



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ГАБРОВО

Факултет “Електротехника и електроника”

Катедра “Комуникационна техника и технологии”

маг. инж. СЕЙХАН САДЪК МЮМЮНАЛИ

**ИЗСЛЕДВАНЕ И ПОДОБРЯВАНЕ КАЧЕСТВОТО НА ОБСЛУЖВАНЕ В
СПЪТНИКОВИ КОМУНИКАЦИОННИ КАНАЛИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за присъждане
на образователна и научна степен “доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.3. Комуникационна и компютърна техника

по **Докторска програма: “Комуникационни мрежи и системи”**

Научен ръководител:

проф. д-р инж. Станимир Михайлов Садинов

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Райчо Тодоров Иларионов
2. доц. д-р инж. Егнар Ибрахимова Йоздикилилер

гр. Габрово

2022 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Комуникационна техника и технологии“ към факултет „Електротехника и електроника“ на Технически университет – Габрово, проведен на 24.11.2022 г.

Дисертационният труд съдържа 129 страници. Научното съдържание е представено в увод пет глави и заключение, включва 72 фигури и 24 таблици. Цитирани са 137 литературни източника и 12 Интернет адреса. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Изследванията по дисертационния труд са извършени в катедра „Комуникационна техника и технологии“ към факултет „Електротехника и електроника“ на Технически университет – Габрово и на територията на гр. Габрово.

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на 24.02.2023 г. от 14 ч. в зала 2215, сграда Учебен корпус 2 (Баждар) на Технически университет – Габрово.

Материалите по защитата са на разположение за интересующите се в кабинет 3209, корпус №3 на Технически университет – Габрово.

Рецензиите и становищата на членовете на научното жури и авторефератът са публикувани на сайта на университета: www.tugab.bg.

© Сейхан Садък Мюмюнали – автор, 2022

e-mail: seyhan1982@abv.bg

Заглавие: Изследване и подобряване качеството на обслужване в спътникови комуникационни канали

Тираж: 5 бр. (Бълг. език)

Място на отпечатване: Университетско издателство „Васил Априлов“ при ТУ - Габрово

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема:

Развитието на спътниковите комуникации е свързано с търсенето и експериментирането на нови орбити и подобряване методите на кодирането на канала, използването на нови модулационни схеми и разширяване на честотния спектър, като това води до интересни резултати свързани с подобряване на ефективността и качеството на връзка. Избора на канален код с по-висока ефективност би позволило да се намали скоростта на използвания код и да се увеличи кратността на използваната модулация, като се запази вероятността за грешка. Това от своя страна води до увеличаване на пропускателната способност на канала. За да се получи максимална шумоустойчивост е необходимо след оптимизация на каналния код да се извърши и оптимизация на параметрите на модулационното съзвездие. Оптимизацията на модулационните съзвездия позволява да се постигне оптимален компромис между шумоустойчивостта на радиоканала, енергийната ефективност и устойчивостта на нелинейните изкривявания.

Избраната тема и свързаната с нея проблематика, дава възможност за комбиниране на разнородни статистически аналитични и софтуерни методи за анализ и обработка на данните, а средствата на информационно-комуникационните технологии се използват за осигуряване на преноса на спътникови данни и измервателни постановки с мониторинг на параметрите на спътниковия канал. Представената тематика води до създаване на методологии от процедури, свързани с коректни подходи при мониторинг и контрол в комуникационните системи за спътниково цифрово разпръскване, чрез определяне на оптимални диапазони на изменение на конкретни технически параметри и критерии, свързани с ефективната експлоатация и настройка на спътниковите комуникационни канали

Методи на изследване:

За постигане на целта и поставените задачи в изследването се прилага са аналитични, симулационни и практически. Като инструмент за симулационните изследвания са ползвани програмните среди Matlab/Simulink и Free Space Propagation Simulator. Избраната методика за изследване е адекватна.

Новости:

Създадени са симулационни модели за спътникови комуникации, проведени са изследвания и са дефинирани приноси свързани с ефективно използване на честотен спектър, вид модулация и кодиране на канала с цел получаване на по-високо качество на услугите по спътниковите канали за връзка. Реализирани са опитни постановки и са направени експерименти за оценка на пакетната грешка в комуникационен канал за връзка с изкуствен спътник тип „кюбсат“ и са представени графични зависимости даващи информация за търсене на оптимални решения при избора на работен честотен диапазон, височина и параметри на орбитата, мощността на предаване, параметри на приемо-предавателната антена, както и за оценка на влиянието на комплексната комбинация от тези параметри.

Цел и задачи на изследването:

Целта на дисертационния труд е да се представят и изследват процесите на обработка на сигналите – генериране, кодиране, модулация, предаване и приемане на DVB-S/S2 сигнали - чрез синтезиране на симулационни модели и провеждане на практически експериментални резултати.

За реализирането на формулираната цел е необходимо решаването на следните *обобщени задачи*:

1. Синтезиране на имитационен модел на DVB - S/S2 система в *Simulink* графична среда на *Matlab*, който да съответства на *последователността* на обработката на сигнала в система и чрез който да се получава пълна *информация* за битовото съдържание на сигнала след всяка една от операциите в процеса на обработката му.

2. Да се направят изследвания и оценка на шумоустойчивостта, енергийната ефективност и устойчивостта на нелинейните изкривявания на сигналите и определяне на оптималните им стойности по зададен критерии в зависимост от приложената обработка, формата на модулация и модулационни параметри и кодиране на канала;

3. Да се реализира имитационно и експериментално моделиране, анализ и оценка на комуникационния канал за връзка „изкуствен спътник – земя“ за спътници на ниска околоземна орбита при комбинирано използване на различни работни честотни ленти, настройки на приемо-предавателното оборудване и параметри на канала.

4. Да се представят експериментални изследвания на покритието и качеството на обслужване в системите за спътникова цифрова телевизия, като се предложат методи и мерки за неговото подобряване на база параметрите и характеристиките на спътниковите сигнали и осигуреното радиопокрытие.

Предмет и обект на изследване на дисертационния труд:

Предмет на изследване са процесите, свързани с обработката, предаването и приемането на спътникови комуникационни сигнали в спътниковите предаватели и приемници - модулация, кодиране на канала, мултиплексиране, поляризационни характеристики на сигнала, синхронизация, конфигуриране, настройка и съгласуване на приемо-предавателното оборудване. Като критерии за определяне на качеството на обслужване са използвани различни оценъчни параметри и качествени показатели като еквивалентна изотропна излъчвана мощност (EIRP), напрегнатостта на полето, спектралните и векторни характеристики на сигнала и съотношението сигнал/шум при критерии максимално допустими стойности на коефициентите на модулационна (MER), двоична (BER) и пакетна (PER) грешка и др.

Обект на изследване в дисертационен труд е безжичната преносна среда с нейните особености и влияние, както и процесите на обработка и предаване на сигнали в спътникови комуникационни канали, в частност в системите за спътникова телевизия по стандарт DVB-S/S2, в спътниковите системи за пренос на данни и в комуникациите със спътниковите системи, опериращи на ниска околоземна орбита.

Апробация на дисертационния труд:

Основните етапи от разработване на дисертационния труд са представени в шест публикации на международни конференции и научни издания, напълно покриващи минималните изисквания относно разглеждания критерий. Три от трудовете са изнесени на Международна научна конференция „Унитех“ и три в национална конференция и „TechCo“, като един от тях е самостоятелен, а останалите пет са изготвени в съавторство с научния ръководител и авторски колектив. Публикациите са издадени в сборници с научно рецензиране от международна научна конференция „Унитех“ и национална конференция „TechCo“ в периода на обучение 2020-2022 г

II. КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА I. СЪСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМИ И ПЕРСПЕКТИВИ ПРИ ИЗГРАЖДАНЕТО И ЕКСПЛОАТАЦИЯТА НА СПЪТНИКОВИ КОМУНИКАЦИОННИ КАНАЛИ И УСЛУГИ

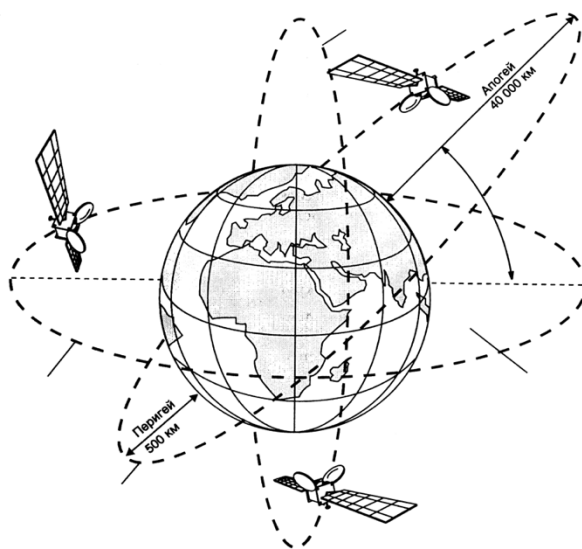
1.1. Принципи на изграждането на спътникови системи за връзка

Комуникационните спътници се въртят около Земята по орбити, плоскостите на които минават през центъра на земното кълбо. В зависимост от ъгъла на наклона α между плоскостта на орбитата и плоскостта, която преминава през екватора се различават екваториални ($\alpha = 0^\circ$), полярни ($\alpha = 90^\circ$) и наклонени или междинни ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) орбити на спътниците (фиг.1.3).

За да може един спътник през определено време периодически да се появява над един и същи район, той трябва да се завърта цяло число пъти за едно денонощие. Ако спътникът се намира на 265 *km* над екватора броят на завъртанията му са 16, при височина 1670 *km* – 12, а при височина 6 420 *km* – 6.

Спътник намиращ се на височина 35 887 *km* в плоскостта на екватора се казва, че той се намира на така наречената геостационарна орбита. Такъв спътник извършва един оборот около Земята точно за едно земно денонощие. Ако посоката на движението му съвпада с посоката на въртене на Земята, то той ще изглежда неподвижен за един земен наблюдател и винаги ще се намира в едно и също зрително поле.

Първи, който е изчислил местоположението на един комуникационен спътник, за да може той да се намира винаги над една и съща географска точка е американският физик и писател-фантаст Артър Кларк през 1945 г. В негова чест геостационарната орбита се нарича “Пояс на Кларк”. [126-133]



Фиг. 1.3. Видове спътникови орбити

В настоящия момент всички комуникационни спътници за комерсиални цели се намират на геостационарна орбита. На една позиция, на една географска дължина, могат да се намират няколко спътника, на разстояние един от друг 100 *km*. Например, седем спътника от серията Astra са разместени на една и съща позиция на 19⁰ и. д.

Най-важните преимущества на комуникационните спътници намиращи се на геостационарна орбита са:

- *Непрекъсната денонощна радиовръзка;*
- *Опростена организация на връзките в глобален мащаб;*

- *Висока стабилност на сигнала в даден радиоканал;*
- *Липса на устройства за съпровождане в антенните системи на наземните станции.*

Недостатък при използването на геостационарната орбита е пренасищането със спътници на определени участъци и невъзможност за обслужване на полярните области.

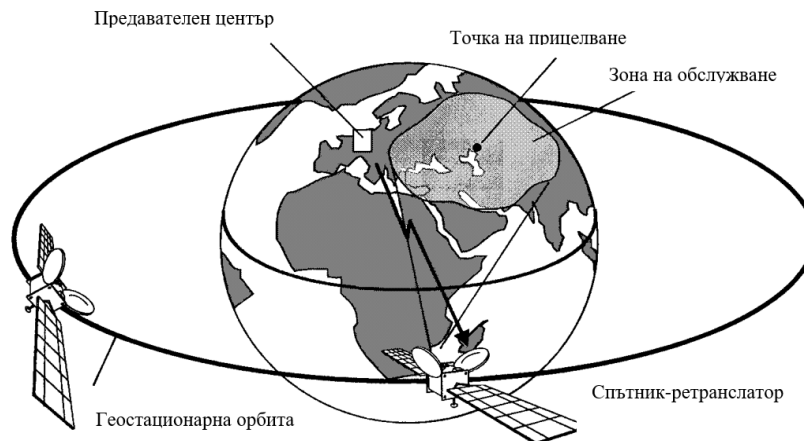
1.2. Прилагане на спътникови телевизионни ретранслатори

Спътникът приема от Земята сигнали с малка мощност и след като ги усили ги препредава обратно. Непосредствената близост на приемната и предавателната антена би довела до неустойчивост на системата, ако спътникът трябва да работи като повторител или регенератор. Затова препредаването (ретранслацията) се извършва на различни честоти – между приемниците и предавателите монтирани на спътника се поставя верига от честотни преобразуватели наричани транспондери. Честотата на предаване към спътника (по канала “нагоре”) обикновено е по-висока от честотата на предаване към Земята (по канала “надолу”) . В този случай честотните преобразуватели са понижавачи и често се наричат “понижавачи конвертори”. Необходимата СВЧ мощност между 3 и 400 W на предавател , чрез параболични огледални антени се насочва към Земята. Малките мощности се използват при остро насочен лъч в определени малки зони, а големите - при глобално континентално покритие [126,133].

В комбинация с кабелните мрежи спътниковите ретранслатори в момента се явяват основно средство за осигуряване на многопрограмно висококачествено телевизионно разпръскване.

Системата за спътниково телевизионно разпръскване включва в себе си следните подсистеми:

- *Предавателен телевизионен център*
- *Активен спътник ретранслатор*
- *Приемна апаратура*



Фиг. 1.5. Спътникова ретранслация на телевизионни сигнали.

Частта от земната повърхност, която трябва да бъде обхваната от телевизионно разпръскване при зададено ниво на сигнала се нарича “**зона на обслужване**”. Тази зона обикновено има сложна геометрична форма.

При спътниковото телевизионно разпръскване нивото на излъчвания сигнал е прието да се характеризира с произведението от мощността (във ватове – W), която се подава към антената и нейния коефициент на усилване (в децибели – dB) спрямо изотропен излъчвател с мощност $1W$. Изотропен излъчвател е този , който има равномерно излъчване във всички посоки.

Горното произведение се нарича еквивалентна изотропна излъчвана мощност (*EIIM-EIRP*) и се измерва в dBW . В инженерната практика този параметър се определя от израза:

$$EIRP = G_T + 10 \lg (\alpha_T P_T), \quad (1.1)$$

където G_T е усилването на предавателната антена ; α_T е коефициент на предаване по мощност на вълноводния тракт на бордовата апаратура от изхода на предавателя до облъчвателя на антената.

В зависимост от големината на $EIIM$ се разделят в четири групи:

1. Маломощни с $EIIM = 45 - 50 \text{ dBW}$
2. Средномощни, за които $EIIM = 50 - 55 \text{ dBW}$
3. Оптимални по мощност, които $EIIM = 55 - 60 \text{ dBW}$
4. Мощни с $EIIM = 60 - 65 \text{ dBW}$

Общите загуби на енергия от спътника до Земята (в децибели) се изчисляват по формулата

$$L = L_0 + L_{\Sigma}, \quad (1.2)$$

където L_{Σ} е допълнителното затихване на сигнала (поглъщане от атмосферата, рефракция, деполяризация, местоположението на приемната антена и др.), L_0 са загубите в свободното пространство, дължащи се на затихване на сигнала при отдалечаване от източника (в децибели). За използваните в спътниковото радио и телевизионно разпръскване честотни обхвати и при максимална отдалеченост на приемника и предавателя $L_0 \approx 206 \text{ dB}$.

Тъй като България се намира в т. нар. втора климатична зона и ъгъла на мястото е около 40° , допълнителните загуби са $1,5 \text{ dB}$. Ако излъчващият спътник работи в обхвата 12 GHz , сумарните загуби по трасето между спътника и Земята ще бъдат около 207 dB .

Най – често като характеристика на спътниковата линия се представя чрез **плътността на потока на мощността в точката на приемане PFD (Power Flux Density)**, която представлява мощността на сигнала на единица площ и се определя в dBW/m^2 от формулата:

$$PFD = EIRP - L - 20 \lg F + 21,5, \quad (1.3)$$

където $EIRP$ е в dBW , L – в dB , F - честотата – GHz . Например при $EIRP = 50 - 55 \text{ dBW}$; $L = 207 \text{ dB}$ и $F = 12 \text{ GHz}$, $PFD = - (114 \div 109) \text{ dBW}/\text{m}^2$.

