions provided by OFDMA in IEEE 802.11 ax

1) Resource allocation

In [67], the resource allocation process for a 20 MHz channel containing 242 subcarriers is described, it is divided into two channels of 106 subcarriers, which on the first transmission send data to users numbered 1 and 2.

On the second transmission, the access point divides the channel into four separate sub-channels of 52 subcarriers and sends data to users 3, 4, 5, and 6. On the third transmission, OFDMA can send the entire power of the 242 subcarrier channel to user 5. The fourth transmission is directed to users 4 and 6, the fifth is directed to user 1, the sixth again shares a channel between users. Thus, OFDMA effectively uses the entire 20, 40, 80, and 160 MHz channel in multiuser mode.

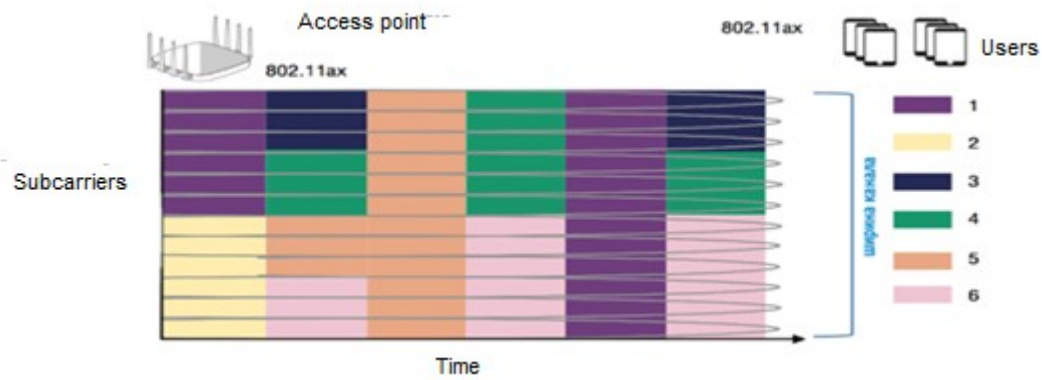


Figure - 24 Resource allocation [67]

2) **Spatial separation:**

An access point can consist of several radio modules (one, two or more) that are connected to several antennas. These antennas broadcast according to a certain scheme and transmitted over a wireless medium. This allows to form a spatial flow between a specific physical antenna (radio module) of the access point and the user device. Therefore, the total amount of information transmitted by the access point increases in proportion to the number of streams (antennas).

3) **Advanced antenna systems**

To reduce mutual interference and realize the concept of spatial separation, the use of steerable antenna elements is required to allow dynamic change in the spatial pattern of signal propagation in real time [67].

The load on them can be adjusted in real time, forming distribution patterns depending on the spatial position of the user [113], and this allows the generation of flows to individual users from one or several access points and the practical implementation in a real environment of the technology MU-MIMO (Multi-User Multiple Input , Multiple Output) [66].

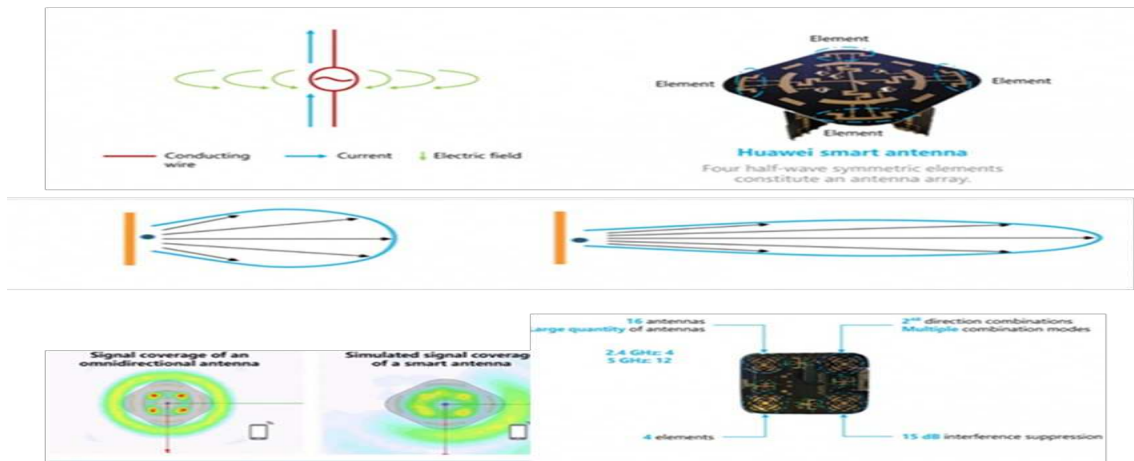


Figure - 25 Spatial Flow Formation [6 7]

3.3.Approaches to determining the location of wireless users

Knowing the locations of active primary transmitters allows secondary users to predict a potential "white spot" [6], [7] in the electromagnetic spectrum and thus use more flexible spectrum sharing strategies.

