

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва кафедри)

До захисту допущено

В.о. завідувача кафедри

_____ Валерій ЯВІСЯ

(підпис)

(Ім'я, прізвище)

“ 04 ” червня 2020 р.

Дипломна робота

на здобуття освітнього ступеня “бакалавр”

(назва ОС)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка,

(код і назва)

на тему: Дослідження параметрів сигналів багатопозиційної модуляції в стандарті DVB-S2 за допомогою технології SDR

Виконала: студентка 4 курсу, групи ТЗ-61

(шифр групи)

_____ Мар'яненко Анастасія Олексіївна _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник _____ старший викладач кафедри ТК Авдєєнко Г.Л. _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____ _____

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____ доцент кафедри ТС, к.т.н, Осипчук С.О. _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва)

Кафедра телекомунікацій
(повна назва)

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Валерій ЯВІСЯ
(підпис) (Ім'я, прізвище)

“ 22 ” січня 2020 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

_____ Мар'яненко Анастасія Олексіївна _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження параметрів сигналів багатопозиційної модуляції в стандарті DVB-S2 за допомогою технології SDR
керівник роботи Авдеєнко Г.Л., старший викладач кафедри ТК _____,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 30 березня 2020 р. № 924-с

2. Термін подання студентом роботи 04.06.2020 р

3. Вихідні дані до роботи: трансивер BladeRFx40, персональний комп'ютер з операційною системою Windows 10, віртуальний персональний комп'ютер (віртуальна машина) з операційною системою Ubuntu 18.04, програми GNURadio, CrazyScan, NovelSat NS4 Calculator, супутниковий приймач TT Budget S2-1600 .

4.Зміст роботи: 1) Обґрунтування актуальності теми даної роботи. Аналіз стандартів супутникового телевізійного мовлення DVB-S2 та DVB-S2X.

2) Аналітичний розрахунок пропускнуї здатності лінії супутникового телевізійного мовлення стандартів DVB-S2 та DVB-S2X.

3) Провести експериментальне дослідження макету лінії супутникового телевізійного мовлення стандарту DVB-S2.

5. Орієнтований перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

Слайд №1 Актуальність та мета, практична цінність роботи.

Слайд №2 Основні відомості про стандарт DVB-S2 та DVB-S2X.

Слайд №3 Результати дослідження у NovelSat NS4 Calculator.

Слайд №4 Блок-схема дослідження.

Слайд №6 Блок-схема DVB-S2 в програмі GNURadio.

Слайд №7 Результати дослідження стандарту DVB-S2.

Слайд №8 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу.

Слайд №9 Спектри сформованих сигналів стандарту DVB-S2.

Слайд №10 Висновки до роботи, напрями подальшого вивчення.

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01.09.2019 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розробка, оформлення, узгодження та затвердження технічного завдання на дипломну роботу	17.09.2019-26.09.2019	
2	Вивчення особливостей стандарту супутникового телевізійного мовлення DVB-S2 та DVB-S2X	06.11.2019-21.11.2019	
3	Вивчення перспективних технологій та стандартів супутникового телевізійного мовлення NovelSat	13.02.2020-26.02.2020	
4	Аналітичний розрахунок параметрів сигналів супутникового ТВ мовлення DVB-S2 та DVB-S2X	02.03.2020-20.03.2020	
5	Розробка апаратно-програмної реалізації модулятора цифрового супутникового телебачення стандарту DVB-S2 у середовищі GNURadio	06.04.2020-26.04.2020	

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

6	Дослідження формування сигналу супутникового ТВ мовлення стандарту DVB-S2	30.04.2020-14.05.2020	
7	Аналіз результатів дослідження	18.05.2020-29.05.2020	
8	Оформлення пояснювальної записки дипломної роботи, підготовка до захисту	29.06.2020-02.06.2020	

Студент

_____ (підпис)

Мар`яненко А.О.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Авдєєнко Г. Л.

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина бакалаврської дипломної роботи містить: 97 сторінки, 55 рисунків, 23 таблиці та 11 джерел.

Метою роботи є обґрунтування того факту, що коефіцієнт скруглення спектру має безпосередній вплив на формування радіосигналу та пропускну здатність лінії супутникового ТВ мовлення.

В даній роботі розглядаються відомі стандарти супутникового телевізійного мовлення DVB-S2 та DVB-S2X, а також проводиться дослідження параметрів цих сигналів та їх вплив на формування спектру сигналу.