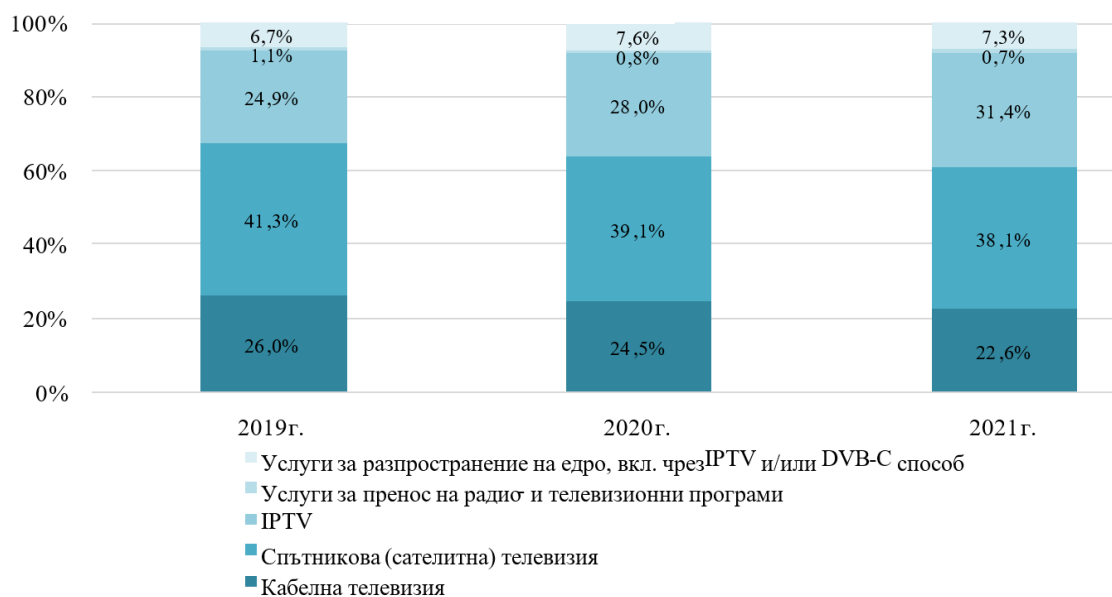
1.3. Състояние и относителен дял на спътниковите комуникации в Република България

През 2021 г. обемът на пазарния сегмент „Услуги за пренос и/или разпространение на радио- и телевизионни програми” възлиза на 453,187 млн. лв. и бележи ръст от 6% спрямо 2020 г.

Обобщена информация за броя на фирмите, предоставяли услуги за пренос и/или разпространение на радио- и телевизионни програми, за броя на техните абонати/ползвателите, както и за размера на генерираните от тях приходи, заедно със структурата на сегмента, е представена в [159].

Според представените от телекомуникационните оператори данни, през 2021 г. ръст бележат приходите от три услуги, включени в сегмента – IPTV (с 18,7%), *спътникова телевизия* (с 3,3%) и услуги за разпространение на радио- и телевизионни програми на едро (с 2,3%), за разглеждания едногодишен период. Приходите на останалите услуги в сегмента намаляват спрямо 2020 г. Спад се наблюдава в размера на приходите от кабелна телевизия – с 2,5% спрямо 2020 г.

През 2021 г. най-голям дял в общия обем на сегмента (92%) продължават да заемат приходите от предоставяне на услуги на дребно за разпространение на радио- и телевизионни програми (фиг. 1.7): кабелна телевизия, спътникова (сателитна) телевизия и IPTV. За поредна година приходите от *сателитна телевизия* заемат най-висок дял в общия обем на сегмента, като в относително изражение този дял намалява с 1 процентен пункт за едногодишен период до 38,1%, следван от дела на приходите от IPTV, който и през 2021 г. продължава възходящото си развитие. Единствено делът на приходите от предоставяне на IP телевизия отбелязва ръст спрямо предходната година с 3,4 процентни пункта, достигайки 31,4% в общия обем на сегмента и доближавайки се до дела на приходите от сателитна телевизия.



Фиг. 1.7. Структура на приходите по видове услуги на пазарен сегмент „Услуги за пренос и/или разпространение на радио- и телевизионни програми“ за периода 2019 – 2021 г.

1.4. Прилагане на стандарти за спътниково разпространение на цифрови телевизионни сигнали

1.4.2. DVB-S2 стандарт

Стандартът DVB-S не притежава гъвкавост - от една страна в определени условия позволява да се постигне приемането с до една грешка на час, което е по-високо от необходимото, а от друга страна при силен дъжд защитата е недостатъчна за обхвата Ku и често приемането се прекъсва. Това е наложило разработването на нов стандарт. Новият стандарт е провокиран и от развитието на технологиите и е резултат от сериозни изследвания и компютърни симулации. Стандартът е известен под названието DVB-S.2 и вариантът EN 302 307 v1.1.2 е публикуван през 2006 г. [30].

При подготовка на стандарта DVB-S.2 са поставени следните изисквания:

- да се повиши ефективното използване на транспортните способности на спътниковите канали;
- да съществува диференциален подход при избора на транспортните параметри на канала при едновременното предаване на различни услуги;
- да има съвместимост със стандарта DVB-S.

В резултат е разработен универсален стандарт DVB-S2, позволяващ да се изградят мрежи за разпръскване както на стандартна телевизия, както и телевизия с висока разделителна способност, на мрежи за предоставяне на интерактивни услуги, за професионални приложения, за предаване на данни и за създаване на IP магистрали [34].

1.5. Проблеми на спътниковото телевизионно разпръскване и методи за тяхното решаване

За осигуряване на необходимото качество на приемните цифрови ТВ програми е необходимо коефициентът на двоична грешка (BER – Bit Error Rate) в изхода на каналния декодер да е в границите 10^{-11} . Това съответства на т.нар. квази-безпогрешно приемане (QEF – Quasi Error Free). Квази-безпогрешно приемане се постига, когато отношението носещо трептение/шум (CNR – Carrier to Noise Ratio) на входа на спътниковия приемник е по-голямо от зададена стойност. Проблеми при изпълнението на това изискване създава огромното затихване на сигнала (над 200 dB) и високото ниво на шумовете в спътниковата радиолиния.

В спътниковите и наземните системи изискването за $BER \leq 10^{-11}$ се удовлетворява чрез прилагане на двустепенно (външно и вътрешно) кодиране и допълнително разместване на битовете. Каналните кодове, които са се наложили в DVB системите от първо поколение са

Рид-Соломон и конволюционния код, а в системите от второ поколение – BCH и LDPC кодовете. Тези кодове са описани подробно в съществуващите стандарти за спътниково ТВ разпръскване [26, 30, 31, 34].

За увеличаване на ефективността на кода на Рид-Соломон може да се увеличи дължината на кодовата дума при запазване на скоростта на кода или да се намали скоростта на кода при запазване на дължината на кодовата дума. Такива изследвания са правени в [102]. Намалването на скоростта на кода обаче води до намаляване на предаваната информация в пакета, което влошава пропускателната способност на канала за връзка. Затова е необходимо да се направи компромис при избора на параметрите на кода (дължина на пакета и скорост на кода) между шумоустойчивост, пропускателна способност и сложност на използваната апаратура.

При избора на оптимален конволюционен код е важно да се отчетат два основни фактора. Първият е дължината на запомняне, а оттам и генераторните полиноми на изходите, а вторият е изчислителната сложност на декодера. В [95] и [96] са дадени оптималните генераторни полиноми на конволюционни кодове с дължина на запомняне до 9 и скорост на кода $1/2$ и $1/3$. Оптималните генераторни полиноми на конволюционни код със скорости $1/2$, $1/3$ и $1/4$ и дължина на запомняне до 14 са представени в [64], а за кодове със скорост $1/2$, $1/3$ и $2/3$ и дължина на запомняне до 13, 9 и 8 – в [42], [119] и [130]. Основният недостатък на конволюционните кодове е сложното му декодиране. Дори при използването на декодер, работещ с алгоритъма на Витерби, с увеличаване на дължината на запомняне се увеличава значително изчислителната сложност на декодера. Това води до ограничаване на дължината на запомняне на конволюционния код, а оттам и на неговата ефективност.

BCH кодът представлява обобщена версия на кода на Рид-Соломон и основните зависимости на ефективността на кода от неговите параметри са аналогични. Разликата между използваните кодове на Рид Соломон и BCH кода е в това, че вторият е двоичен и има значително по-голяма дължина на кодовата дума.

Основното предимство на DVB системите от второто поколение по отношение на шумоустойчивостта се дължи на LDPC кодовете. Макар и предложени отдавна (1963 г.) в дисертационния труд на Галагер [44], тяхното използване започва едва в края на 90-те години. Предложените от Галагер кодове са били „регулярни“ (с еднакъв брой единици във всеки ред и еднакъв брой единици във всяка колона на проверочната матрица), а след това са предложени „нерегулярните“ кодове, които са намерили по-голямо приложение, поради по-добрите си характеристики (по-висока ефективност, гъвкавост и др.) Основният проблем на LDPC кодовете е трудното изчисление на генераторната матрица въз основа на проверочната матрица. В [106], [23] и [24] са описани „нерегулярни“ LDPC кодове със специфична структура на проверочната матрица, при които изчислението на генераторната матрица е сравнително просто.

Изследванията в областта на LDPC кодовете са насочени основно в следните две направления: подобряване на тяхната ефективност и намаляване на сложността на кодиращата и декодиращата апаратура. В [40] е предложен алгоритъм за итеративно декодиране, който намалява сложността на този процес, а в [75] са представени блокови схеми, реализиращи процесите на кодиране и декодиране. В [117] е предложен алгоритъм за компютърни телевизионни приемници, при които за LDPC декодирането освен централния процесор се използва и видеоускорител, поддържащ технологията CUDA, осигуряваща неколкостранно ускоряване на процеса на декодиране.

При избора на модулация се цели да се постигне колкото се може по-голям канален капацитет при запазване на шумоустойчивостта на радиоканала и минимални нелинейни изкривявания на сигналите в него. Известно е, че каналния капацитет нараства с увеличаване на кратността на манипулацията, но това води до по-голяма вероятност за грешка в приемната видеоинформация. Затова в спътниковите DVB системи не се използват фазови манипулации (PSK) с кратност по-голяма от осем. При една и съща кратност на манипулацията по-голяма шумоустойчивост на канала осигурява квадратурната амплитудна

манипулация (QAM), но тази модулация не е подходяща за предаване на сигналите по нелинейния спътников ТВ канал. Затова в спътниковите DVB системи от второ поколение едновременно с QPSK и 8PSK методите се използват амплитудно-фазовата манипулация (APSK), която по шумоустойчивост не отстъпва на QAM, но е по-устойчива от нелинейни изкривявания и осигурява по-голяма енергийна ефективност на предавателя. В [47] се доказва, че когато каналът за връзка е линеен неговата шумоустойчивост е почти еднаква при използване на APSK и QAM метод, а в [90] и [92] са показани предимствата на APSK модулацията в сравнение с QAM при нелинеен канал за връзка.

В DVB-S стандарта е предвиден QPSK метод за предаване на ТВ сигнали по спътников радиоканал, докато в DVB-S2 стандарта се използват четири вида модуляции (QPSK, 8PSK, 16 APSK и 32 APSK), като за телевизионно разпръскване са се наложили QPSK и 8PSK. Това се обяснява с обстоятелството, че те имат постоянна амплитуда и са по-устойчиви на нелинейни изкривявания, което позволява крайният усилвател на мощност в спътниковия ретранслатор да работи в режим близък до точката на насищане. 16APSK и 32APSK модулациите са предвидени главно за професионални приложения, но те могат да бъдат използвани и за ТВ разпръскване, тъй като поради по-голямата си лентова ефективност позволяват да се увеличи капацитета на спътниковия радиоканал. Тези методи за корекция в предавателната станция с цел намаляване на ефектите от нелинейността на крайния усилвател на мощност в спътниковия ретранслатор.

APSK модулациите са специално оптимизирани за използване при нелинеен краен усилвател на мощност, чрез разполагане на сигналните точки по окръжности вместо в квадрати, както е при QAM. Макар че тези модуляции са по-устойчиви на нелинейни изкривявания в сравнение с QAM, тяхната енергийна ефективност е по-малка от тази на PSK, тъй като символните точки в APSK съзвездията са разположени на повече от една концентрични окръжности.

Разработени са различни алгоритми за оптимизиране на параметрите на APSK съзвездията, като най-популярните са тези, при които се извършва максимизиране на минималното евклидово разстояние [49] и максимизиране на взаимната информация [78]. В стандарта DVB-S2 се използват 16APSK и 32 APSK съзвездия, които са оптимизирани по втория критерий, като техните параметри са дадени в [48]. Изрази за определяне на символната и битовата грешка при 64APSK съзвездията могат да се намерят в [1], а в [39] е предложено оптимизирано 64APSK съзвездие.

ГЛАВА II. СИНТЕЗИРАНЕ НА МОДЕЛИ ЗА СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЦИФРОВА СИСТЕМА ПО СТАНДАРТ DVB-S2

DVB-S2 е второто поколение стандарт за цифрово видеоразпръскване. Системата представлява съвременно решение за кодиране на канали, като схемата за кодиране се основава на обединяване на LDPC (проверка на четността с ниска плътност) и BCH кодове. LDPC кодовете, могат да постигнат изключително ниски нива на грешки в близост до капацитета на канала чрез използване на алгоритъм за итеративно декодиране с ниска сложност. Външните BCH кодове се използват за коригиране на случайни грешки, допуснати от LDPC декодера [132].

Кодовете на каналите за DVB-S2 осигуряват значително увеличаване на капацитета над DVB-S при същите условия на предаване и позволяват работа без грешки (честота на грешки в пакета под 10^{-7}) при около 0.7 dB до 1 dB от ограничението на Шенон, в зависимост от режима на предаване [139].

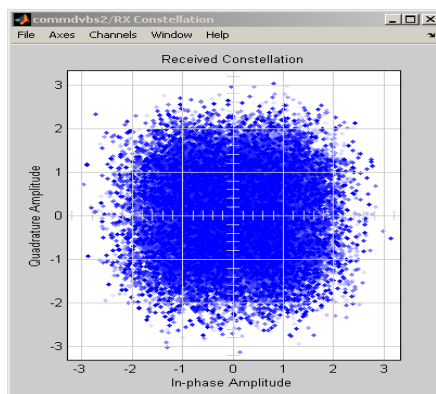
2.1. Структура на DVB-S2 модел и основни операции при обработката на сигнала

Моделът на DVB-S2 (фиг. 2.1) представлява усъвършенстван вариант на схема за кодиране на канали, използвана във второ поколение стандарт за цифрово видеоразпръскване (DVB-S2). Схемата за кодиране се основава на последователност от връзки на LDPC и BCH кодове. Представени моделиране на BCH кодера, LDPC кодера,

interleaver (разместване), модулятора, както и техните аналози в приемника, съгласно стандарта DVB-S2.

2.2. Резултати от симулационите изследвания на модела на DVB-S2 системата

При стартиране на симулацията се визуализира съзвездието на получения модулиран сигнал [A5]. Броят на грешно приетите битове на LDPC сигнала (линеен код с корекция на грешки) и броят на грешно приетите пакети се показват от броячите на грешки и актуализират непрекъснато във времето. Фиг. 2.8 показва и ефективността на LDPC кодовете при използвани параметри: QPSK, скорост $\frac{1}{2}$, $E_s/N_0 = 1\text{ dB}$ и 50 итерации при декодирането. И при по-малки стойности на SNR, LDPC декодерът рядко допуска грешка. Разпръснатото съзвездие нагледно показва колко шумен е канала.

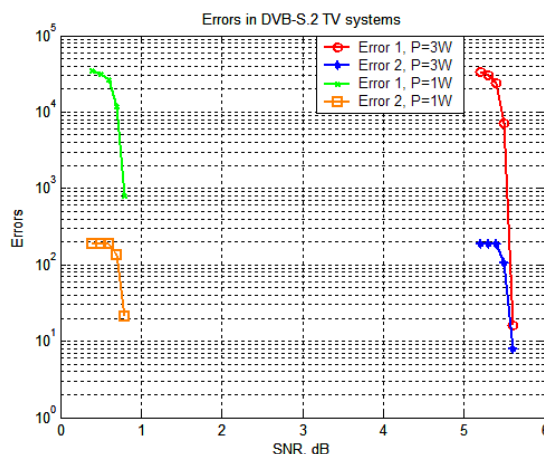


Фиг. 2.8. Прието QPSK сигнално съзвездие при SNR=10 dB

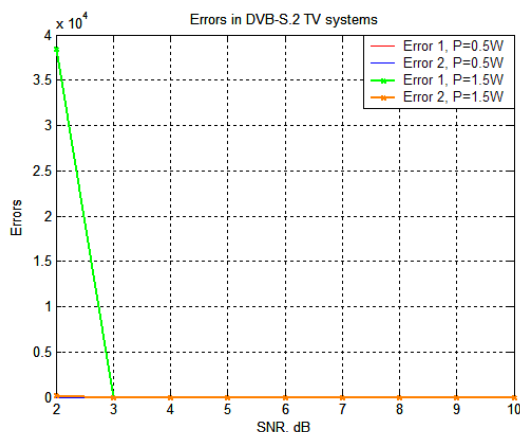
Ако стойността на E_s/N_0 се намали, например до 0,5 dB, степента на грешки в битовете на LDPC ще бъде много по-голяма. Това е в съответствие със стръмни криви на ефективността на LDPC кодовете.