The spectrum tracking information can be used to obtain a spectrum map that can be applied by unlicensed users to make correct access decisions. Often, to increase the reliability of the obtained data, a centralized model is used for processing and compiling a map of the sources of electromagnetic radiation.

3.3.1. Classification and requirements for location algorithms

To enable the calculation of specific parameters in a network with a centralized hierarchy, some applications of wireless cognitive networks require that sensor nodes are aware of their position relative to the sensor network. In the literature, this problem of determining the location or position of a user is called localization [115].

3.3.2. Location assessment methods

In range-based location algorithms, distance information to a network element is critical. For this reason, the evaluation of some or several of the parameters of the signals entering the antenna is important. Such parameters [2], [111] can be:

- power of the received signal (RSS- Received Signal Strength) – the strength of the signal received in the receiving antenna;

➤ time of arrival (ToA). The distance between the transmitter and the receiver is equal to the "time of flight", i.e. the transmission time of signals that travel at the speed of light. The distance can be determined by measuring the time of arrival (ToA) of the signal at the receiver when there is synchronization between the timers of the transmitter and the receiver;

➤ arrival time difference TDoA-Time Difference of Arrival) – the difference in the times of received signals from different points with previously known coordinates is used [117];

➤ angle of incidence (AoA) – is a signal processing technique that estimates the location of the incoming electromagnetic waves from the correspondent [117].

3.3.3. An approach for applying users' spatial location information to improve the use of the electromagnetic spectrum

Specifically, let the authorized users (primary users) of some radio communication network are $PU1$ also $PU2$ (fig. 28). In addition, it is assumed that using the methods of the previous paragraph, specialized measuring equipment and the methods of artificial intelligence [18] for information processing, unauthorized users (secondary users - $SU1$ and $SU2$) have measured the following parameters with sufficient accuracy:

P 1) Geographical location of $PU1$ and $PU2$;

P 2) Power of the signals $P_{PU}[W]$ emitted by the transmitters of $PU1$ and $PU2$, the width of their frequency band $F[Hz]$, as well as the speed of information transmission $I_{r_{PU}}[\frac{b}{s}]$;

P 3) Spectral density $N_{n0}[\frac{W}{Hz}]$ of noises at the current moment in time.

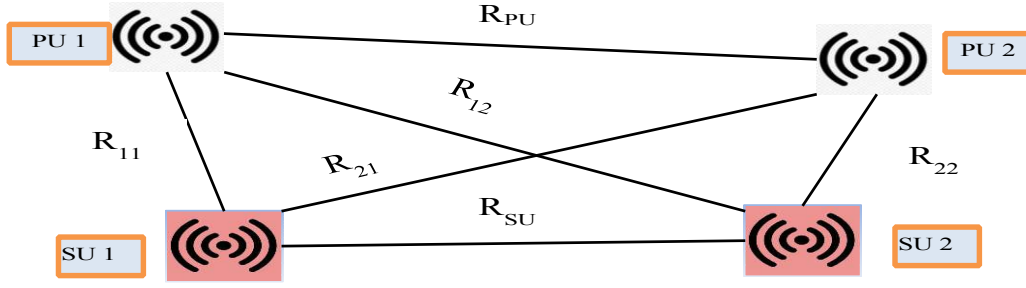


Figure - 28 Scenario for deploying a pair of primary and a pair of secondary users

As is known, the power of the signals emitted by the transmitter decreases inversely proportional to the distance traveled by them. In principle, this enables authorized and unauthorized users to simultaneously use the frequency band $F[Hz]$ without creating mutual electromagnetic interference, if the power of P_{SU} the secondary users' signals is chosen adequately.

If $C > I_{r_{PU}}$, then (without interfering with authorized users) unauthorized users can use signals with power P_{SU} , defined by the condition

The maximum power of the signals of the unauthorized users at the input of the receivers of the authorized users will be

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

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

Therefore

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

After considering (25) in (21), it is found that the permissible signal power of the unauthorized users, at which the speed of information transmission between the authorized users does not deteriorate, is

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

Since the distance R_{SU} between unauthorized users is known to them, it can be seen from (21) that the power of the signals at the inputs of their receivers is

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

Therefore, the information transmission rate that unauthorized users can achieve at the current time point is

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

3.4. Conclusions on chapter three

1. Wireless communication networks for dynamic access to frequency resources present opportunities for the creation of self-tuning , adaptive, self-learning, high-performance communication networks and can mitigate the problem of frequency channel allocation in a multi-user environment.