Ключові слова: цифрове телебачення, BladeRFx40, модулятор, модуляція, пропускну здатність

ABSTRACT

The text part of the bachelor's thesis: 97 pages., 55 pictures., 23 tables and 11 sources.

The purpose of the work is to substantiate the fact that the spectrum rounding coefficient has a direct impact on the radio signal generation of the bandwidth of the satellite TV broadcast line.

In this research we consider known standards of satellite television broadcasting DVB-S2 and DVB-S2X, and also investigate the parameters of these signals and their influence on the formation of the signal spectrum.

Keywords: digital television, BladeRFx40, modulator, modulation, bandwidth

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1 КОРОТКИЙ ОГЛЯД СТАНДАРТІВ СУПУТНИКОВОГО ТВ МОВЛЕННЯ СТАНДАРТІВ DVB-S2 ТА DVB-S2X	12
1.1 Основні відомості про стандарт супутникового ТВ мовлення DVB-S2	12
1.1.1 Сценарії застосування.....	13
1.1.2 Архітектура системи.....	16
1.1.3 Адаптивне кодування та модуляція	19
1.2 Основні відомості про стандарт супутникового ТВ мовлення DVB-S2X	21
1.3 Узагальнена структурна схема системи супутникового ТВ мовлення стандартів DVB-S2 та DVB-S2x.....	25
1.3.1 Особливості стандарту DVB-S2X у порівнянні зі стандартом DVB-S2	30
1.4 Перспективні технології та стандарти супутникового ТВ мовлення Novelsat	34
1.5 Вплив коефіцієнта скруглення спектру (roll-off) на пропускну спроможність супутникового каналу телевізійного мовлення стандартів DVB-S2 та DVB-S2X.....	37
Висновки до розділу	40
РОЗДІЛ №2 РОЗРАХУНОК ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЛІНІЇ СУПУТНИКОВОГО РАДІОМОВЛЕННЯ СТАНДАРТУ DVB-S2 ТА DVB-S2X ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ВИСОКОПОЗИЦІЙНИХ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ .	42
2.1 Вихідні дані для розрахунку пропускнуої здатності лінії супутникового телевізійного мовлення	42
2.2 Методика розрахунку пропускнуої здатності лінії супутникового телевізійного мовлення	42
2.3 Розрахунок пропускнуої здатності радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 та DVB-S2X при модуляції QPSK та різних значеннях коефіцієнту скруглення спектру (roll-off) з використанням NovelSat NS4 Calculator.....	44
2.4 Розрахунок пропускнуої здатності радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 та DVB-S2X при модуляції 8-PSK та різних значеннях коефіцієнту скруглення спектру (roll-off)	53
2.5 Розрахунок пропускнуої здатності радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 та DVB-S2X при модуляції 16-APSK та різних значеннях коефіцієнту скруглення спектру (roll-off)	59

2.6 Розрахунок пропускної здатності радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 та DVB-S2X при модуляції 32-APSK та різних значеннях коефіцієнту скруглення спектру (roll-off)	64
Висновки до розділу	69
РОЗДІЛ №3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТУ ЛІНІЇ СУПУТНИКОВОГО МОВЛЕННЯ СТАНДАРТУ DVB-S2.....	70
3.1 Постановка задачі дослідження	70
3.2 Методика проведення експериментального дослідження.....	70
3.3 Дослідження макету радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 при модуляції QPSK та різних значеннях коефіцієнту скруглення спектру (roll-off)	75
3.4 Дослідження макету радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 при модуляції 8-PSK та різних значеннях коефіцієнту скруглення спектру (roll-off)	86
Висновки до розділу	94
ВИСНОВОК.....	95
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	96
ДОДАТОК.....	Error! Bookmark not defined.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

DVB-S2 - друге покоління цифрового супутникового мовлення

LDPC - код з малою щільністю перевірок на парність

VCM (Variable Coding and Modulation)- змінне кодування і модуляція

ACM (Adaptive Coding and Modulation) - адаптивне кодування і модуляція

DTH (Direct-to-Home) - це система послуг телемовлення, де телевізійний сигнал передається безпосередньо глядачеві, минаючи кабельних операторів

DSNG (Digital Satellite News Gathering) - цифрові супутникові системи збору новин

PL (Physical Layer) – фізичний рівень

PLFRAME – кадр фізичного рівня

ROF (Roll Off Factor) – коефіцієнт скруглення спектру

TS – транспортний потік

ВСТУП

Актуальність роботи.