На фиг. 2.9 и фиг. 2.10 са показани графични зависимости на Error1 (броят на грешките в резултат на LDPC кодиране/декодиране) и Error2 (броят на грешките в резултат на BCH кодиране/декодиране) в зависимост от отношението сигнал/шум при различни стойности на мощността на предавания сигнал P. От фиг. 2.9. се установява, че с нарастване на SNR зависимостите и за двете мощности (3W и 1W) са аналогични и експоненциално намаляващи с разлика в необходимото отношение сигнал/шум от 4,8 dB. Зависимостите за Error2 в самото начало са линейни.

При много малки мощности - $P=0,5W$ стойностите на параметрите Error1 и Error2 са нулеви, а Error1 за $R=1.5W$ при SNR между 2 и 3 dB е линейно намаляващо.



Фиг. 2.9. Графични зависимости на Error1 и Error2 във функция на P1 и P2



Фиг. 2.10. Графични зависимости на Error1 и Error2 във функция на P1 и P2

От сравняване на графичните зависимости, показани на фиг. 2.9 и 2.10, се установява различният характер на намаляване на стойностите на грешките Error1 и Error2 при различни мощности на предавания сигнал, като при по-малки мощности зависимостта на Error1 е линейно намаляваща. При по-малки стойности, независимо от малките стойности на отношението сигнал/шум, ефективността и на двата вида кодиране и много голяма, като в краен резултат се получават нулеви грешки.

2.3. Моделиране и изследване на процесите на кодиране и тяхната ефективност при предаване на цифров сигнал по стандарт DVB-S/S2

2.3.1. Описание и параметри на симулационния модел

За целите на симулационното изследване и анализ на предаване на цифров сигнал по стандарт DVB-S/S2 ще използвам симулационен модел [A2], разработен за MATLAB 8.3 [139]. Стандартът ETSI EN302 307 (DVB-S2) [30] използва специална кодираща схема за да повиши каналния капацитет. Конкатенацията на LDPC и BCH кодовете е база за тази кодираща схема. LDPC кодовете, предложени от Галагър през 1960 г. може да постигнат много ниска стойност на грешката близка до капацитета на канала чрез използване на итеративен декодиращ алгоритъм с ниска сложност [54, 74]. Външните BCH кодовете се използват за коригиране на спорадични грешки, допуснати от LDPC декодера.

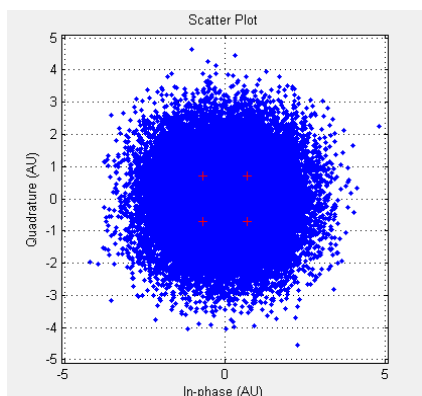
Каналното кодиране за DVB-S2 осигурява значително увеличен капацитет в сравнение с DVB-S, при същите условия за предаване. В зависимост от начина на предаване, DVB-S2 осигурява квази-безпогрешна работа (QEF) (процент на грешка на пакет под 10^{-7}) при около 0,7 dB до 1 dB от границата Шанън. Този пример симулира BCH енкодер, LDPC енкодер, разместване на битовете, модулатор, както и обратната обработка в приемника, по стандарта DVB-S2. Примерът извежда коефициента на грешка в демодулатора, LDPC декодера и изходите BCH декодери, определя разпределението на броя на итерациите, извършвани от LDPC декодера, и показва получените диаграми на съзвездието.

Резултат от симулацията при режим QPSK 1/4:

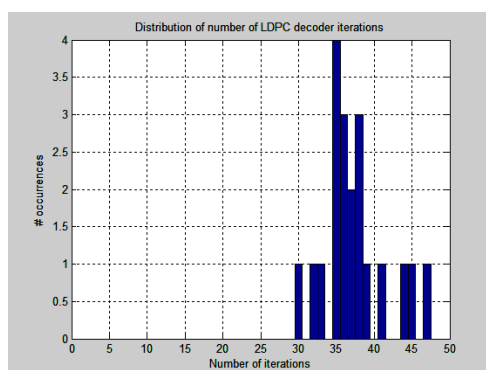
При промяна на съотношението SNR и отчитане на стойността на BER след модулатора (BER_{MOD}) и на стойността на BER след LDPC-декодера (BER_{LDPC}) се получават следните резултати:

Таблица 2.5. Таблични резултати за BER_{MOD} и BER_{LDPC} във функция от SNR при режим QPSK 1/4

SNR, dB	-4	-3	-2,75	-2,5	-2,25	-1	1	4
BER_{MOD}	$2,64 \cdot 10^{-1}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$2,33 \cdot 10^{-1}$	$2,26 \cdot 10^{-1}$	$2,21 \cdot 10^{-1}$	$1,86 \cdot 10^{-1}$	$1,31 \cdot 10^{-1}$	$5,64 \cdot 10^{-2}$
BER_{LDPC}	$1,86 \cdot 10^{-1}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$4,91 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0



Фиг. 2.14. Диаграма на съзвездието на приетия сигнал в режим QPSK 1/4



Фиг. 2.15. Разпределение на броя итерации извършени от LDPC декодера при QPSK 1/4

Извод 4 от изследването:

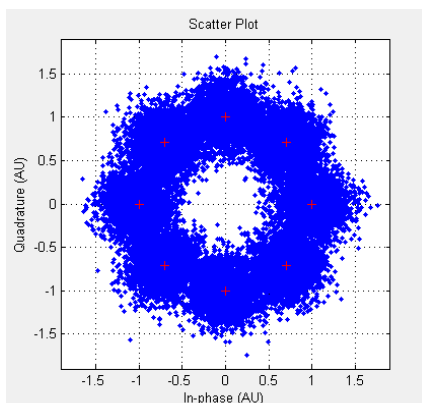
От табл. 2.5 и получените графични резултати може да се определи, че при режим QPSK 1/4 минималната стойност на SNR, за която няма да има грешки след LDPC декодера се получава да бъде $SNR = -2,5\text{dB}$ при $BER_{MOD} = 2,26 \cdot 10^{-1}$.

Резултат от симулацията при режим 8-PSK 9/10:

При промяна на съотношението SNR и отчитане на стойността на BER след модулятора (BER_{MOD}) и на стойността на BER след LDPC-декодера (BER_{LDPC}) се получават следните резултати:

Таблица 2.7. Таблични резултати за BER_{MOD} и BER_{LDPC} във функция от SNR при режим 8-PSK 9/10

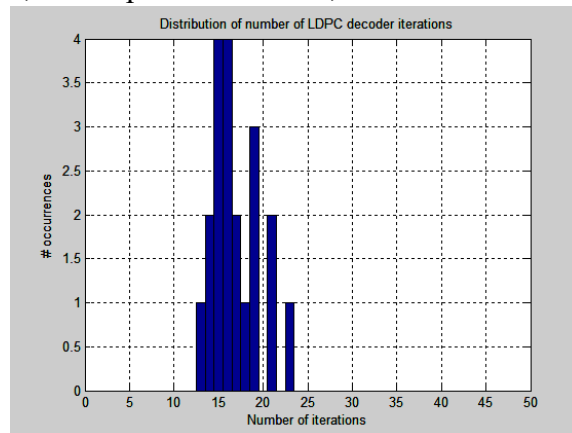
SNR, dB	-4	1	4	8	10	10,85	12	14	16
BER_{MOD}	$3,31 \cdot 10^{-1}$	$2,15 \cdot 10^{-1}$	$1,41 \cdot 10^{-1}$	$5,87 \cdot 10^{-2}$	$2,91 \cdot 10^{-2}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$2,26 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$
BER_{LDPC}	$3,36 \cdot 10^{-1}$	$2,20 \cdot 10^{-1}$	$1,44 \cdot 10^{-1}$	$5,98 \cdot 10^{-2}$	$2,39 \cdot 10^{-2}$	0	0	0	0



Фиг. 2.18. Диаграма на съзвездието на приетия сигнал в режим 8-PSK 9/10

Извод 5 от изследването:

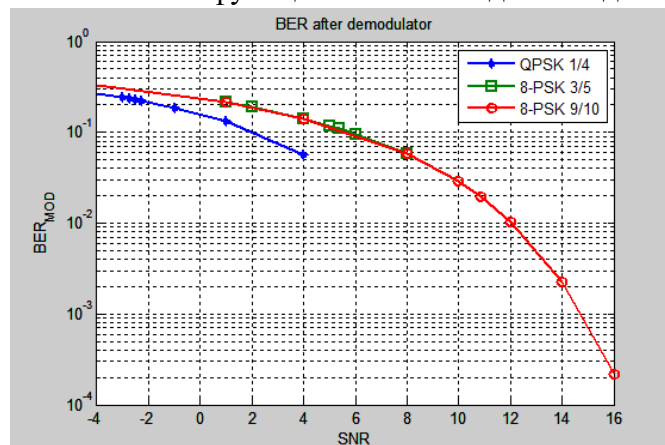
От табл. 2.7 и получените графични резултати може да се определи, че при режим 8-PSK 9/10 минималната стойност на SNR, за която няма да има грешки след LDPC декодера се получава да бъде $SNR = 10,85dB$ при $BER_{MOD} = 1,95 \cdot 10^{-2}$.



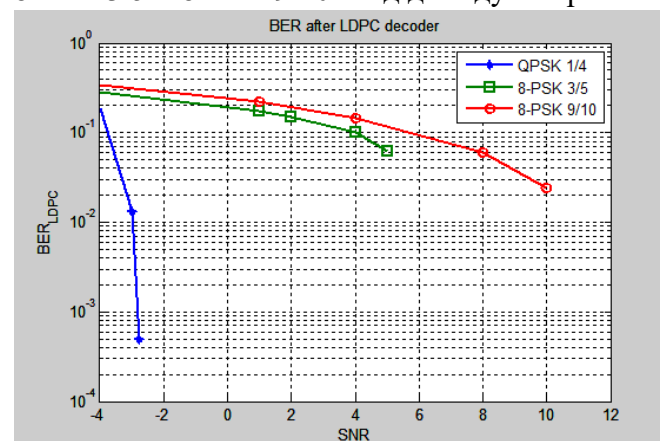
Фиг. 2.19. Разпределение на броя итерации извършени от LDPC декодера при 8-PSK 9/10

2.3.3. Сравнителен анализ на симулационните резултати

На базата на обобщените резултати в табл. 2.5, 2.6 и 2.7, на фиг. 2.20 е представена зависимостта на BER във функция от съотношението сигнал шум SNR, получено след демодулатора, а на фиг. 2.21 – BER във функция от SNR след LDPC декодера.



Фиг. 2.20. Зависимост на BER във функция от SNR за режими QPSK 1/4, 8-PSK 3/5 и 8-PSK 9/10 след демодулатора



Фиг. 2.21. Зависимост на BER във функция от SNR за режими QPSK 1/4, 8-PSK 3/5 и 8-PSK 9/10 след LDPC декодера

2.4. Изводи към втора глава

Един от основните недостатъци на системата DVB-S е използването на модулация QPSK, която е ниско ефективна и не позволява пълноценно използване на честотния спектър на транспондера. Разпространяването на програми с висока разделителна способност, както и изграждането на интерактивни спътникови мрежи с адресируеми услуги, изисква наличието на по-високи транспортни ресурси. Това налага прехода към DVB-S2. За да се изпълни изискването за съвместимост в DVB-S2 са въведени два режима - първият позволява съвместимост надолу, но има по-ниска ефективност (за сега няма сведения за използване на този режим на практика). Вторият режим дава и използва всички възможности на DVB-S2, но не може да се приема с DVB-S приставки.

Представени и описани подробно модели за симулационно изследване на цифрови телевизионни системи по стандартите DVB-S2 и DVB-T. Приложени са резултати в аналитичен и графичен вид на зависимостите на броя на грешките Error1 и Error2 както и получените сигнални съзвездия за различни стойности на отношението сигнал/шум SNR при постоянна мощност на предавания сигнал. Установява се, че намаляването на стойността на SNR води до увеличаване на влиянието на шумовете върху приетия сигнал и разсейване на векторното съзвездие.

При системата DVB-S2 стойността на BER силно зависи от SNR и бързо намалява с неговото нарастване, т.е. средата оказва силно влияние върху броя на приетите грешки. При системата DVB-T стойността на BER започва да намалява след SNR=16 dB и не може да достигне малките стойности при системата DVB-S2. Това налага използването външно и вътрешно кодиране/декодиране при системата DVB-S2 да са значително по-ефективни. Представено е подробно описание на симулационен модел за предаване на цифров сигнал по DVB-S/S2, а след това е направено изследване и сравнителен анализ на резултатите от моделирането за различни режими на модулация и FEC.

ГЛАВА III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА СИГНАЛИ В СИСТЕМИТЕ ЗА САТЕЛИТНА ЦИФРОВА ТЕЛЕВИЗИЯ

3.1. Схема на опитната постановка

За целите на експерименталното изследване и анализ на предаване на цифров сигнал по стандарт DVB-S/S2 е опитната постановка, представена с блоковата схема на фиг. 3.1.



Фиг. 3.1. Блокова схема за провеждане на експерименталните изследвания

Опитната постановка е разположена в лаб. 1133Б на Нов учебен корпус („Интеграл“) на Технически университет – Габрово. [A2]

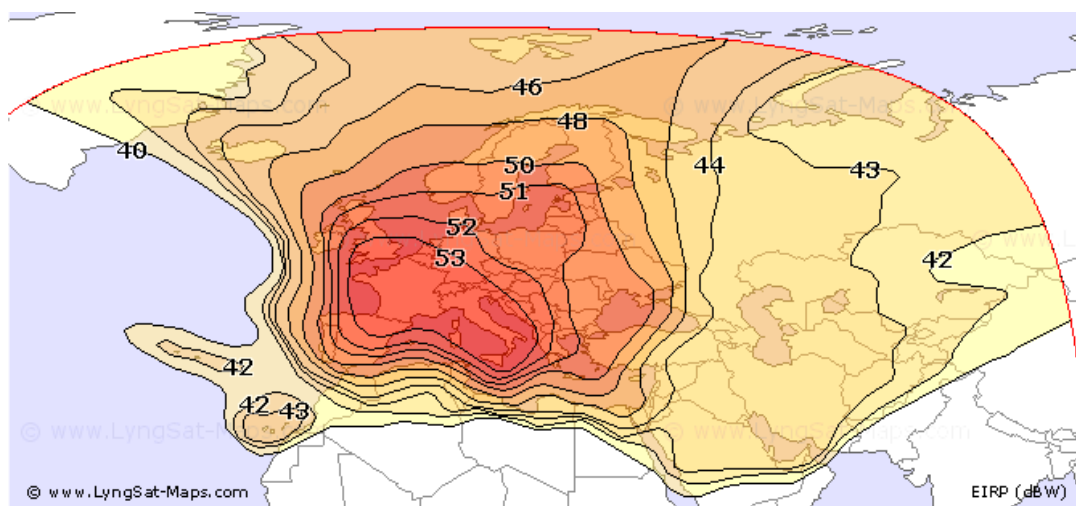
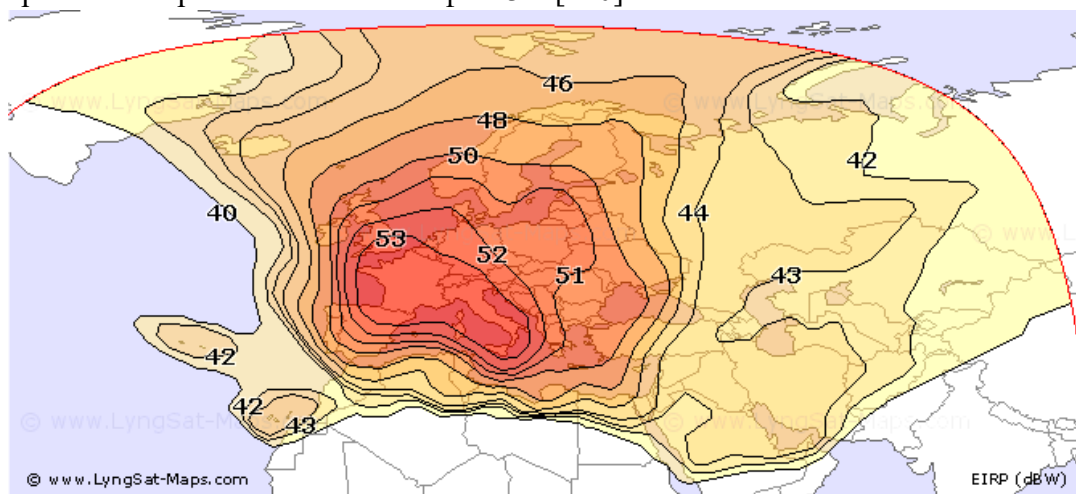
Използваната сателитна антена е тип „парабола“ с диаметър 120 cm, с материал на рефлектора – алуминий, фокус 45 cm, дебелина на рефлектора 1mm, електростатично прахово боядисана цвят светло сив; $F/D = 0.375$, усилване 11.350 GHz - 40.9 dB, усилване 12.125 GHz - 41.5 dB, усилване 12.626 GHz - 41.8 dB; с полярно окачване подходящо за линейни мотори.