2. Information about the location of electromagnetic radiation sources is of key importance for improving the use of the electromagnetic spectrum. Antenna location methods based on angle of incidence (phase, amplitude or frequency variation information) have significant advantages over received power measurements, but must also take into account the characteristics of the investigated signals, the influence that environment renders (multicast), their complexity and implementation costs.

3. The ideal form of the total ACF of the complementary signals makes it possible in the receivers of the communication systems to process the signals, which have passed through different paths, separately. As a result, the so-called intrinsic or intersymbol is minimized interference (inter-symbol interference - ISI) caused by the multipath propagation of radio waves.

Chapter 4. Approaches for implementing software-defined radio communication systems by means of orthogonal frequency division and multiplexing

Step 2: Determining the distances between users of the primary RCM and users of the secondary SDR RCM

The information on the geographical location of each of the users $PU_1, PU_2, \dots, PU_{N_p}$ and $SU_1, SU_2, \dots, SU_{N_s}$ the primary and secondary RCM (P 1) makes it possible to calculate the elements of the following sets:

2.1) Multiple distances between users of the secondary SDR RCM:

$$Cs = \{R_{s11}, R_{s12}, \dots, R_{slm}, \dots, R_{sN_s-1N_s}\}; \quad (34)$$

2.2) Multiplicity of distances between the users of the secondary SDR RCM and the users of the primary RCM:

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

In (35) R_{lm} is the distance between l th user (SU_l) of the secondary SDR PCM ($l=1, 2, \dots, N_s$) and m th user (PU_m) of the primary PCM ($m=1, 2, \dots, N_p$).

Step 3: Calculation of the additional noise powers created by the operation of the transmitters of the users of the secondary SDR PCM at the inputs of the receivers of the users of the primary PCM

As is known, when non-directional antennas are used, the maximum powers of the signals from k th subband (k -th frequency channel) of the users of the secondary SDR PCM at the inputs of the receivers of the users of the primary PCM are:

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

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

In (36) the following notations are used:

- $Psp(k)_{lm}$ is the power of the user's signals $SU_l, l=1, 2, \dots, N_s$ in k th frequency subband (k -th channel), received at the input of the user's receiver $PU_m, m=1, 2, \dots, N_p$;

- $Ps(k)_l$ is the user's transmitter power $SU_l, l=1, 2, \dots, N_s$ in k th frequency subband (k -th channel), which is determined at stage 2, Step 6 of the operation of the SDR PCM management server (ie, at the stage of distribution of frequency OFDM channels among users of the secondary SDR PCM);

- R_{lm} is the distance between the user determined in Step 2 $SU_l, l=1, 2, \dots, N_s$ and the user $PU_m, m=1, 2, \dots, N_p$;

- the values $P_{sp}(k)_{lm}=0$ refer to the cases when in the current time frame (time frame) the user PU_m does not receive signals through primary PCM in k th frequency subband (k -th channel).

Step 4: Calculation of the signal powers of the inputs of the receivers of the users of the primary PCMs

Analogously to (36), the maximum powers of the signals from k th frequency subband (k -th frequency channel) at the inputs of the receivers of the users of the primary PCMs are:

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

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

In (37) the following notations are used:

- $Pp(k)_{uv}$ is the power of the user's signals $PU_u, u=1,2,\dots,N_p$ in k th frequency subband (k th channel) received at the input of the user's receiver $PU_v, v=1,2,\dots,N_p$;

- $Pp(k)_u$ is the user's transmitter power $PU_u, u=1,2,\dots,N_p$ in k th frequency subband (k -th channel), which is calculated by (30);

- $R(k)_{puv}$ is the distance determined in Step 1 between users $PU_u, u=1,2,\dots,N_p$ and $PU_v, v=1,2,\dots,N_p$, using k th frequency subband (k -th channel) (ie $R(k)_{puv} \in Cp_k$);

- the values $Pp(k)_{uv}=0$ refer to cases when, in the current time frame, the user PU_v does not receive signals via primary RCM in k th frequency subband (k -th channel) from the user PU_u (i.e. the user PU_u does not emit signals or his signals are screened by hills or buildings) .

Step 5: Calculation of the maximum permissible signal powers of the transmitters of the users of the secondary SDR PCM

Shannon-Hartley Theorem [20], P 4 and (9), the possible maximum rate of information transmission in the k th frequency subband from the user PU_u to the user PU_m (i.e., the capacity $I_{max}(k)_m$ of the k -th frequency channel, evaluated from the point of view of the user PU_m) is determined by the formula:

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

In (38) $\Delta f P(k)_{n_0}$ is the noise power in k th frequency channel.