Як і будь-яка високотехнологічна сфера діяльності, супутниковий зв'язок знаходиться у стані постійної трансформації та розвитку. Збільшення кількості і якості каналів – призвело до підвищення навантаження на передаюче обладнання супутника, що змусило більшість європейських операторів супутникових систем прямого мовлення зробити поетапний перехід до застосування стандарту DVB-S2 та його розширення DVB-S2X. Стандарт DVB-S2 з точки зору вибору параметрів для формування сигналу має більшу гнучкість, а також забезпечує такі переваги:

- більш потужна система кодування, заснована на кодах Боуза - Чоудхурі - Хоквінгема (БЧХ-коди) та кодах з малою щільністю перевірок на парність (LDPC);
- розширені формати модуляції (QPSK, 8-PSK, 16-APSK, 32-APSK);
- розширені формати швидкості попередньої корекції помилок (FEC) (1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 і 9/10), що дозволяє забезпечити прийом сигналу (FEC = 1/4; 1/3; 2/5) у поганих умовах прийому, тобто для малих значень співвідношення сигнал / шум (SNR);
- покращений коефіцієнт скруглення.

В даній роботі було проведено дослідження параметрів сигналів супутникового ТВ мовлення стандартів DVB-S2 та DVB-S2X, а саме розглянуто вплив зменшення коефіцієнту скруглення спектру на ефективність використання транспортного потоку, що дозволяє в смузі стандартного каналу передавати більше біт корисної інформації.

Об'єктом дослідження є стандарти супутникового телевізійного мовлення DVB-S2 та DVB-S2X.

Предметом дослідження є пропускна здатність лінії супутникового телевізійного мовлення стандартів DVB-S2 та DVB-S2X.

Метою роботи є обґрунтування того факту, що коефіцієнт скруглення спектру має безпосередній вплив на формування радіосигналу та пропускну здатність лінії супутникового ТВ мовлення

Для досягнення поставленої мети дослідження було поставлено такі **основні завдання**:

1) Аналіз стандартів супутникового телевізійного мовлення DVB-S2 та DVB-S2X.

2) Розрахунок пропускну здатності лінії супутникового телевізійного мовлення стандартів DVB-S2 та DVB-S2X.

3) Експериментальне дослідження макету лінії супутникового телевізійного мовлення стандарту DVB-S2.

Використана методика дослідження: використання методів формування сигналів супутникового телебачення, методів вимірювання параметрів сигналів, імітаційне моделювання, аналітичні розрахунки.

Практична цінність роботи:

- для розвитку супутникового телебачення в Україні. Дозволить збільшити пропускну здатність каналу супутникового ТВ мовлення, не збільшуючи при цьому частотний ресурс.

Апробація роботи:

Роботу було апробовано на XIV Міжнародній науково-технічній конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ 2020» з 13 по 17 квітня 2020 року. Конференція проходила на базі Інституту телекомунікаційних систем та НДІ телекомунікацій КПІ ім.Ігоря Сікорського.

РОЗДІЛ 1 КОРОТКИЙ ОГЛЯД СТАНДАРТІВ СУПУТНИКОВОГО ТВ МОВЛЕННЯ СТАНДАРТІВ DVB-S2 ТА DVB-S2X

1.1 Основні відомості про стандарт супутникового ТВ мовлення DVB-S2

Стандарт DVB-S2 - специфікація другого покоління для широкосмугових супутникових рішень, причиною розробки якої є успіх специфікацій першого покоління - DVB-S для супутникового мовлення і DVB-DSNG для цифрових систем збору новин, а також технологічні досягнення останнього десятиліття XX століття [1]. В першу чергу, стандарт був створений для:

- послуг телевізійного мовлення стандартної чіткості (SD) і високої (HD) чіткості;
- інтерактивних послуг, такі як доступ в Інтернет;
- системи збору новин, передачі ТВ-програм, поширення цифрового контенту.

Метою розробки стандарту DVB-S2 було створення механізму, який дозволив би покращити ефективність використання супутникового каналу зв'язку, тобто надати можливість передавати в заданій смузі частот більше корисної інформації при мінімальних затратах на приймальній стороні. Стандарт DVB-S2 створений на основі набору інструментів, який в усіх областях застосування дозволяють вирішувати проблеми, пов'язані зі зберіганням одночіпових приймачів при розумних рівнях складності та тим самим використовувати продукти ринку абонентських приладів для професійних додатків.