Конверторът, монтиран на сателитната антена е EUROSTAR, модел ESKD-T2B; входна честота 10,70 до 12,75 GHz, изходна честота (LO) 950 до 1950 MHz, изходна честота (HI) 1100 до 2150 MHz, шумов коефициент 0,5dB.

IT-083 е специализиран анализатор за измервания и анализ на сигналите в системите за сателитна цифрова телевизия, разработен от руската фирма PLANAR [139], с прилежащ към него софтуер ItToolsSatellite08C за работа с персонален компютър.

3.2. Насочване на приемната сателитна антена

В зоната на видимост от лаб. 1133Б попада спътника Eutelsat Hot Bird 13,0°E, чиято зона на покритие за Европа е показана на фиг. 3.2 [140].

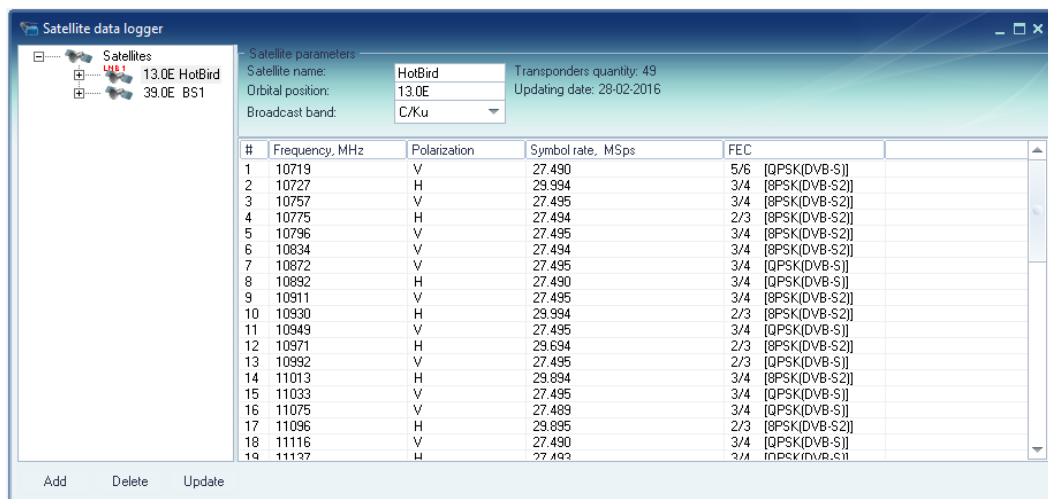


Фиг. 3.2. Зона на покритие на спътник Eutelsat Hot Bird 13,0°E

Спътникът осигурява $EIRP = 44dBW$ за размер на сателитната антена 95 – 120 cm.

3.3. Провеждане на експериментално изследване

Първата стъпка преди започването на измерванията, това е въвеждането на нужния спътник и сканиране на транспондерите към него. След свързване на IT-083 към конвертора на сателитната антена, той автоматично сканира и избира активните транспондери и ги запазва в т.нар. Satellite Data Logger (Списък на сателитните данни) – фиг. 3.4.



#	Frequency, MHz	Polarization	Symbol rate, MSps	FEC
1	10719	V	27 490	5/6 [QPSK(DVB-S)]
2	10727	H	29 994	3/4 [8PSK(DVB-S2)]
3	10757	V	27 495	3/4 [8PSK(DVB-S2)]
4	10775	H	27 494	2/3 [8PSK(DVB-S2)]
5	10796	V	27 495	3/4 [8PSK(DVB-S2)]
6	10834	V	27 494	3/4 [8PSK(DVB-S2)]
7	10872	V	27 495	3/4 [QPSK(DVB-S)]
8	10892	H	27 490	3/4 [QPSK(DVB-S)]
9	10911	V	27 495	3/4 [8PSK(DVB-S2)]
10	10930	H	29 994	2/3 [8PSK(DVB-S2)]
11	10949	V	27 495	3/4 [QPSK(DVB-S)]
12	10971	H	29 694	2/3 [8PSK(DVB-S2)]
13	10992	V	27 495	2/3 [QPSK(DVB-S)]
14	11013	H	29 894	3/4 [8PSK(DVB-S2)]
15	11033	V	27 495	3/4 [QPSK(DVB-S)]
16	11075	V	27 489	3/4 [QPSK(DVB-S)]
17	11096	H	29 895	2/3 [8PSK(DVB-S2)]
18	11116	V	27 490	3/4 [QPSK(DVB-S)]
19	11137	H	27 493	3/4 [8PSK(DVB-S2)]

Фиг. 3.4. Сканиране и преглед на транспондерите към Hot Bird 13,0°E с IT-083

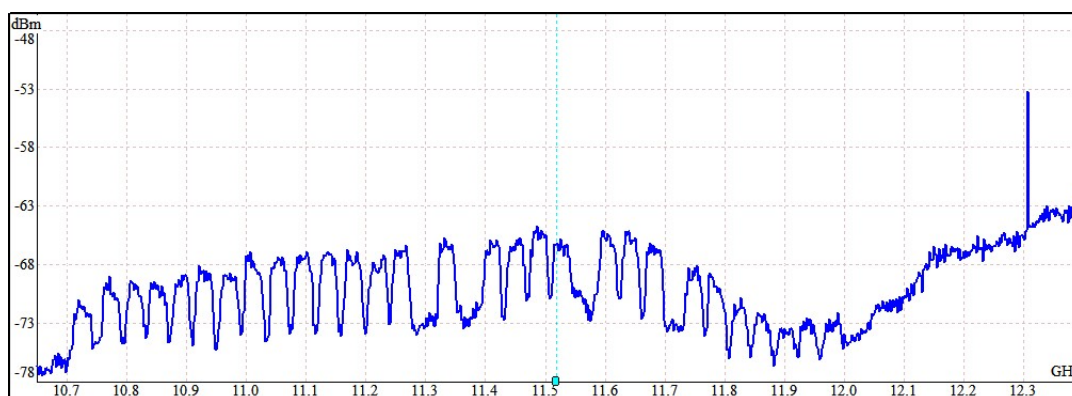
Списъкът със сателитни данни към даден сателит включва:

- Пореден номер на транспондера;
- Честота в MHz на транспондера;
- Поляризация;
- Символна скорост в MSps;
- FEC (корекция на грешки) и формат на модулацията.

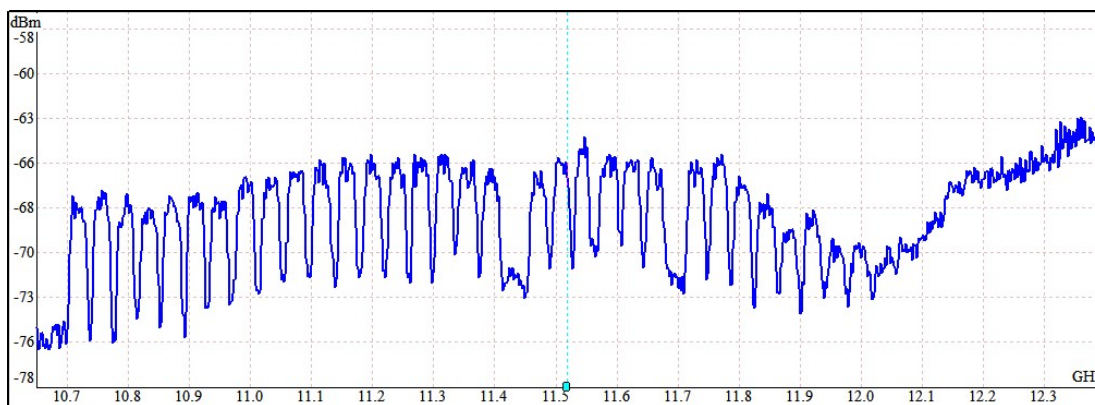
След като уредът е сканирал пълният честотен обхват, той генерира автоматично списък на засечените транспондери, на базата на който може да се провеждат по-нататъшни измервания.

За измерване на пълния честотен спектър избираме опцията Spectrum на анализатора IT-083 или използваме функцията Spectrum Analyzer от меню Device на приложният софтуер в случай, че анализаторът е свързан към персонален компютър.

На фиг. 3.5 е представен честотния спектър от 10,7 GHz до 12,4 GHz на сигнала на изхода на конвертора на сателитната антена при прием от спътник Hot Bird 13,0°E.



a)



б)

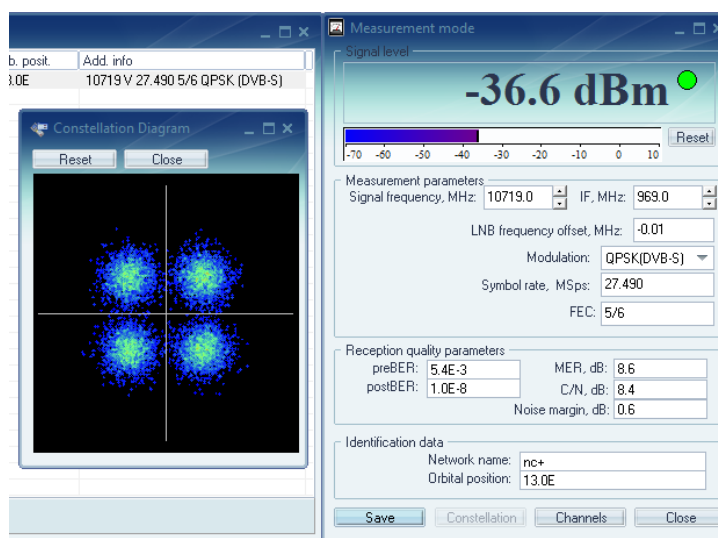
Фиг. 3.5. Честотен спектър на измерения на изхода на конвертора сигнал при а) хоризонтална и б) вертикална поляризация за Hot Bird 13,0°E

IT-083 позволява честотния спектър да се изобрази по ос X или по пореден номер на транспондерите, или по междинна честота (от 950 до 2150 MHz) на транспондерите, или както е показано на фиг. 3.5 – по честотата на транспондерите.

Тъй като пълният списък с транспондери на Hot Bird 13,0°E е много голям, то по-долу ще бъдат изведени детайлни измервания само за няколко от тях.

Резултат от измерването на транспондер с честота 10719 MHz:

На фиг. 3.6 са показани резултатите от измерването на сигнала на транспондер с честота 10719 MHz/V (вертикална поляризация).

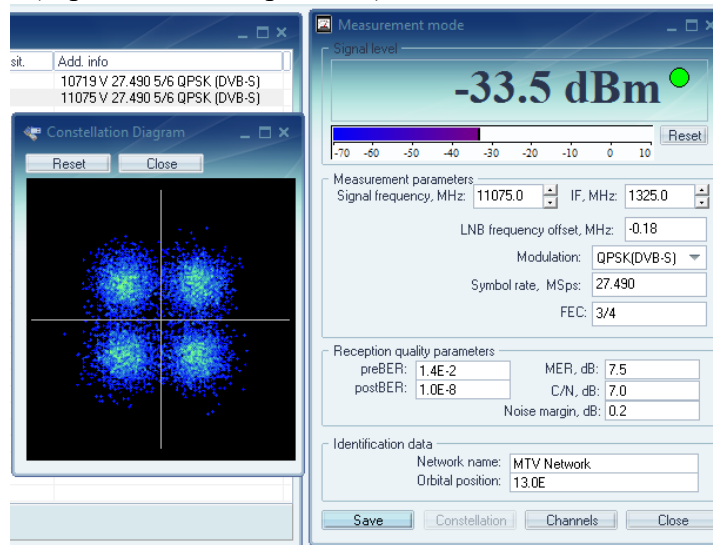


Фиг. 3.6. Контрол на векторна диаграма и измерване на нивото на сигнала на транспондер с честота 10719 MHz

От дясната част на фиг. 3.6 се отчита, че честотата на транспондера съответства на 969 MHz междинна честота. Форматът на модулацията е QPSK със символна скорост 27490 MSps и дълбочина на корекцията на грешки FEC 5/6. Измереното ниво по мощност е $-36,6$ dBm като стойността на коефициента на грешка след демодулатора е $\text{preBER} = 5,4 \cdot 10^{-3}$, а след корекцията на грешки $\text{postBER} = 1 \cdot 10^{-8}$ при отношение на носещата на сигнала към нивото шума $C/N = 8,4$ dB и стойност на модулационната грешка $\text{MER} = 8,6$ dB. В лявата част на фиг. 3.6 е представена векторната диаграма на сигнала.

Резултат от измерването на транспондер с честота 11075 MHz:

На фиг. 3.7 са показани резултатите от измерването на сигнала на транспондер с честота 11075 MHz/V (вертикална поляризация).

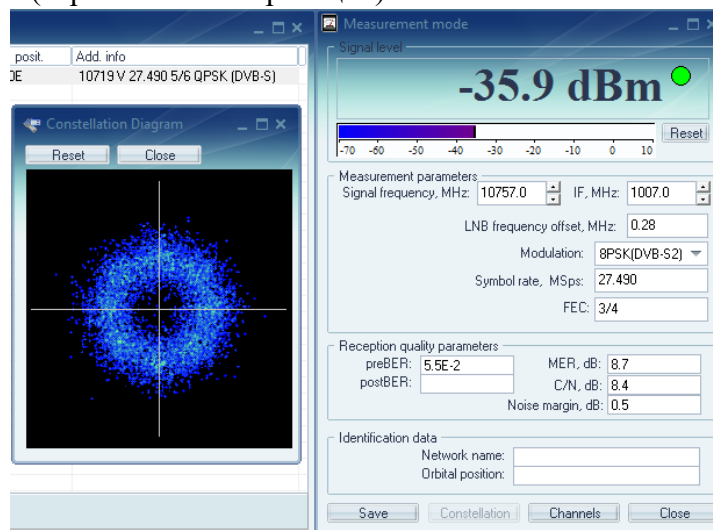


Фиг. 3.7. Контрол на векторна диаграма и измерване на нивото на сигнала на транспондер с честота 11075 MHz

От дясната част на фиг. 3.7 се отчита, че честотата на транспондера съответства на 1325 MHz междинна честота. Форматът на модулацията е QPSK със символна скорост 27490 MSps и дълбочина на корекцията на грешки FEC 3/4. Измереното ниво по мощност е $-33,5$ dBm като стойността на коефициента на грешка след демодулатора е $\text{preBER} = 1,4 \cdot 10^{-2}$, а след корекцията на грешки $\text{postBER} = 1 \cdot 10^{-8}$ при отношение на носещата на сигнала към нивото шума $C/N = 7,0$ dB и стойност на модулационната грешка $\text{MER} = 7,5$ dB. В лявата част на фиг. 3.7 е представена векторната диаграма на сигнала.

Резултат от измерването на транспондер с честота 10757 MHz:

На фиг. 3.10 са показани резултатите от измерването на сигнала на транспондер с честота 10757 MHz/V (вертикална поляризация).



Фиг. 3.10. Контрол на векторна диаграма и измерване на нивото на сигнала на транспондер с честота 10757 MHz

От дясната част на фиг. 3.10 се отчита, че честотата на транспондера съответства на 1007 MHz междинна честота. Форматът на модулацията е 8-PSK (DVB-S2) със символна скорост 27490 MSps и дълбочина на корекцията на грешки FEC 3/4. Измереното ниво по мощност е $-35,9$ dBm като стойността на коефициента на грешка след демодулатора е $\text{preBER} = 5,5 \cdot 10^{-2}$ като количеството грешки в приетия сигнал е твърде голямо за да може да се възстанови сигнала след корекцията на грешки. Отношението на носещата на сигнала към нивото шума е $C/N = 8,4$ dB, а стойността на модулационната грешка $\text{MER} = 8,7$ dB. В лявата част на фиг. 3.10 е представена векторната диаграма на сигнала.

3.4. Сравнителен анализ на експерименталните резултати и изводи от изследването

Синтезирана е схема на опитната постановка за измерване на параметрите и сигналите при приемане на цифров сигнал по DVB-S/S2 стандарт в учебна лаборатория 1133Б на територията на кат. КТТ в ТУ-Габрово. Извършено е предварително изчисление на ъглите на азимут и елевация, необходими за правилното насочване на приемната сателитна антена при избран спътник Eutelsat Hot Bird 13,0°E. След сканиране на наличните транспондери е проведено измерване на параметрите на сигналите от 5 транспондера, като получените резултати са разгледани и анализирани подробно.