If $Imax(k)_{um} > Ir(k)_m > 0$ (that is, if the maximum possible speed of information transmission on k th frequency channel to the user $PU m$ is greater than the actually used speed), then the users of the secondary SDR PCM can use k th frequency channel without interfering with the user $PU m$, if the powers of their signals $Psp(k)_{lm}$ satisfy the equality

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

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

Therefore

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

After considering (40) in (35), it is established that in k th frequency channel the permissible powers of the signals of the users of the secondary SDR PCM (i.e. the powers at which the rate of transmission of information to the user does $PU m$ not fall below the nominal speed as a result of the simultaneous use of k th frequency channel and by the user $SU l$), are

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

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

If $Ir(k)_m = 0$ (i.e. if no information is transmitted on k th frequency channel to the user $PU m$), then the users of the secondary SDR PCM can use k th frequency channel without interfering with the user $PU m$, even if the powers of their signals $Psp(k)_{lm}$ are the maximum possible according to the technical characteristics of the secondary SDR PCM, i.e.:

$$Ps(k)_l = P_{max} s(k)_l, \quad k=1,2,\dots,N, l=1,2,\dots,N_s. \quad (42)$$

Stage 2: Allocation of OFDM channels among users of the secondary SDR RCM, maximizing the rate of information transmission in the secondary SDR RCM subject to the constraints established in the previous stage

Step 6: Calculation of the maximum possible rates of information transmission by users of the secondary SDR PCM

Based on the set C_s (Step 2, formula (34)) of the distances between the users of the secondary SDR PCM and the set of the maximum permissible powers of the signals of their transmitters (calculated at Step 5, formulas (41) and (42)), the powers of the signals at the inputs of the receivers of the users of the secondary SDR PCM, are calculated by the formula:

$$Ps(k)_{lw} = \frac{Ps(k)_l}{4\pi R_{slw}^2}, \quad k=1,2,\dots,N, l=1,2,\dots,N_s, w=1,2,\dots,N_s, l \neq w. \quad (43)$$

In (43) the following notations are used:

- $Ps(k)_{lw}$ is the power of the user's signals $SU_l, l=1,2,\dots,N_s$ in k th frequency subband (k th channel) received at the input of the user's receiver $SU_w, w=1,2,\dots,N_s$;
- $Ps(k)_l$ is the power of the user's transmitter $SU_l, l=1,2,\dots,N_s$ in k th frequency subband (k -th channel), which was calculated in the previous step according to (41) or (42);
- $R(k)_{slw}$ is the distance determined in Step 2 between users $SU_l, l=1,2,\dots,N_s$ and $SU_w, w=1,2,\dots,N_s$, when using the k -th frequency subband (k -th channel).

Analogous to (39), the information transmission rates that can be achieved by the users of the secondary SDR PCM at the current moment in time are calculated by the formula

$$Ir(k)_{lw/lu} = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{Ps(k)_{lw}}{\Delta f P(k)_{n_0} + Pps(k)_{uw}} \right), \quad k=1,2,\dots,N, l,w=1,2,\dots,N_s, m,u=1,2,\dots,N_s, l \neq w, u \neq m. \quad (44)$$

In (44) the following notations are used:

- $Ir(k)_{lw}$ is the maximum possible speed of transmission of information from the user $SU l$ to the user $SU w$ on the k th frequency subband (k th channel) when using (by the user $SU l$) signals with permissible power;

- $Ps(k)_{lw}$ is the power of the user's signals $SU l, l=1,2,\dots,N_s$ in k th frequency subband (k th channel) available at the input of the user's receiver $SU w, w=1,2,\dots,N_s$, according to (43) ;

- $\Delta f P(k)_{n_0}$ is the noise power in k th frequency channel;

- $Pps(k)_{uw}$ is the power of the user's signals $PU u, u=1,2,\dots,N_p$ in k th frequency subband (k -th channel), available at the input of the user's receiver $SU w, w=1,2,\dots,N_s$, which is calculated analogously to (36) by the formula:

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

$$k=1,2,\dots,N, u=1,2,\dots,N_p, w=1,2,\dots,N_s.$$

In (45) the following notations are used:

- $Pp(k)_u$ is the user's transmitter power $PU u, u=1,2,\dots,N_p$ in k th frequency subband (k -th channel), which is calculated by (30);

- $R(k)_{lw}$ is the distance determined in Step 2 between the users $PU u, u=1,2,\dots,N_p$ and $SU w, w=1,2,\dots,N_s$.