Для досягнення найкращого співвідношення продуктивності і складності устаткування в DVB-S2 були застосовані більш досконалі розробки в області кодування каналів (LDPC-коди) і модуляції (використання QPSK, 8-PSK, 16-APSK і 32-APSK) [1]. Внаслідок цього спостерігається збільшення продуктивності системи на 30% по відношенню до DVB-S при незмінній ширині спектру радіочастот супутникового транспондери. При використанні DVB-S2 для широкого мовлення з'являється можливість застосування

багатопозиційних методів модуляції, що дозволяє істотно збільшити швидкість передачі для супутникових апаратів з транспондерами високої потужності [1].

Для інтерактивних рішень, наприклад, односпрямованої передачі по протоколу IP (IP unicasting), вираш при застосуванні DVB-S2 по відношенню до DVB-S ще більш значний. Режим VCM (variable coding and modulation) дозволяє використовувати різні види модуляції і рівні захисту від помилок, причому зміна відбувається динамічно, за принципом фрейм-за-фреймом. У режимі ACM динамічно проводиться оптимізація параметрів передачі для кожного окремого користувача, виходячи з його умов прийому [1]. Це можливо завдяки застосуванню зворотних каналів.

Висока гнучкість стандарту DVB-S2 дозволяє застосовувати його для будь-яких супутникових транспондерів, великої різноманітності спектральних ефективностей і вимог до відношення сигнал/шум. Він розроблений для передачі інформації різних форматів (як аудіо/відео, так і даних). DVB-S2 здатний узгоджуватися з будь-яким форматом вхідного потоку, включаючи безперервні бітові потоки, поодинокі або множинні транспортні потоки MPEG, а також пакети IP і АТМ [1]. Така сумісність дозволить в майбутньому здійснювати передачу даних будь-яких нових форматів без необхідності розробки нової специфікації.

У DVB-S2 доступні режими зворотної сумісності, що дозволяють існуючим сервісам на DVB-S і призначеним для користувача ресиверам продовжувати свою роботу протягом будь-якого перехідного періоду.

1.1.1 Сценарії застосування

Стандарт DVB-S2 оптимізований для різних сценаріїв застосування в широкосмугових супутникових системах [1].

1. Послуги мовлення (Broadcast Services, BS): цифрове мультипрограмне телебачення, телебачення високої чіткості. DVB-S2 призначений для надання

послуг Direct-to-Home (DTH) для користувацьких інтегрованих ресиверів-декодерів, також, як і для колективних антенних систем (SMATV) і кінцевих станцій кабельного ТБ. Послуги BS передаються в транспортних потоках формату MPEG. Для забезпечення різного рівня захисту від помилок для різних видів послуг (SDTV, HDTV, аудіо, мультимедіа) може бути застосований режим VCM. Доступні два режими роботи:

- послуги широкого мовлення без зворотної сумісності (NBC-BS), зворотна сумісність з DVB-S відсутня;
- послуги широкого мовлення зі зворотною сумісністю (BC-BS), сумісні з DVB-S.

Передбачалося, що зворотна сумісність з DVB-S може знадобитися протягом істотного періоду часу, в зв'язку з великою кількістю вже функціонуючих ресиверів DVB-S. При цьому старі ресивери продовжують працювати в звичайному режимі, в той час як для нових ресиверів з підтримкою DVB-S2 стає можливим збільшення пропускну здатності (тобто, наприклад, збільшення числа телевізійних каналів). Після повного переходу населення на обладнання DVB-S2 сигнал, що передається, повинен бути переключений на режим без зворотної сумісності, таким чином, розкриваючи повністю потенціал нового стандарту.

2. Інтерактивні послуги (Interactive Services, IS): інтерактивні послуги передачі даних, включаючи доступ в Інтернет. DVB-S2 призначений для надання інтерактивних послуг для користувацьких інтегрованих ресиверів-декодерів і персональних комп'ютерів, де можливо забезпечення прямого каналу через DVB-S2. Інтерактивність може бути забезпечена шляхом надання зворотного каналу через наземні телефонні комунікації або через супутник. В DVB є велика кількість різних специфікацій для зворотних каналів, наприклад, DVB-RCS (Digital Video Broadcasting - Return Channel via Satellite), DVB-RCP (Digital Video Broadcasting - Return Channel via Public switched Telecommunications, PSTN), DVB-RCG (Digital Video Broadcasting - Return Channel via GSM), DVB-RCC (Digital Video Broadcasting - Return Channel via

Cable TV). Дані переносяться в одиночних або множинних транспортних потоках. DVB-S2 може забезпечувати режими постійного кодування і модуляції (Constant Coding and Modulation, CCM) або режим адаптивного кодування і модуляції (ACM), в якому кожна приймальна станція здійснює контроль режиму передачі адресованого їй трафіку.