Получените резултати, представени на фиг. 3.6 до фиг. 3.11, може да се обобщят в следния табличен вид.

Таблица 3.2. Сравнителен анализ на експерименталните резултати

f, MHz	Модулация	FEC	Пол.	preBER	postBER	CNR, dB	MER, dB	IF, MHz
10719	QPSK	5/6	V	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$	8,4	8,6	969
11075	QPSK	3/4	V	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-8}$	7,5	7,0	1325
11137	QPSK	3/4	H	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	7,0	6,1	1387
11804	QPSK	2/3	V	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-8}$	7,6	7,1	2054
10757	8-PSK	3/4	V	$5,5 \cdot 10^{-2}$	-	8,4	8,7	1007

От направените експериментални изследвания на параметрите на сигналите и качеството на приеманата сателитна телевизионна програма, може да се обобщи, че за изследваните транспондери формат на модулация QPSK (DVB-S) качеството на телевизионната картина е отлично, независимо, че за транспондерът с честота 11137 MHz се получава по-ниска стойност на postBER.

Изследваните транспондери с формат на модулация 8-PSK не позволяват приемането на качествено телевизионно изображение като най-добри резултати за preBER и CNR са отчетени за посочения транспондер с честота 10757 MHz.

ГЛАВА IV. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА КОМУНИКАЦИОННИЯ КАНАЛ ЗА ВРЪЗКА „ИЗКУСТВЕН СПЪТНИК – ЗЕМЯ“

4.1. Особенности на комуникационния канал за връзка „изкуствен спътник – земя“

Спътниковите системи разполагат с ограничена излъчвана мощност на борда на спътника. Радиосигналите, използвани при комуникация са подложени на затихване, породено от редица специфични фактори. По тези причини е необходимо използването на най-ефективните шумоустойчиви методи за модулация и кодиране.

От особено значение за комуникационния канал Спътник – Земя е енергийният бюджет. Както подсказва името, енергийният бюджет е мярка на колко енергия е налична в сравнение с това колко енергия е нужна отчитайки влиянието на даден шум – това е една от

най-важните мерки, които трябва да се определят и в много случаи определя какви антени трябва да се използват, честоти, мощност и схема на модулация [A1].

4.1.3. Пропускателна способност на канала за връзка „Изкуствен спътник – Земя“

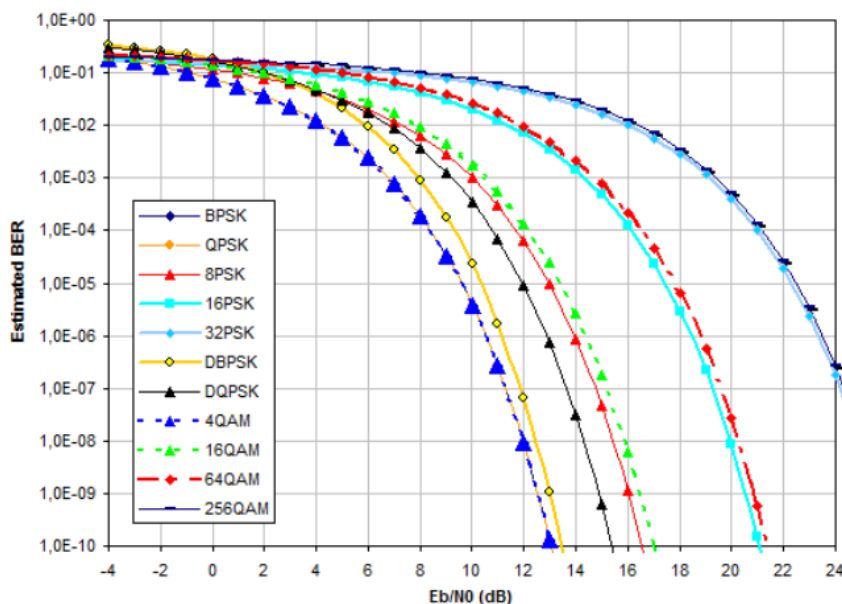
Едно от най-важните величини, които квалифицира шума в канала, е съотношението сигнал / шум (или съотношението на носещата на сигнала към шума за цифровите модуляции, които разглеждаме). В зависимост от ситуацията ще обозначим тази безразмерна стойност като S/N или C/N съответно. Това количество е важно за следната теорема: Като се има предвид канал с широчина на честотната лента B , подложен на Гаусов бял шум със съотношение сигнал/шум S/N, най-високата възможна скорост за предаване на информация с допустимо ниска степен на грешка се дава от:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (4.19)$$

Това е известно като теоремата на Шенон - Хартли и е специален случай на теоремата за кодиране на зашумен канал, свързана с аналогов канал, подложен на Гаусов шум. C е капацитетът на канала. Ние ще използваме теоремата, за да оценим грешките в канала за връзка и да дефинираме няколко важни величини за него [92]. Теоремата на Шенон може да бъде преобразувана до:

$$\frac{E_b}{N_0} = \left(\frac{S}{N} \right) \frac{B}{R} \quad (4.20)$$

Фигурата по-долу дава някои зависимости между BER и E_b/N_0 за различни модуляции. Връзката между двете се дава от функцията за грешка (erfc) с коефициент, в зависимост от схемата на модулация:



Фиг. 4.1. BER = $f(E_b/N_0)$ за различни формати на модулация

4.2. Изследване на комуникационен канал за връзка с изкуствен спътник тип „кюбсат“

4.2.1. Синтезиране на схема на опитната постановка

Изследването и анализа на комуникационен канал за връзка с изкуствен нано-спътник тип Кюбсат се реализира чрез използване платформа за обучение [A1], състояща се от:

- хардуерни приемо-предавателни модули,
- модул “Free Space Module” имитатор на спътников комуникационен канал,
- софтуерен инструмент InnoSpaceComm.

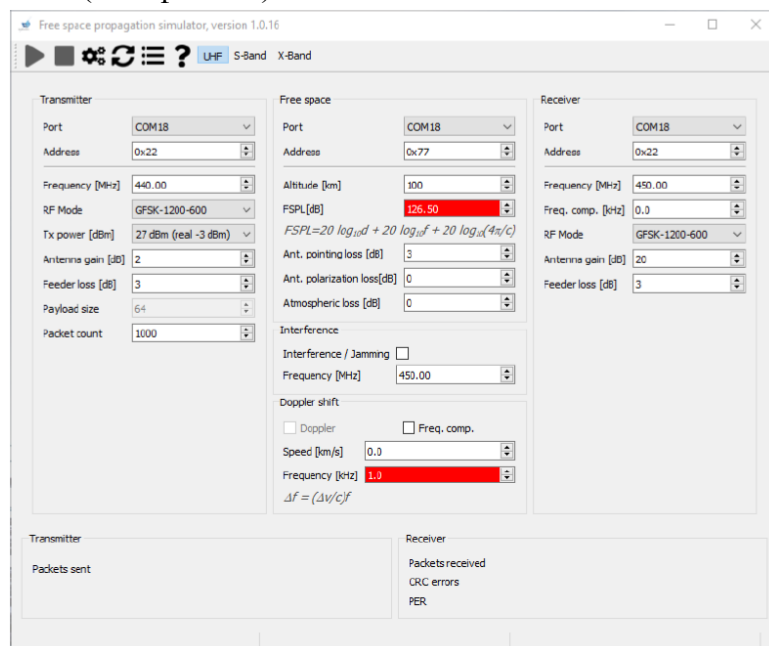
Свързването на хардуерните приемо-предавателни модули с модула “Free Space Module” имитатор на спътников комуникационен канал е показано на фиг. 4.3.



Фиг. 4.3. Схема на свързване на EnduroSat сателитна комуникационна система за обучение

Образователната комуникационна система на EnduroSat е част от проекта InnoSpaceComm и предоставя възможност за придобиване на практически опит със сателитна комуникационна система. Той работи в честотните диапазони UHF, S и X и симулира сценарии за комуникация в реалния свят. Системата се състои от два идентични UHF приемо-предавателя и един симулатор за разпространение на свободно пространство (FSPS), който симулира промените в радиосигнала, докато преминава пространството между Земята и целевия сателит. Системата се управлява чрез програма с графичен потребителски интерфейс (GUI), която контролира всичките три хардуера чрез стандартни мини-USB връзки (виртуални COM портове) и е лесно достъпна за Windows 10

За стартиране на графичния потребителски интерфейс, се избира двукратно върху създадената икона на работния плот – Free Space Propagation Simulator. Стартирането на приложението зарежда основния прозорец. Той се попълва с различни опции по отношение на характеристиките на предавателя, „свободното пространство“ и приемника, които разделени в три колони (виж фиг. 4.9).



Фиг. 4.9. Главен прозорец на FSPS GUI софтуер с трите полета за настройка (Transmitter, Free space и Receiver)

След като хардуерните модули са свързани към компютъра, те ще се появят на различни COM портове. Скоростта на предаване не е регулируем параметър и е необходимо да се зададе 115200 бода. За да се улесни диференциацията между модулите, всеки има уникален идентификатор (Адрес), който съдържа стойност в шестнадесетичен формат. Адресът по подразбиране е:

- 0x22 - обикновено това е предаването на UHF
- 0x23 - обикновено това е приемащият UHF
- 0x77 - това е модулът FSPS

Също така е валидно да се използва UHF с адрес 0x23 като предавателен модул и UHF с адрес 0x22 като приемащ модул. Важното е, че UHF модулът, физически свързан с TX входа на FSPS модула, трябва да се използва като предавател, а този, свързан с RX входа на FSPS модула, трябва да се използва като приемник.

Ако комбинацията от COM порт и Адрес е неправилна, програмата ще съобщи, че комбинацията е неправилна. Съобщението ще се появи в долния колонтитул на основния програмен прозорец и ще бъде оцветено в червено.

Обикновено свързването на модулите един по един е добър начин да се свърже устройството с COM порта. След като това е направено, всичко, което остава, е да се изчисли стойността на загубата на свободен път (FSPL). Ако е въведена правилна стойност за FSPL, тогава полето в средната колона, обозначено с FSPL [60] (виж фиг. 4.9), ще загуби червения си цвят и симулацията може да бъде стартирана.

Ако COM портовете и модулите са правилно съгласувани, тогава пакетите ще бъдат предадени и пакетите могат да бъдат получени (виж фиг. 4.10). Това зависи от стойностите, въведени в различните конфигурационни полета.



Фиг. 4.10. Статистика в реално време за изпълнението на симулацията (изпратени и получени пакети и коефициент на пакетна грешка PER)

4.3. Симуляционно изследване на комуникационен канал за връзка Кюбсат – Земя.

4.3.1. Изследване при предаване в UHF честотен диапазон

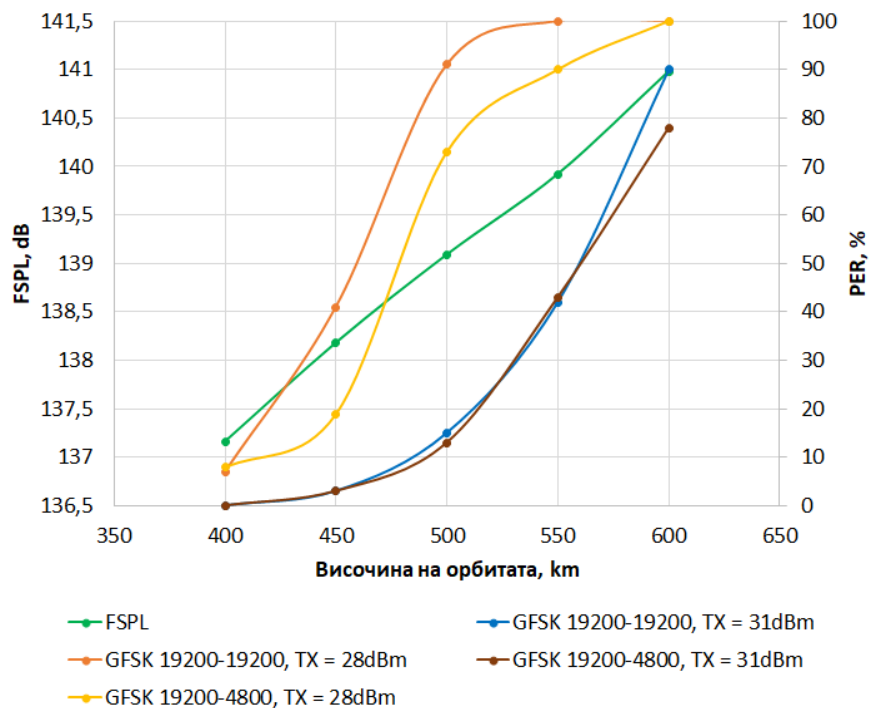
За целите на първото изследване, при предаване в UHF честотния диапазон, са избрани следните параметри:

- Работна честота 430 MHz;
- Модулация и скорост на предаване: GFSK 19200-19200 и GFSK 19200-4800;
- Мощност на предавателя: 31 dBm и 28 dBm;
- Коефициент на усилване на антената на предавателя: 2dB;

- Загуби във фидера в предавателя: 3dB;
- Височина на орбитата: 100 до 600 km;
- Загуби от насочването на антената: 3dB
- Загуби от поляризацията: 3dB
- Загуби в атмосферата: 1dB
- Коефициент на усилване на антената на приемника: 20dB;
- Загуби във фидера в приемника: 3dB.

Табл. 4.7. Предаване в UHF честотен диапазон при различна височина на сателита, параметри на GFSK модулацията и мощност на предавателя

Височина на орбитата, km	400	450	500	550	600
FSPL, dB	137,16	138,18	139,09	139,92	140,98
PER при GFSK 19200-19200, TX = 31dBm	0	3	15	42	90
PER при GFSK 19200-19200, TX = 28dBm	7	41	91	100	100
PER при GFSK 19200-4800, TX = 31dBm	0	3	13	43	78
PER при GFSK 19200-4800, TX = 28dBm	8	19	73	90	100



Фиг. 4.12. PER и FSPL във функция от височината на орбитата при различни параметри на GFSK модулацията и мощност на предавателя

При това изследване се извършва оценка на комуникационния канал на база получения коефициент на пакетна грешка PER в % за различни височини на орбитата на Кюбсат, както и при различни параметри на GFSK модулацията и мощност на предавателя. Резултатите от изследването са представени в таблица 3.7 и фиг. 3.10.

4.3.2. Изследване при предаване в S честотен диапазон

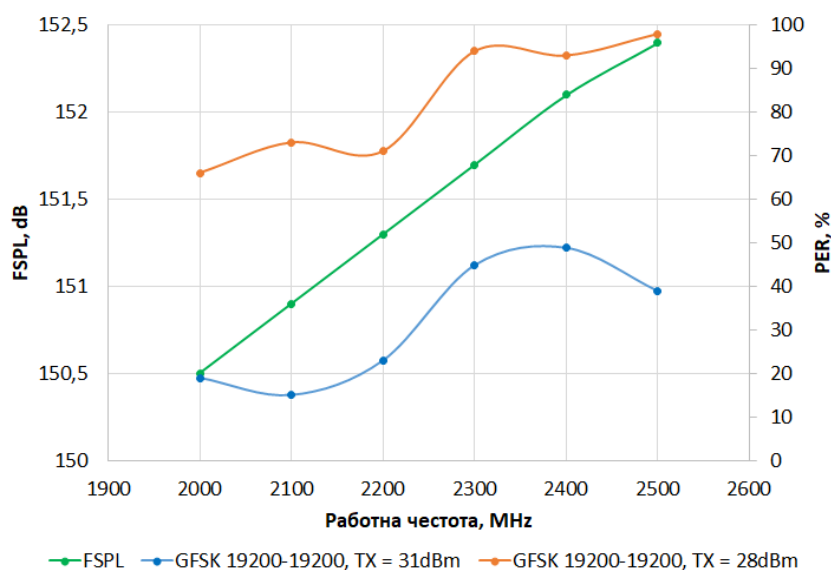
За целите на второто изследване, при предаване в S честотен диапазон са избрани следните параметри:

- Работна честота: 2000 до 2500 MHz;
- Модулация и скорост на предаване: GFSK 19200-19200;
- Мощност на предавателя: 31 dBm и 28 dBm;
- Коефициент на усилване на антената на предавателя: 5dB;
- Загуби във фидера в предавателя: 3dB;
- Височина на орбитата: 400 km;
- Загуби от насочването на антената: 3dB
- Загуби от поляризацията: 3dB
- Загуби в атмосферата: 1dB
- Коефициент на усилване на антената на приемника: 30dB;
- Загуби във фидера в приемника: 3dB.

При това изследване се извършва оценка на комуникационния канал на база получения коефициент на пакетна грешка PER в % за различни работни честоти в S честотния диапазон при фиксирана височина на орбитата на Кюбсат, както и фиксирани параметри на GFSK модулацията, но при различна мощност на предавателя. Резултатите от изследването са представени в таблица 4.8 и фиг. 4.13.