Step 7: Allocation of OFDM channels among users of the secondary SDR PCM, maximizing the information transmission rate in the secondary SDR PCM

The purpose of this step is to find the one-way communication links (lines) "transmitting information from the user $SU l, l=1,2,\dots,N_s$ - receiving information from the user $SU w, w=1,2,\dots,N_s$ " for which the rate of information transmission is maximum for each frequency channel. To achieve this goal , a number of two-dimensional arrays are constructed , each of which can be represented by a table of the following type: $N \times N_s$

Table #6 Maximum possible speeds of information transmission from user $SU l$ to user $SU w, w=1,2,\dots,N_s$ on k th frequency channel in case of interference by a user $PU u, u=1,2,\dots,N_p$

		User SU_w					
		1	2	...	w	...	N_s
User	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 element in column		$Ir(k)_{l1}$	$Ir(k)_{l2}$		$Ir(k)_{lw}$		$Ir(k)_{lN_s}$

The analysis of the w -th pillar of the table. 6 shows that if k information is transmitted from user SU_l to user on the frequency channel SU_w , then the speed of information transmission is determined by the user PU_u who disturbs the specified connection to the greatest extent. For this reason, the speed of information transmission from user SU_l to user SU_w , $w=1,2,\dots,N_s$, on k the frequency channel is

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

The rates of information transmission for all pillars, determined by (46), are presented in the last row of the table . 6.

Since, in principle, a user SU_l can transmit information to any user SU_w , $w=1,2,\dots,N_s$, the speed of information transmission is maximum for that user SU_{w_0} for which:

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

Given (47), it can be summarized that the communication connection "transmission of information from the user SU_l - reception of information from the user SU_{w_0} ", in which the rate of transmission of information on k the frequency channel is the highest, is determined by the maximum element in the last row of the table. 6.

4.3. Basic properties of the complex signals used in the construction of radio communication networks with high noise immunity

The positive properties of SS from the point of view of the construction of RCM with high noise protection arise from their complex internal structure. More specifically, under the control of a special *spreading function* (*spreading signal*), each information symbol of the transmitted data is transformed into a sequence of elementary pulses of small duration, called *elementary pulses* or *chips* . Formally and mathematically, this operation is described by the expression [8],[9].

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

In (48) $v(t)$ is a simple signal carrying one information symbol from the transmitter to the receiver, $g(t)$ is the expansion function, and $v_{\text{разш}}(t)$ is the resulting complex signal, whose spectral density $V_{\text{разш}}(f)$ has the form shown in Fig. 31 b.

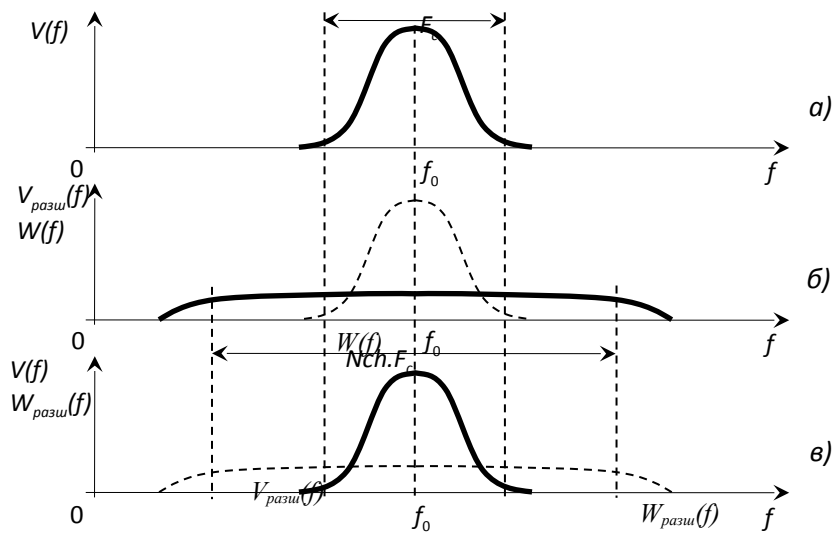


Figure - 31 Increasing the noise immunity of the PCM as a result of the use of complex signals

correlation reception is performed in its receiver by comparing the received expansion function with the preset one. Formally and mathematically, this operation is described by the expression [8],[9].

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

Here $g^{-1}(t)$ is a signal whose action is the opposite of that of the expansion function used in the transmitter. For this reason, it is called *the inverse expansion function* (*signal*). As a result, the spectral density $V_{\text{разш}}(f)$ of the useful signals shrinks to its original form $V(f)$, shown in fig. 31 c.

On the other hand, under the influence of the inverse broadening function, the disturbing signal $w(t)$ is transformed into the signal

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

with its spectral density $W_{\text{pass}}(f)$ having the form shown in Fig. 31 c. At the input of the receiver, however, there is a frequency-selective filter that passes for further processing only the spectral components in the frequency band F_c with the center frequency f_0 . Therefore, as a result of the use of CC, the signal-to-noise ratio in terms of amplitude q_{un} at the output of the receiver improves in direct proportion to the broadening of the spectrum signals [8], [9], as

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

Here $B = V_{\text{pass}} T_c$, $B \gg 1$ is the SS base, T_c is the duration of the signal, and q_0 is the amplitude signal-to-noise ratio at the receiver input.