3. Передача цифрового ТБ (Digital TV Contribution, DTVC) і цифрові супутникові системи збору новин (Digital Satellite News Gathering, DSNG). Системи передачі цифрового ТБ через супутник є з'єднаннями типу «точка-точка» або «точка-багатоточка» між стаціонарними або рухомими передавальними і приймальними станціями. Вони не призначені для прийому відразу всіма користувачами. Згідно з рекомендацією ITU-R SNG.770-1, супутникові системи збору новин (SNG) визначаються як тимчасові, нетривалі передачі телевізійного або звукового контенту, призначеного для широкого мовлення; такі передачі здійснюються портативними або переносними (мобільними) станціями передачі. Такого роду дані передаються в одиночному або множинному транспортному потоці формату MPEG. Знову ж, DVB-S2 може забезпечити як режим CCM, так і ACM. В даному випадку одна прийомна супутникова станція здійснює контроль режиму передачі всього мультиплексу.

4. Поширення даних (Data Content Distribution), транкінг і інші професійні варіанти застосування. Ці види послуг в основному надаються в режимі «точка - точка» або «точка - багатоточка» (наприклад, надання інтерактивних послуг вузловим наземним станціям, які далі поширюють ці послуги через інші засоби передачі). В даному випадку в режимі ACM одна прийомна супутникова станція здійснює контроль режиму захисту повного TDM-мультиплексу або безліч наземних приймальних станцій здійснюють контроль режиму передачі адресованого кожній з них трафіку. Режим адаптивного кодування і модуляції дозволяє застосовувати різні види модуляції і забезпечувати різні рівні захисту від помилок (швидкості завадостійкого кодування), що змінюються динамічно в залежності від поточних вимог.

Завдяки зворотним каналам, по яких може передаватися інформація про поточні умови прийому, параметри передачі можуть бути оптимізовані в реальному часі для кожного окремого користувача.

1.1.2 Архітектура системи

Для досягнення найвищої продуктивності в DVB-S2 використовуються коди LDPC (коди з малою щільністю перевірок на парність), прості блокові коди з обмеженою структурою алгебри. LDPC коди мають легко паралелізований алгоритм декодування, що складається з простих операцій, таких як додавання, порівняння і складання таблиць пошуку; більш того, ступінь паралелізму регульована, що дозволяє легко вибрати компроміс між пропускнуою спроможністю і складністю. Ключові характеристики кодів LDPC [1]:

- дуже велика довжина одного блоку (64800 біт для нормального кадру, 16200 біт для короткого кадру);
- велика кількість ітерацій декодування;
- наявність зовнішнього BCH-коду.

На передачу цифрових даних через супутник накладаються обмеження по потужності і смузі пропускання. Тому DVB-S2 забезпечує безліч можливих режимів передачі (завадостійке кодування і модуляція), що дозволяє обирати потрібний компроміс між випромінюваною потужністю і спектральною ефективністю. Залежно від обраної схеми модуляції і вимог до системи доступні швидкості кодування $1/4$, $1/3$, $2/5$, $1/2$, $3/5$, $2/3$, $3/4$, $4/5$, $5/6$, $8/9$ і $9/10$. Швидкості кодування $1/4$, $1/3$ і $2/5$ були додані для використання в комбінації з QPSK в виключно поганих умовах прийому, коли рівень сигналу на прийомі нижче рівня шуму. Комп'ютерні симуляції показали перевагу таких режимів перед модуляцією BPSK на швидкостях кодування $1/2$, $2/3$ і $4/5$ [1]. Використання двох значень довжини кодового блоку (64800 і 16200 біт) обумовлено двома протилежними вимогами: при використанні блоків великої

довжини збільшується відношення сигнал / шум, при цьому також збільшується затримка. Тому для застосування в цілях, для яких не важливі затримки (наприклад, широке мовлення) довгі блоки є кращим рішенням, тоді як для інтерактивних послуг короткі блоки можуть бути більш ефективні, коли невеликий обсяг інформації повинен бути переданий передавальною станцією негайно.