Таблица 4.8. Предаване в S честотен диапазон при фиксирана височина на орбитата на сателита и GFSK модулацията при различна мощност на предавателя

Работна честота, MHz	2000	2100	2200	2300	2400	2500
FSPL, dB	150,5	150,9	151,3	151,7	152,1	152,4
PER при GFSK 19200-19200, TX = 31dBm	19	15	23	45	49	39
PER при GFSK 19200-19200, TX = 28dBm	66	73	71	94	93	98



Фиг. 4.13. PER и FSPL във функция от работната честота в S диапазона при различна мощност на предавателя

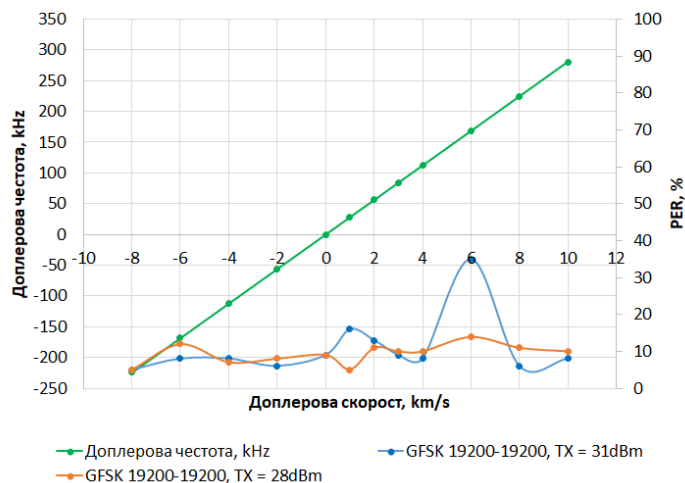
4.3.3. Изследване при предаване в X честотен диапазон

За целите на това трето изследване при предаване в X честотен диапазон са избрани следните параметри:

- Работна честота: 8400 MHz;
- Модулация и скорост на предаване: GFSK 19200-19200;
- Мощност на предавателя: 31 dBm;
- Коефициент на усилване на антената на предавателя: 5dB;
- Загуби във фидера в предавателя: 3dB;
- Височина на орбитата: 200 km;
- Загуби от насочването на антената: 3dB
- Загуби от поляризацията: 3dB
- Загуби в атмосферата: 1dB
- Коефициент на усилване на антената на приемника: 40dB;
- Загуби във фидера в приемника: 3dB.
- Скорост за оценка на Доплеровото отместване: -8 km/s до $+10 \text{ km/s}$ (приближаване и отдалечаване на спътника).

Таблица 4.9. Предаване в X честотен диапазон при фиксирана височина на орбитата на сателита и GFSK модулацията при различна Доплерова скорост и различна мощност на предавателя

Доплерова скорост, km/s	-8	-6	-4	-2	0	1
Доплерова честота, dB	-224	-168	-112	-56	0	28
PER при GFSK 19200-19200, TX = 31dBm	5	8	8	6	9	16
PER при GFSK 19200-19200, TX = 28dBm	5	12	7	8	9	5
Доплерова скорост, km/s	2	3	4	6	8	10
Доплерова честота, dB	56	84	112	168	224	280
PER при GFSK 19200-19200, TX = 31dBm	13	9	8	35	6	8
PER при GFSK 19200-19200, TX = 28dBm	11	10	10	14	11	10



Фиг. 4.14. PER и Доплерова честота във функция от Доплеровата скорост в X диапазона при различна мощност на предавателя

При това изследване се извършва оценка на комуникационния канал на база получения коефициент на пакетна грешка PER в % за различни стойности на Доплеровата скорост и честота в X честотния диапазон при фиксирана височина на орбитата на Кюбсат, както и фиксирани параметри на GFSK модулацията, но при различна мощност на предавателя. Резултатите от изследването са представени в табл. 4.9 и фиг. 4.14.

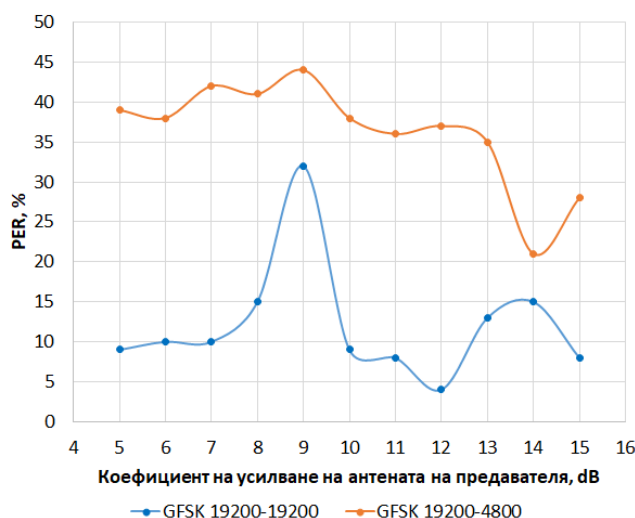
За целите на това последно четвърто изследване при предаване в X честотния диапазон са избрани следните параметри:

- Работна честота: 8400 MHz;
- Модулация и скорост на предаване: GFSK 19200-19200 и GFSK 19200-4800;
- Мощност на предавателя: 28 dBm;
- Коефициент на усилване на антената на предавателя: от 5dB до 15dB;
- Загуби във фидера в предавателя: 3dB;
- Височина на орбитата: 200 km;
- Загуби от насочването на антената: 3dB
- Загуби от поляризацията: 3dB
- Загуби в атмосферата: 1dB
- Коефициент на усилване на антената на приемника: 40dB;
- Загуби във фидера в приемника: 3dB.

Таблица 4.10. Предаване в X честотен диапазон при променлив коефициент на усилване на антената на предавателя и параметри на GFSK модулацията

Коефициент на усилване на антената на предавателя, dB	5	6	7	8	9	10
PER при GFSK 19200-19200	9	10	10	15	32	9
PER при GFSK 19200-4800	39	38	42	41	44	38

Коефициент на усилване на антената на предавателя, dB	11	12	13	14	15
PER при GFSK 19200-19200	8	4	13	15	8
PER при GFSK 19200-4800	36	37	35	21	28



Фиг. 4.15. PER във функция от коефициента на усилване на антената на предавателя в X диапазона при различни параметри на GFSK модулацията

При това последно изследване се извършва оценка на комуникационния канал на база получения коефициент на пакетна грешка PER в % за различни стойности на коефициента на усилване на антената на предавателя в X честотния диапазон при фиксирана височина на орбитата на Кюбсат, но при различни параметри на GFSK модулацията. Резултатите от изследването са представени в табл. 4.10 и фиг. 4.15.

4.4. Изводи към четвърта глава

На базата на разгледаната платформа са реализирани четири изследвания, които показват комплексното влияние на всички параметри върху качеството на канала за връзка: височина на орбитата, мощност на предавателя, избор на формат на модулация, коефициенти на предаване и др.

В резултат на проведения изследвания може да се обобщят следните по-важни изводи:

- Кюб-сателитите са много по-бързи и по-лесни за изграждане. Те заемат по-малко място и са значително по-леки от традиционните спътници. Те също струват много по-малко, за да се изстрелят, което означава, че те могат да бъдат част от по-голям брой мисии и да бъдат изстрелвани в рояци;

- Кюб-сателитите осигуряват възможност за бърз и лесно заснемане на земната повърхнина, евтино провеждане на биологични експерименти, автоматизирано събиране на данни, ранно предупреждение за събития и др. приложения, които значително ускоряват научните и приложни задачи, свързани с космическите технологии;

- Платформата е изключително подходяща за обучение на студенти и докторанти в космическите комуникационни технологии;

- Независимо, че са ограничени от към ресурс, те позволяват решаването на конкретни задачи, които биха изисквали много повече време.

ГЛАВА V. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА СПЪТНИКОВА КОМУНИКАЦИОННА СИСТЕМА ЗА ПРЕНОС НА ДАННИ ПРИ ЕФЕКТИВНИ МЕТОДИ ЗА МОДУЛАЦИЯ

5.1. Анализ на производителността на сателитна комуникационна система за пренос на данни.

В бъдещите комуникационни мрежи непрекъснато ще расте необходимостта да се осигурява по-голям капацитет, за да се задоволи нарастващият трафик, изискван от потребителите, както и новите приложения с качество на услугата (QoS) [A3, 93, 100]. Мрежовите оператори се сблъскат със сериозни предизвикателства при предоставянето на Интернет услуги за потребители в селски или други трудно обслужвани райони, с гарантиране на QoS [93]. Възможно решение на това предизвикателство е използването на сателитна комуникационна мрежа. Широколентовите сателитни мрежи играят основна роля в цялостната комуникация поради широкото им покритие и надеждни връзки [100]. Те са рентабилно решение за предоставяне на комуникационни услуги в много трудни за обслужване райони. През последните години, благодарение на напредналите технологии в бордовата обработка, динамичното разпределение на ресурсите, технологията на остро насочено излъчване и използването на СВЧ и УВЧ радиочестотни системи с висока пропускателна способност (HTS – High Throughput Satellite), спътниците на геостационарна орбита (GEO – Geostationary Orbit) с мрежови връзки успешно може да се използват за гръбначна мрежа за достъп до Интернет. HTS системите от следващо поколение са насочени към общ капацитет от терабит за секунда. Очаква се тези системи да отговорят на нарастващото търсене на Интернет услуги за „Интернет на нещата“ (IoT), като дистанционно

управление, телеметрия и наблюдение на сензорни данни. Освен това те ще може да поддържат пренос на мултимедия, управление на безпилотни самолетни системи и спешни услуги за данни TDMA.

За да се предоставят Интернет услуги с поддръжка на QoS чрез сателитни мрежи, е необходимо да се оцени ефективността на мрежовото ниво на сателитната мрежа. От решаващо значение е да се оцени практическата производителност на мрежата. В този доклад се разглежда сателитна мрежа с многочестотен множествен достъп с разделяне по време MF-TDMA (Multi-Frequency Time Division Multiple Access) с меш-топология [100]. Също така се разглежда дизайна на цялостна сателитна мрежа, за предоставяне на Интернет услуги с поддръжка на QoS. При анализа се разглеждат два вида услуги: толерантни към забавяне и чувствителни към забавяне услуги. Дефинират се показателите за производителност в приложния слой и се оценява производителността на мрежата за различни среди, типове услуги и брой на потребителите, с цел извличане на основните фактори, които да бъдат взети предвид в политиката за QoS.

5.1.1. Архитектура на сателитната мрежа

За да се оцени сателитна мрежа, гарантираща QoS, е необходимо да се анализира каналния и мрежовия слоеве [21,93,100].

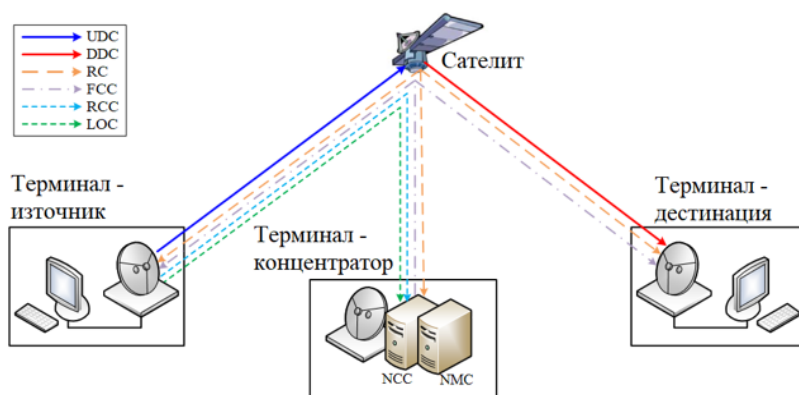
При анализа на производителността на мрежата трябва да се отбележат следните допускания по отношение на модела на архитектура на мрежата:

1. Сателитната мрежа е базирана на DVB-RCS и включва GEO сателит, терминал-концентратор с център за управление на мрежата (NCC – Network Control Center) и център за управление на мрежата (NMC – Network Management Center) и потребителски терминали (UTs – User Terminals), както е показано на фиг. 1.

2. В каналния слой схемата за разпределение на ресурсите е многократен достъп по заявка (DAMA – Demand Assigned Multiple Acces) с MF-TDMA технология [21,93,100].

3. Сателитния ъплинк канал за данни (UDC – Uplink Data Channel) се превключва към даунлинк канала за данни (DDC – Downlink Data Channel). По този начин се осигурява меш-връзка към сателитните терминали (фиг. 1).

4. За управление на мрежата има прав канал за контрол (FCC – Forward Control Channel), обратен канал за контрол (RCC – Return Control Channel) и канал за вход (LOC – Log-on Channel). FCC се използва за излъчване на контролни съобщения от терминала на концентратора с NCC и NMC към UT. RCC и LOC се използват за предаване на контролни съобщения от UT към терминала на концентратора. За синхронизирането на MF-TDMA във всички UT и терминали на концентратора се използва канал за обхват (RC – Ranging Channel) за коригиране на синхронизацията по време и честота.



Фиг. 5.1. Модел на сателитната комуникационна система за пренос на данни

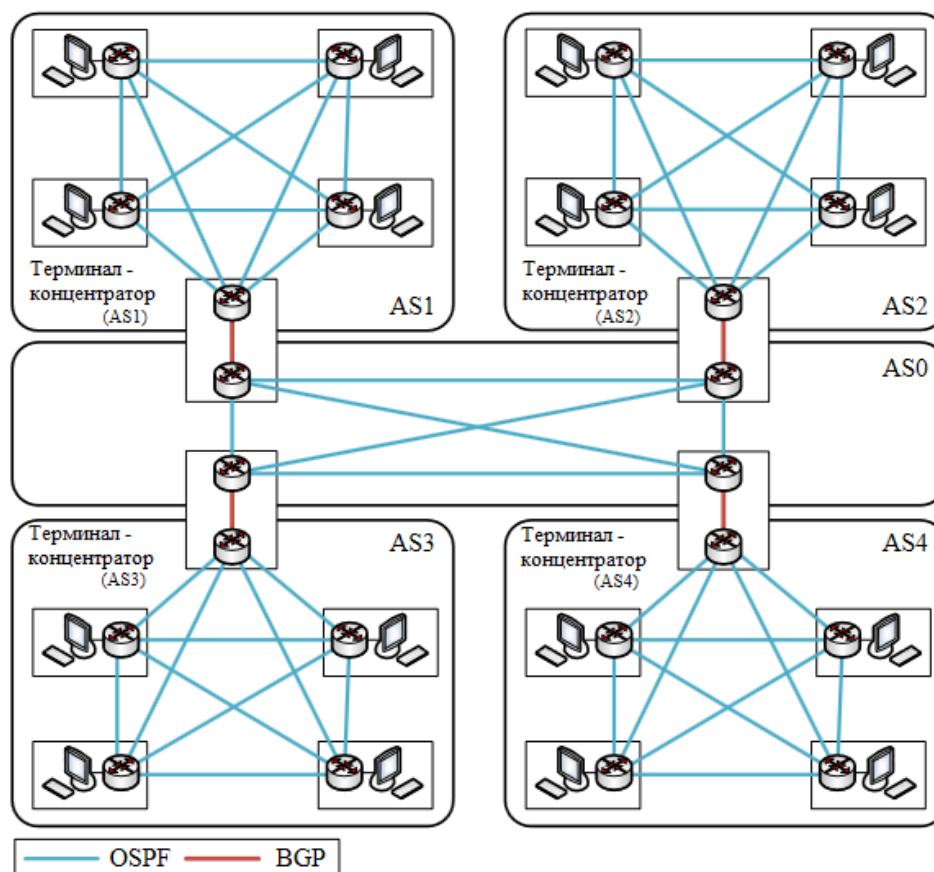
5.1.3. Архитектура на мрежовия слой

Архитектурата на мрежовия слой е показана на фиг. 5.2.

Сателитната мрежа може да бъде разделена на отделни суб-автономни системи (AS – Autonomous System) от всеки доставчик на услуги или всеки лъч. Ако всички UT споделят информация за маршрутизацията помежду си, ще се консумира голям ресурс за нейното споделяне [8]. По този начин в същата AS се използва схема за маршрутизиране по OSPF протокол (Open Shortest Path First), а между отделните AS се използва BGP протокол (Border Gateway Protocol) – фиг. 5.2 [53].

5.1.4. Поддръжка на QoS

За да се предоставят Интернет услуги с поддръжка на QoS, класът QoS трябва да бъде дефиниран за тях. След това приоритетът и характеристиката на услугите трябва да бъдат отразени в планирането и разпределението на ресурсите в каналния и мрежовия слой. Например ресурсът за чувствителни към закъснение услуги като VoIP и услугите за видеострийминг трябва да бъдат разпределени от CRA и RBDC с минимизиране на закъснението [6,7]. NMS управлява QoS класа и QoS политиката като приоритет на услугата, максимална скорост на предаване на данни и др. Тази информация се препраща към NCC и UT. В NCC и UT тази информация се използва в DAMA контролера, DAMA агента и планиращите програми [5,21,93]. Скоростта на предаване на данни в UT е ограничена, за да се предотврати задръстванията на трафика и зависи от вида на терминала. Максималната скорост на предаване на данни ще зависи и от максималната еквивалентна изотропно излъчена мощност (EIRP).