It can be seen from (23) that q_{un} it can be large enough even for very small values of q_0 - it is enough to choose a basis B of SS of the required size. Therefore, the reception of CC with a matched filter or correlator is accompanied by signal amplification (or interference suppression) $2B$ times. That is why the quantity [8], [9]:

$$K_{CC} = \frac{q_{un}^2}{q_0^2}. \quad (52)$$

is called the *processing gain of complex signal communication systems (CSCs)*. From (51) and (52) it follows that:

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

Similarly, the reception of information carried by SS is characterized by a signal-to-noise ratio in terms of power [8], [9]:

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

Relations (40) and (41) are fundamental in the theory of communication systems with SS. They are obtained for disturbances of the type of white noise with a uniform power spectral density within the limits of the frequency band, the width of which is equal to the width of the CC spectrum. In the general case, it is fulfilled:

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

and the degree of approximation depends both on the type of disturbance and on the base of the CC [8], [9].

From (54) it is clearly seen that the use of SS by RKM leads to an increase in their noise immunity B times. Indeed, let the signal-to-noise ratio in power at the output of the receiver, ensuring normal operation of the RCS, be $q_{un}^2 = q_0^2$. If a PCM

choke begins with interference degrading the signal-to-noise ratio by power-to-value $q_{un}^2 = \frac{1}{B} q_0^2$, then the use of complex signals with a base B will fully compensate for the detrimental effect of the interference, since $q_{un}^2 = B \frac{1}{B} q_0^2 = q_0^2$ [8],[9].

Technologically, the generation of SS can be carried out by two main methods, called *direct spectrum expansion* (*direct spread spectrum*) through phase manipulation and *a jump change of the carrier frequency* (*frequency hopping*) [8],[9]. The first of these – direct spectrum broadening – is explained with the help of fig. 32.

In fig. 32 a shows the stream of symbols 101...to be transferred from the transmitter to the receiver. The expanding function (Fig. 32 b) is $g(t)=\{1001\}$, i.e. it is composed of $N_{ch}=4$ elementary pulses (*chipa*). Here, the ratio between symbol T_c and chip τ_{ch} durations is [8],[9]. $N_{ch} = \frac{T_c}{\tau_{ch}}$.

(56) The operation (20) is implemented as *a sum modulo 2* of each symbol and the expanding function (Fig. 32 c). The result of its implementation is the expansion of the frequency band of the signals N_{ch} times, since the spectrum width of the expanded symbols is $F_{CC} \approx \frac{1}{\tau_{ch}} = \frac{N_{ch}}{T_c}$, and the base

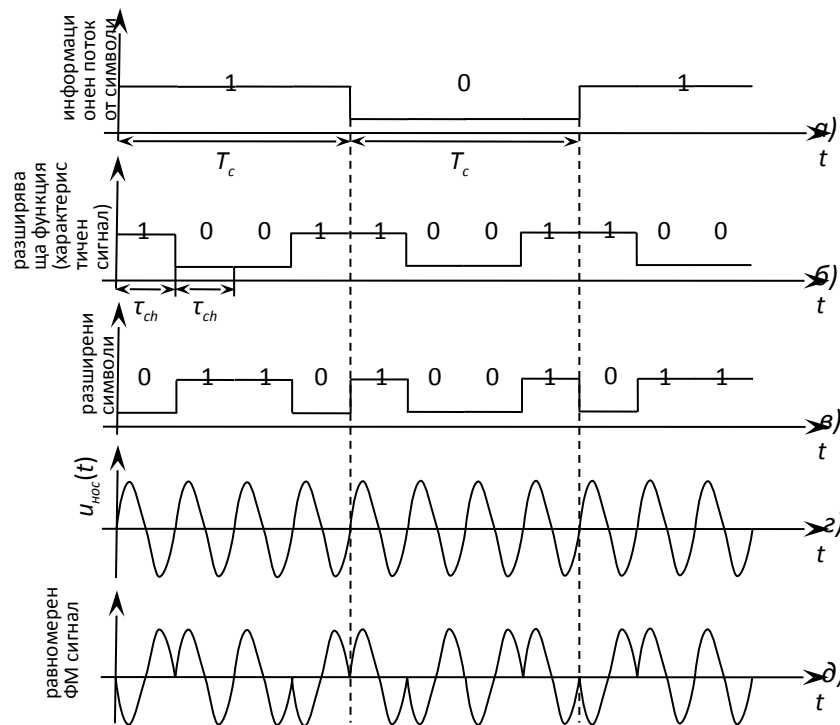


Figure - 32 Direct spectrum broadening by phase manipulation

With the help of the carrier oscillation (Fig. 32 d)

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

the spectrum of the extended symbols (Fig. 32 c) is transferred to the high-frequency part of the electromagnetic spectrum around the carrier frequency f_0 (Fig. 31 b).