Фиг. 5.2. Модел на мрежовия слой на сателитната комуникационна система

5.1.5. Резултати от анализа на производителността

При анализа и оценката на производителността се използва MATLAB базиран симулационен модел с входни параметри, представени в таблица 1. Общата честотна лента и контролният канал са съответно 10 MHz и 3 MHz. По този начин наличната честотна лента за предаване на трафика на услугата може да бъде изчислена като:

$$B_A = (B_T - B_C) \cdot (1 - R_G) \cdot R_P, \quad (5.1)$$

където V_T и V_C съответно са общата честотна лента и честотната лента, които трябва да бъдат разпределена за предаване на контролната информация, R_G е съотношението на защитната лента. R_P е коефициентът на MF-TDMA пакетиране. По този начин, наличната честотна лента е 6,044 MHz. Напр., ако спектралната ефективност се приема за 1 bps/Hz, максималният капацитет на предаване е 6,044 Mbps в симулацията.

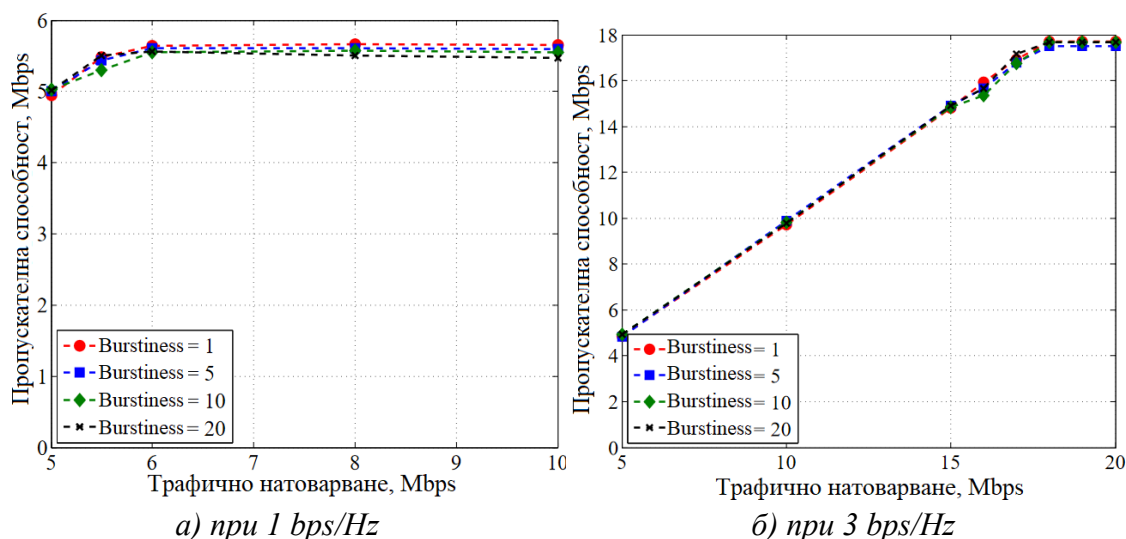
Таблица 5.1 Параметри на симулацията

Параметър	Стойност
Обща честотна лента	10 MHz
Защитна честотна лента	10%
Контролен канал	3 MHz
Коефициент на MF-TDMA пакетиране	0,95
Дължина на рамката	0,5 s
Закъснение при разпределение на ресурсите	4 рамки
Времезакъснение при разпространение в сат. канал	125 ms
Максимална скорост на данните	45 Mbps
Брой потребителски терминали (UTs)	50 – 150
Спектрална ефективност	1, 3 bps/Hz
Брой обслужващи потоци	50 – 150
Средна скорост на предаване на всеки поток	33 – 440 kbps
Средна големина на данните (в приложния слой)	2 – 500 KB
Средно време на пристигане	0,5 – 10 s

5.1.5.1. Оценка на производителността за услуги, толерантни към забавяне

В сценарий 1 се изследва ефективността за услуги, устойчиви на забавяне, в зависимост от трафичното натоварване. При разпределението на ресурсите се използва коефициент на пакетно излъчване (burstiness) от 1 до 20 в зависимост от приетия класификатор за тип трафик за различните услуги. При разпределението на ресурсите е използван VBDC. Ограничението от забавянето е от 3–10 s, като се вземе предвид забавянето при разпределението на ресурсите. Фиг. 5.3 показва пропускателната способност във функция от трафичното натоварване за спектралната ефективност от 1 и 3 bps/Hz.

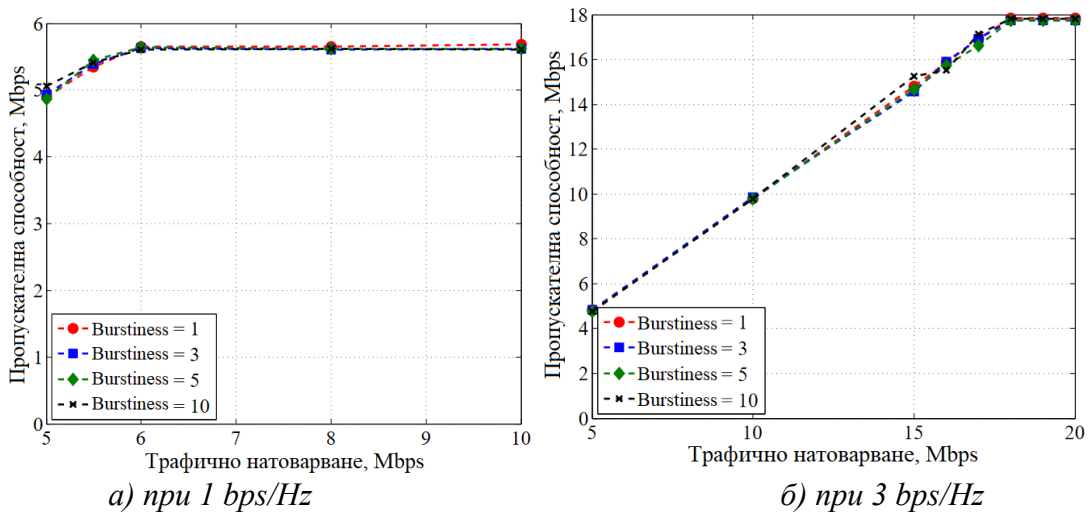
На фиг. 5.3 коефициент на пакетно излъчване не влияе силно на производителността. Когато трафичното натоварване е по-голямо от максималния капацитет на предаване, стойностите на пропускателната способност за спектралната ефективност от 1 и 3 bps/Hz се приближават съответно до 5,5 Mbps, 12 Mbps и 18 Mbps.



Фиг. 5.3. Пропускателна способност на мрежата в зависимост от трафичното натоварване при VBDC за услуги, толерантни към времезакъснения

5.1.5.2. Оценка на производителността за услуги, чувствителни към забавяне

В сценарий 2 се определя ефективността на чувствителната към забавяне услуга в зависимост от трафичното натоварване.



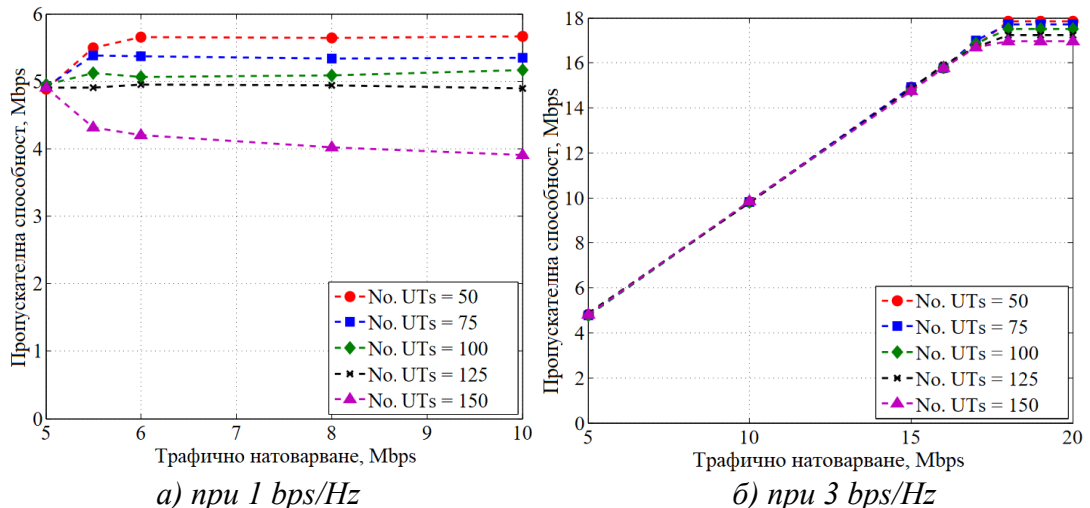
Фиг. 5.4. Пропускателна способност на мрежата в зависимост от трафичното натоварване при VBDC за услуги, толерантна към времезакъснения

При разпределението на ресурсите е приложен RBDC, за да се елиминира забавянето при разпределението на ресурсите. Зададено е тясно ограничение на забавянето от 1–4 s за сравнение със сценарий 1 и VBDC. Тъй като RBDC обикновено се прилага за разпределяне на ресурси на приложения, като VoIP и услуги за поточно видео, коефициентът на пакетиране е 1–10, което е по-малко от това в сценарий 1.

Фиг. 5.4 показва пропускателната способност във функция от трафичното натоварване натоварването за спектралната ефективност от 1 и 3 bps/Hz. Когато трафичното натоварване е по-голямо от max. капацитет на предаване, стойностите за пропускателната способност се сближават с резултатите от сценарий 1.

5.1.5.3. Оценка на производителността спрямо броя потребители

В сценарий 3 се анализира ефективността на QoS според трафичното натоварване и броя на UTs в сателитната мрежа. При разпределението на ресурсите е приложен VBDC. В този сценарий общото трафично натоварване е постоянно и скоростта на предаване на данни за всеки UT е общото трафично натоварване, разделено на броя на UTs. По този начин размерът на данните, които трябва да бъдат предадени във всяка ST, намалява с увеличаване на броя на UTs.



Фиг. 5.5. Пропускателна способност на мрежата в зависимост от трафичното натоварване при VBDC и различен брой потребителски терминали (UTs)

Фиг. 5.5 показва зависимостта на пропускателната способност във функция от трафичното натоварване за спектралната ефективност от 1 и 3 bps/Hz. Вижда се, че максималната производителност леко намаля с увеличаване на броя на UTs. За спектралната ефективност от 3 bps/Hz, максималната пропускателна способност за 50 UTs, 75 UTs, 100 UTs, 125 UTs и 150 UTs е съответно около 18 Mbps, 17.87 Mbps, 17.68 Mbps, 17.41 Mbps и 17.13 Mbps за един потребител. При предаването на данни с малък размер, вероятността времевият интервал на MF-TDMA да не е бил напълно запълнен, се увеличава, което води до леко намаляване на максималната производителност.

5.2. Изследване и анализ на ефективността на поляризационна модулация в системите за сателитни комуникации

С развитието на сателитните комуникации броят на сателитите се увеличава драстично и се приема по-висока честота, за да се отговори на смекчаването на смущения [A4, 2]. С увеличаване на честотата на носещия сигнал сложността на синхронизацията се увеличава и времето за синхронизация става все по-дълго. Трудно е да се установи точна синхронизация на носещата честота при демодулация в случай, например, на високочестотна теснолентова или високодинамична сателитна комуникация. Съвременното приложение прилага диференциална фазова модулация (DPSK) и некохерентна демодулация, за да отговори на не-точните условия за синхронизация на носещата честота за комуникационни нужди.

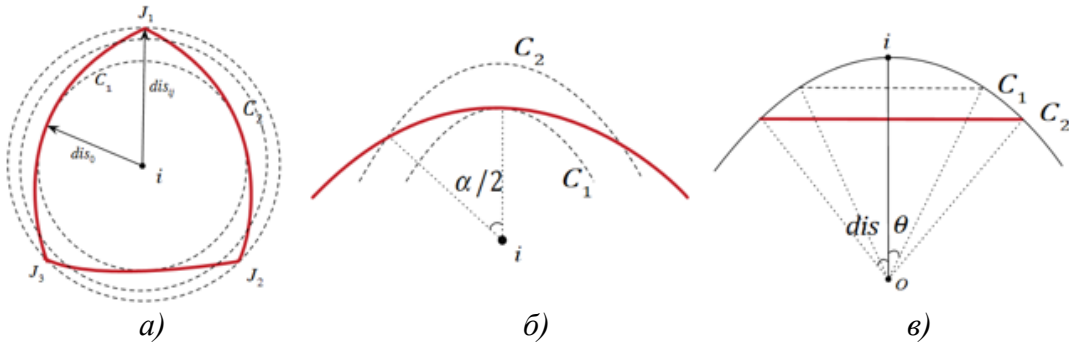
На използването на поляризационни характеристики се придава голямо значение и се използва широко в радарите, оптичните влакна и сателитната комуникация [6]. Например в конвенционалната сателитна комуникация използването на двойната поляризационна честота (DPFR – Dual Polarization Frequency Reuse) удвоява коефициента на честотния капацитет. При комуникацията с оптични влакна различните поляризационни състояния на светлината се използват за пренасяне на информация, която е PolSK модулирана (Polarization Shift Keying). С развитието на теорията на поляризацията се мотивира прилагането на поляризационните състояния да пренасят информация, което определя т.нар. поляризационна модулация (PM – Polarization Modulation). Например, в [121] се предлага модулация PAM (Polarization Amplitude Modulation), която комбинира поляризационна модулация с традиционна модулация за подобряване на енергийната ефективност на системата. В [77] се предлага метод на непрекъсната поляризационна модулация за подобряване на спектралната ефективност.

В областта на сателитните комуникации изследването на поляризационната свойства далеч не е достатъчно. Сателитните антенни системи стават остро насочени, силно гъвкави и имат много добри възможности за идентификация на поляризация. С развитието на високопроизводителните процесор за цифрова обработка на сигнали, вграденият капацитет за обработка става постепенно по-голям, което предоставя основата за прилагане на поляризационна модулация върху сателит. Представено въведение в поляризационните модуляции за сателитни комуникации, дизайна на приемо-предаватели и анализа при прилагане за сателитната комуникация. Определя се коефициента на символна грешка (SER – Symbol Error Rate) на символа при използване на PM, чрез извършване на Монте Карло симулацията.

Има голяма разлика между сателитните и наземните безжични комуникации. Основните характеристики на сателитния канал за връзка са AWGN канал, голямо времезакъснение, ограничения в мощността и честотната лента.

5.2.5. PM производителност на AWGN канал

В AWGN канала шумът води до изместване на състоянието на поляризация в сферата на Поанкаре. Следователно сферата на Поанкаре е разделена на няколко региона за вземане на решения за точките от съзвездието. Регионът за вземане на решение в определена точка в 8PM системата е показан на фиг. 5.12.



Фиг. 5.12. Една зона за решение за точка от 8PM съзвездие: а) изглед отпред, б) увеличение на изгледа отпред, в) напречно сечение на сферата

На фиг. 5.12 dis_{ij} е половината от съседните точки на съзвездието и означава i -тата точка на съзвездието и нейната зона за вземане на решение спрямо j -та крайна точка, и $\alpha(dis, \theta) = 2\arccos(\tan dis / \tan \theta)$.

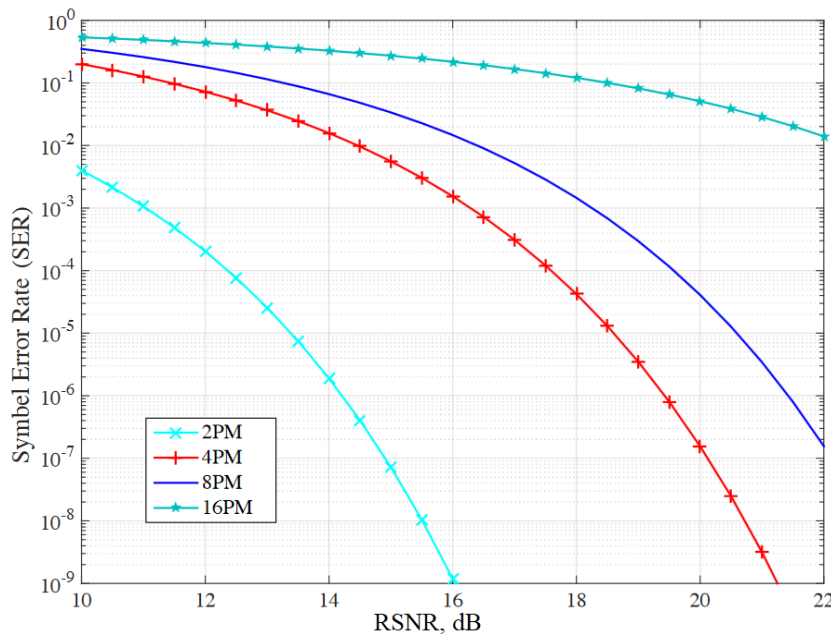
Съотношението сигнал/шум на приетия сигнал (RSNR) се определя като $RSNR = P/\sigma^2$, където P е получената мощност, а σ^2 е мощността на шума. Тогава съвместното разпределение на получения сигнал в сферата на Поанкаре се изразява като [2]:

$$f(\theta_i, \varphi_i) = \frac{\sin \theta_i}{4\pi} e^{-\frac{RSNR}{2}(1-\cos \theta_i)} \left[1 + \frac{RSNR}{2}(1 + \cos \theta_i) \right] \quad (5.5)$$

където $\theta_i = \pi/2 - 2\varepsilon_i$, $\varphi_i = \pi/2 - 2\tau_i$. Коефициентът на символна грешка (SER) на M -кратна PM може да се определи като $SER = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_e^i$ в AWGN канал, където P_e^i е SER функцията на всяка точка от съзвездието и изразява като (4).

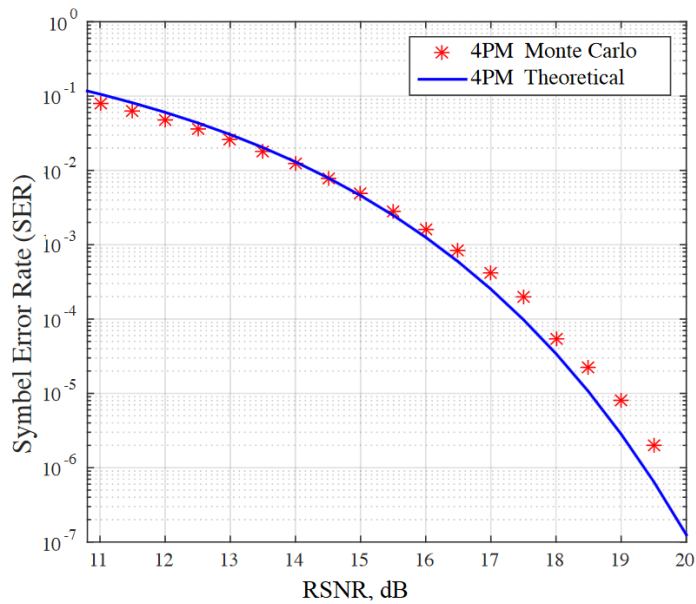
5.2.6. Резултати от симулацията на PM сигнали

Теоретичните криви на SER за 2PM, 4PM, 8PM и 16PM модулация са представени на фиг. 5.13.



Фиг. 5.13. Теоретична стойност на SER за MPM модулация в AWGN канал за връзка

Монте Карло симулацията на 4PM модулация се извършва при условия на AWGN канал, дължина на последователността 1000000 и 2-битово картиране за символ. RSNR варира от 10 dB до 20 dB в AWGN канал и приемникът използва MLD. Резултатите от това изследване са показани на фиг. 5.14.

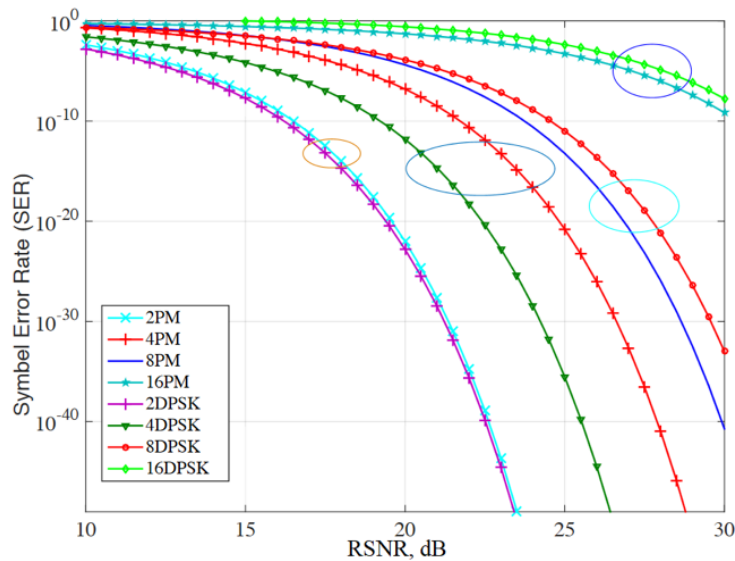


Фиг. 5.14. Теоретична стойност на SER за 4PM модулация и Монте Карло симулацията в AWGN канал при използване на MLD схема

Резултатите от симулацията са в съответствие с теоретичните за 4PM система в определен обхват на грешката. Грешката идва главно от сближаването на функцията на Бесел от първи ред в [3].

Получените вектори на Стокс g_{Ri} ($i = 1,2,3$) се изчисляват от амплитудата и относителната фаза на двата сигнала в PM комуникационната система и не е необходимо да се възстановяват точните честоти, тъй като сигналите преминават през филтър след честотно преобразуване. Това означава, че поляризационната модулация е подходяща за сценарии без възстановяване на носещата честота, като високочестотни теснолентови или високодинамични спътникови комуникационни системи, където преди е прилагано DPSK некохерентно демодулиране.

PM и DPSK некохерентната демодулация се сравнява по отношение на SER, като резултатите са показани на фиг. 5.15.



Фиг. 5.15. SER за MPM и MDPSK некохерентна демодулация, която не се нуждае от точна синхронизация

Вижда се, че SER за BPM и DBPSK са почти еднакви и QPM се нуждае от приблизително 3dB по-висока стойност на RSNR спрямо QDPSK при същата вероятност за

SER. Когато редът на модулация се увеличи, BER характеристиките за 8PM и 16PM са по-добри от тези съответно на 8DPSK и 16DPSK. Сигналят обаче трябва да премине през нелинеен усилвател с висока мощност (HPA) преди предаване в сателитната комуникационна система. Нелинейността на HPA ще генерира интермодулационни компоненти.

Интермодулационните смущаващи сигнали имат същото състояние на поляризация в PM системата и предадените сигнали са имунизирани срещу нелинейния ефект на усилвателя на мощност. В DPSK системите трябва да се настрои затихване (обикновено с 6dB за сателитен HPA), т.е. PM RSNR би бил по-висок от DPSK около 6dB в приемника за същата шумова среда. Имайки предвид обстоятелствата, производителността на всяка PM модулация е много по-добра от DPSK, така че PM е по-подходяща за не-точно възстановяване на носещата честота. В допълнение, φ_E се изчислява от двете ортогонални сигнални разлики в приемника, което прави PM модулация устойчива на фазов шум.

5.3. Изводи към глава пета

1. Разгледана и анализирана е сателитна мрежа за предоставяне на Интернет услуги с поддръжка на QoS. Представена е архитектурата на сателитната мрежа с MF-TDMA и поддръжка на QoS. Чрез оценката на ефективността е доказано, че факторите като трафичното натоварване и спектралната ефективност трябва да се вземат предвид в политиката на QoS за услуги, устойчиви на забавяне и чувствителни към забавяне в сателитната мрежа. Оценката на необходимия ресурс за предоставяне на QoS трябва да бъде взета предвид за услугата, използваща RBDC. Малкият размер на данните може да намали QoS производителността в сателитната мрежа. Изведените фактори трябва да бъдат разгледани в политиката за QoS и техниките за контрол оценка на необходимите ресурси с цел подобряване на QoS представянето в сателитните мрежи.

2. Представена и изследвана ефективността на схема за поляризационна модулация, за да се преодолее нелинейността на HPA и да се постигне по-добро представяне от DPSK некохерентната демодулация в случаи без възстановяване на носещата честота, като например високочестотна тяснолентова или високодинамична сателитна комуникация. SER коефициентът за поляризационната модулация се извежда и сравнява с Монте Карло симулация в спътников AWGN канал. PM е един от начините да се използва възможността двойният поляризационен канал, наличен в сателитните комуникации и кохерентните техники за модулация, които намаляват загубата на спектрална ефективност.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщени изводи

Търсенето и експериментирането на нови орбити и подобряване на кодирането на канала, използването на нови модулационни схеми и разширяване на честотния спектър водят до интересни резултати свързани с подобряване на ефективността и качеството на връзка. Избора на канален код с по-висока ефективност би позволило да се намали скоростта на използвания код и да се увеличи кратността на използваната модулация, като се запази вероятността за грешка. Това от своя страна води до увеличаване на пропускателната способност на канала. За да се получи максимална шумоустойчивост е необходимо след оптимизация на каналния код да се извърши и оптимизация на параметрите на модулационното съзвездие. Оптимизацията на модулационните съзвездия позволява да се постигне оптимален компромис между шумоустойчивостта на радиоканала, енергийната ефективност и устойчивостта на нелинейните изкривявания.

В дисертационния труд се разгледани възможности за комбиниране на разнородни статистически аналитични и софтуерни методи за анализ и обработка на данните, а средствата на информационно-комуникационните технологии се използват за осигуряване на

преноса на спътникови данни и измервателни постановки с мониторинг на параметрите на спътниковия канал. Представената тематика води до създаване на методологии от процедури, свързани с коректни подходи при мониторинг и контрол в комуникационните системи за спътниково цифрово разпръскване, чрез определяне на оптимални диапазони на изменение на конкретни технически параметри и критерии, свързани с ефективната експлоатация и настройка на спътниковите комуникационни канали

Публикации, свързани с дисертационния труд

По отношение на отразяване на резултатите по дисертационния труд са представени шест публикации на международни конференции и научни издания, напълно покриващи минималните изисквания относно разглеждания критерий. Три от трудовете са изнесени на Международна научна конференция „Унитех“ и три в национална конференция и „TechCo“, като един от тях е самостоятелен, а останалите пет са изготвени в съавторство с научния ръководител и авторски колектив. Публикациите са издадени в сборници с научно рецензиране от международна научна конференция „Унитех“ и национална конференция „TechCo“ в периода на обучение 2020-2022 г., като реално представят близо 2/3 от съдържанието на дисертационния труд.

IV. ПРИНОСИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научно-приложни приноси:

❖ Синтезирани са аналитични модели на комуникационния канал за връзка „изкуствен спътник – земя“, чрез които се извършва сравнителен анализ за определена на пропускателната способност на канала за връзка при различни теоретично приложими варианти на модулация на сигнала.

❖ Създадени са симулационни модели във виртуална среда Matlab/Simulink. Направени са изследвания за цялостна оценка на степента на влияние на отделните конфигурационни параметри и етапи на обработката на сигналите върху качеството на обслужване чрез оценка на коефициента на двоична грешка (BER), съотношението сигнал-шум (SNR) в канала за пренос и векторната диаграма на сигнала при сценарии с различни формати на модулация и мощност на предаване при стандарт DVB-S2. Направена е оценка на ефективността на BCH и LDPC кодирането на сигнала в спътников DVB-S2 канал за връзка. Установени са праговите нива на съотношението сигнал-шум (SNR) при различни комбинации на конфигурационните параметри на кодерите и респективно дълбочината на кодиране с цел осигуряване на квази-безгрешно приемане на сигнали за QPSK и 8-PSK формати на модулация.

❖ Разработен е симулационен модел на DVB-RCS спътникова комуникационна система за широколентов пренос на данни с многочестотен множествен достъп с разделяне по време MF-TDMA и меш-топология. Извършена е оценка на механизмите за непрекъснато разпределяне на ресурси, динамичен капацитет, базиран на скоростта, и динамичен капацитет, базиран на обема с цел ефективно използване на честотата и поддръжката на качеството на услугите. Направено е изследване и сравнителен анализ на производителността (по критерий пропускателна способност на мрежата) на DVB-RCS спътникова комуникационна система за широколентов пренос на данни при 3 различни сценария по отношение на доставяните услуги: за услуги, толерантни към забавяне; за услуги, чувствителни към забавяне; оценка на производителността спрямо броя потребители.

❖ Разработен и изследван е цялостен модел за анализ на ефективността от прилагането на поляризационна модулация с цел по-оптимално използване на наличните честотни ресурси и ускоряване на времето за синхронизация при високочестотна теснолентова или високодинамична сателитна комуникация. Проведени за изследвания за оценка на качеството на услугата чрез определяне на SER коефициентът и граничните му

стойности при различни формати на PM и DBPSK модулация и сравнителен анализ с Монте Карло симулация в спътников AWGN канал.

Приложни приноси:

❖ Проведени са практически експерименти и е предложен подход за оптимален избор на честотни параметри и оборудване за изграждане на система за спътникова комуникация и осигуряване на качествено транслиране на спътникови телевизионни програми.

❖ Разработена и изследвана е опитна постановка на комуникационен канал за връзка с изкуствен спътник тип „кюбсат“ с хардуерни приемо-предавателни модули и модул-имитатор на спътников комуникационен канал в лабораторни условия. Направено е изследване за оценка на пакетната грешка в комуникационен канал за връзка с изкуствен спътник тип „кюбсат“ и са представени графични зависимости даващи информация за търсене на оптимални решения при избора на работен честотен диапазон, височина и параметри на орбитата, мощността на предаване, параметри на приемо-предавателната антена, както и за оценка на влиянието на комплексната комбинация от тези параметри.

V. СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

- A1. Ангелов К., Мюмюнали С., Иванов Т., Садинов С., Анализ и изследване на комуникационния канал за връзка с изкуствени пико- и наносателити, Международна научна конференция UNITECH 2020, 20-21 ноември 2020, Габрово, Том I, стр. I-269-273, 2020, ISSN: 1313-230X.
- A2. Когиас П., Садинов С., Мюмюнали С., Маламатудис М., Христов Х., Изграждане и конфигуриране на система за мониторинг на телевизионни канали. Международна научна конференция UNITECH 2020, 20 ноември 2020, Габрово, Том 1, стр. I-292-297, 2020. ISSN: 1313-230X.
- A3. Мюмюнали С., Изследване и анализ на ефективността на поляризационна модулация в системите за сателитни комуникации, Национална научна конференция TechCo-2021, Ловеч, ISSN 2535-079X, стр. 77-82.
- A4. Мюмюнали С., Х. Христов, С. Садинов, Анализ на производителността на сателитна комуникационна система за пренос на данни, Национална научна конференция TechCo-2021, Ловеч, ISSN 2535-079X, стр. 83-89.
- A5. Когиас П., С. Садинов, С. Мюмюнали, А. Синдраковска, Б. Карапенов, Симулационни изследвания на сателитен цифров телевизионен сигнал по стандарт DVB-S2, Международна научна конференция UNITECH 2021, 19-20 ноември 2021, Габрово, Том I, стр. I-269-273, 2021, ISSN: 1313-230X.
- A6. Мюмюнали С., Х. Христов, М. Томов, К. Ангелов, Разработка и изследване на SDR-базиран честотен понижаващ преобразувател за сателитен приемник по стандарт DVB-S2, Сборник доклади от научна конференция TechCo- 2022, Ловеч, стр. 59 – 64, 2022, ISSN: 2535-079X.

TITLE: „RESEARCH AND IMPROVE THE QUALITY OF SERVICE IN SATELLITE COMMUNICATION CHANNELS“

Author: mag. eng. Seyhan Sadak Myumyunali

ABSTRACT:

The dissertation deals with simulation models for satellite communications are presented, research is carried out and contributions are defined related to the effective use of frequency spectrum, type of modulation and channel coding in order to obtain a higher quality of services on satellite communication channels. Test setups have been implemented and experiments have been made to evaluate the packet error in a communication channel for connection with an artificial satellite of the "cubesat" type, and graphical dependences have been presented, providing information for the search for optimal solutions in the selection of the operating frequency range, altitude and orbit parameters. the transmission power, parameters of the receiving-transmitting antenna, as well as to evaluate the influence of the complex combination of these parameters.

The processes related to the processing, transmission and reception of satellite communication signals in satellite transmitters and receivers are studied - modulation, channel coding, multiplexing, polarization characteristics of the signal, synchronization, configuration, adjustment and coordination of the transceiver equipment. As criteria for determining the quality of service, various evaluation parameters and quality indicators such as equivalent isotropic radiated power (EIRP), field strength, spectral and vector characteristics of the signal and the signal-to-noise ratio were used in criteria of maximum permissible values of the modulation coefficients (MER), binary (BER) and packet (PER) error, etc.

Keywords: Satellite communication, DVB-S/S2, QAM, PSK, QPSK, Polarization modulation (PM), MER, BER, SER, PER, EIRP, Pico- and Nanosatellite, CubeSat, Satellite communication channel, Satellite network, free space path loss, QoS, Simulation Matlab, SNR, BCH, LDPC.