4.4. A computer system for the analysis and synthesis of complementary signals

Definition 1: Two binary FM signals whose mathematical models are sequences of binary reports $\{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$, $a(i), b(i) \in \{-1, +1\}, i=0, 1, \dots, N_1$, are called a complementary pair if the sum of their autocorrelation functions (ACFs) has no side leaves (i.e., it is a digital delta-pulse):

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

In (58), the non-periodic ACF $R_{aa}(r)$ and $R_{bb}(r)$ binary FM signals $\{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$ are defined as in the well-known formula for calculating the cross-correlation function (CRF) of two signals $\{v_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{v_2(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$:

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

was placed $\{v_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{v_2(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$ and $\{v_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{v_2(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$ accordingly.

As noted, in (59) $\{v_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{v_1(0), v_1(1), \dots, v_1(N_1-1)\}$ and $\{v_2(i)\}_{i=0}^{N_1-1} = \{v_2(0), v_2(1), \dots, v_2(N_1-1)\}$ are two random signals composed of the number of reports $v_1(i), v_2(i), i=0, 1, \dots, N_1-1$, representing complex numbers expressing the amplitude and initial phase of the elementary phase pulses (chips) that make them up. In addition, the symbol " $\textcolor{red}{c}$ " stands for complex coupling, $R_{v_1 v_2}(r)$ is the VKF sheet of $\{v_1(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{v_2(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$ the time-shifted signals $r\tau_{ch}, r=0, 1, \dots, N_1-1$, and τ_{ch} is the duration of the elementary pulses (chips). Since chip duration τ_{ch} is constant in signal generation and digital processing, it is omitted (not written) in the formulas.

Given the commutative nature of the addition operation, it can be seen from (58) that the order of the binary FM signals forming the complementary pair does not matter. In other words $\{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$, both, and $\{b(i)\}_{i=0}^{N_1-1}, \{a(i)\}_{i=0}^{N_1-1}$ are a complementary pair.

A very important property of complementary pairs of FM signals is the existence of a method for the synthesis of a derivative complementary pair of FM signals of length $N_1 N_2$, if two complementary pairs of FM signals of length N_1 and N_2 respectively are known (the two pairs of complementary FM signals need not be different). After applying the method a sufficient number of times, it is possible to synthesize complementary pairs of FM signals of length $N_0 = N_1^{l_1} N_2^{l_2}$, so that it is greater than any preset number.

A disadvantage of complementary pairs of FM signals is that for the past 60 years, only one complementary pair of length $N_1=2$, two non-equivalent complementary pairs of length $N_1=10$, one complementary pair of length $N_1=20$, and one complementary pair of length $N_1=26$. For this reason, the complementary pairs of FM signals introduced by Definition 1 can only have lengths of the form

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

Definition 2 : The set of KFM signals:

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

is a generalized complementary set if the sum of their autocorrelation functions (ACFs) has no side leaves (i.e., it is a digital delta-pulse):

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

In (62), the non-periodic ACFs $R_{a_k a_k}(r)$ are calculated using (59).

Given the commutativity of the addition operation, it can be seen from (62) that the order of binary FM signals forming a generalized complementary set does not matter.

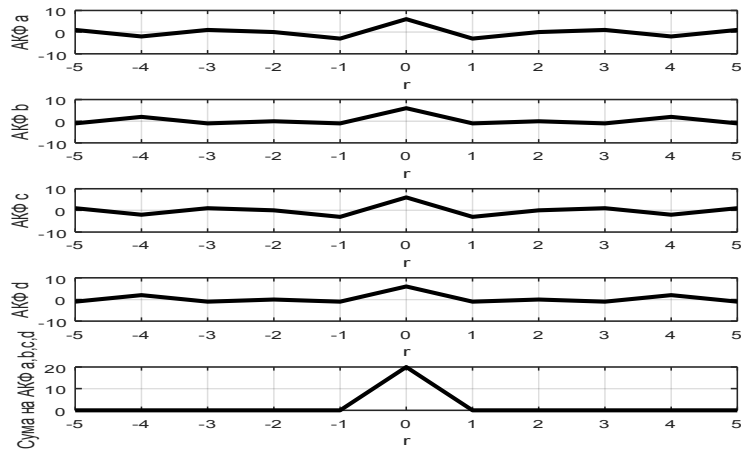


Figure - 33 Autocorrelation functions of the complementary set of signals defined by (34)

4.5. An approach to realizing software-defined radio communication systems using orthogonal frequency division and multiplexing and complex complementary signals

From the data systematized in § 3.1, it can be seen that the OFDM technology can easily implement the independent frequency channels necessary for communication through complementary signals, as well as implement cryptographic protection of the sent messages. Given these facts, at the analysis in this paragraph will be used fig. 35 [118].

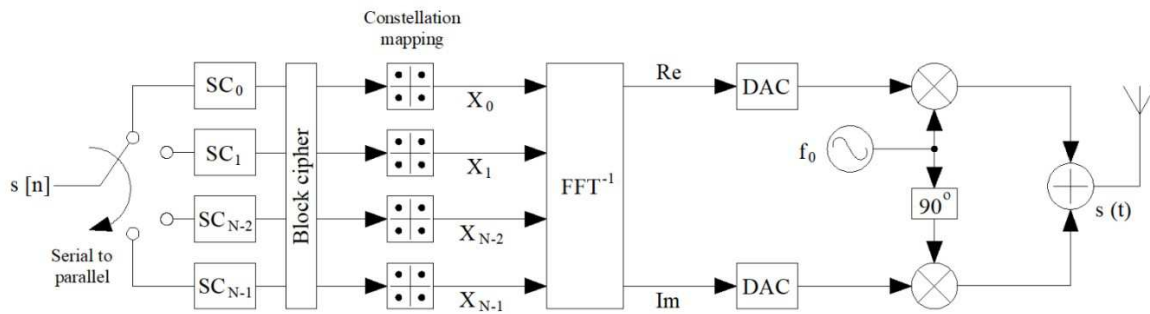


Figure - 35 Block diagram of a modified OFDM transmitter [70]

The possibility of building noise-protected and secure SDR PCMs by using OFDM and complex complementary technology arises from the following circumstances.

open systems (OS) .

Second, noise immunity is a very important indicator of the effectiveness of communication and computer networks, as it characterizes the ability of these networks to resist radio-electronic suppression (REP) measures.

4.6. Conclusions on Chapter IV

In Chapter I V the following main results are obtained.

- 1.** A general algorithm has been synthesized for the application of information on the spatial location of users in the process of automated control of RCMs implementing the concept of SDR through OFDM (§ 4.1) .
- 2.** A computer laboratory has been developed for the analysis and synthesis of complex complementary FM signals (§ 4.3), which allows to minimize the so-called mutual interference (multi access interferences - MAIs) caused by the simultaneous use of the communication channel by many users
- 3.** An approach to building SDR PCMs, possessing high noise protection and stability of operation in extreme conditions, by using OFDM technology and complex complementary signals, is substantiated.

Conclusion

As a result of the research within the dissertation work are received the following basic results :

- **Scientific contribution:**

1. An algorithm has been developed for the application of information on the spatial location of users in the process of automated management of a software - defined radio communication network, realized through § 4.1 .

- **Scientific and applied contributions :**

1. The methods and techniques for monitoring the electromagnetic environment are analyzed and an approach for computer-aided provision of frequency channels is presented § 2 .
2. A classification and requirements for the algorithms for determining the spatial location of users and an approach to applying the obtained information to improve the use of the electromagnetic spectrum are justified § 3.2.1 .

3. An approach has been developed to implement software-defined radio-communication systems for hidden (noise-protected) data exchange, by using complex complementary signals in a system based on orthogonal frequency division and multiplexing § 4. 4 .

- **Applied Contributions:**

1. The challenges in wireless communication networks and systems are analyzed and the methods for solving the task of dynamic access to frequency resources are shown § 1. 1, § 1 .5.

2. An approach to building software architectures for automated monitoring and management of the radio spectrum is justified § 2. 6.

3. The standards for shared use of frequency resources in the unlicensed range and the structure of a data transmission channel using OFDM are analyzed § 3. 1.

- **List of dissertation publications**

1. Nedelchev M., Bogdanov R., Software-defined military radio systems - advantages and challenges, *CIO Magazine* , ISSN 1312 - 5605, July 2019.

2. Nedelchev M., Overview of frequency spectrum monitoring techniques, *Vasil Levski National University Yearbook Part I* , ISSN 1312 6148, 2019 *pp. 13-20*

3. Nedelchev M., Bedjev B., An approach to the application of information on the spatial location of users to improve the use of the electromagnetic spectrum, *International Scientific Conference "Defense Technologies 2020"* ISSN 2367-7902, Shumen, 2020, *p253-259*

4. Nedelchev M., Marinov D., Stoyanov D., Parvanov S., D. " 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*

Declaration on the protection of classified information

I declare that there is no classified information within the meaning of the Law on the Protection of Classified Information and the regulations for its implementation in my dissertation work.

Signature : Capt . eng. Miroslav Nedelchev