Модуляції QPSK і 8-PSK найчастіше використовуються для широкого мовлення, так як вони мають практично постійну огинаючу, тому при їх передачі робоча точка на амплітудній характеристиці транспондера може бути вибрана близькою до насичення [1]. У деяких випадках при наданні послуг широкого мовлення і при наданні інтерактивних послуг при використанні багатопроменевих супутників застосовується модуляція 16-APSK, що забезпечує додаткову спектральну ефективність при відносно невисоких вимогах до лінійності. Режими з модуляцією 32-APSK, в основному призначені для професійного застосування, також можуть бути використані для широкого мовлення, але вимагають високого рівня доступного відношення сигнал / шум і використання покращених методів попереднього спотворення [2] на передавальній станції для мінімізації ефекту нелінійності транспондера. Хоча ці режими не настільки енергоефективні, як інші, вони забезпечують набагато більшу пропускну здатність. Сигнальні сузір'я 16-APSK і 32-APSK були спеціально оптимізовані для роботи з нелінійними транспондерами шляхом розташування сигнальних точок на колах. Всі режими також підходять для роботи на квазілінійних супутникових каналах із застосуванням безлічі несучих і мультиплексування з частотним поділом каналів (FDM).

Завдяки наявності великої кількості можливих режимів роботи (за схемами модуляції і швидкостям завадостійкого кодування) доступні значення спектральної ефективності від 0.5 до 4.5 біт / с / Гц, які можуть бути обрані в залежності від різних факторів [1].

Ще однією особливістю DVB-S2 є наявність скремблера фізичного рівня (Physical Layer, PL), який складає по модулю 2 синфазні і квадратурні символи (а також опціональні пілот-символи при виключенні PL-заголовка) з комплексною двійквою випадковою послідовністю, що відповідає за довжиною одному кадру фізичного рівня (PLFRAME). Комплексна випадкова послідовність має період в 262143 символа і використовується крім цього в наземному стандарті UMTS. Вона забезпечує хороші властивості авто- та крос-кореляції і дозволяє згенерувати до 262 142 різних комплексних послідовностей [1]. Основні переваги, що забезпечуються присутністю рандомізації фізичного рівня в DVB-S2:

- можливість однозначно «відмітити» окремі несучі в багатоканальному транспондері з безліччю несучих;
- рандомізація періодичних пілот-символів (рознесені за часом на несучій);
- рандомізація інтерференції з променями інших супутників або цього ж супутника;
- рандомізація фізичного рівня також дозволяє виробляти повторне кодування в модуляторі DVB-S2, щоб розширити робочий діапазон відношення сигнал / (шум + інтерференція) системи.

У DVB-S2 доступні на вибір три значення коефіцієнта скруглення фільтра (roll-off factor, ROF) для формування основної смуги сигналу. Це $\alpha = 0,35$ як в DVB-S, і ще два, а саме $\alpha = 0,25$ і $\alpha = 0,20$ для більш жорсткого обмеження форми спектра [1].

Стандарт DVB-S2 підходить для використання з супутниковими транспондерами з різними смугами частот і частотними діапазонами. Символьна швидкість відповідає заданим характеристикам транспондера, і в разі передачі багатьох несучих одним транспондером (FDM) прийнятому частотному плану.

1.1.3 Адаптивне кодування та модуляція

Однією з найважливіших особливостей стандарту DVB-S2 є режим ACM. У режимі ACM динамічно проводиться оптимізація параметрів передачі для кожного окремого користувача, виходячи з його умов прийому [1].

Залежно від умов прийому сигналу (наприклад, при наявності опадів) змінюється режим роботи модулятора, тобто змінюються швидкість кодування і метод модуляції. Як наслідок, змінюється і необхідне відношення сигнал/шум для прийому сигналу у абонента. Даний режим дозволяє забезпечувати максимальну швидкість передачі для будь-яких конкретних умов. Перевага використання ACM стає ще більш помітною при роботі в високочастотних діапазонах і в районах з несприятливою погодною ситуацією (тропіки).

На рисунку 1.1 показана схема роботи системи ACM. Ця система складається з ACM-шлюзу (GW), DVB-S2 ACM-модулятора, ЗССЗ, супутника і приймального терміналу, з'єднаного з ACM GW по зворотному каналу.

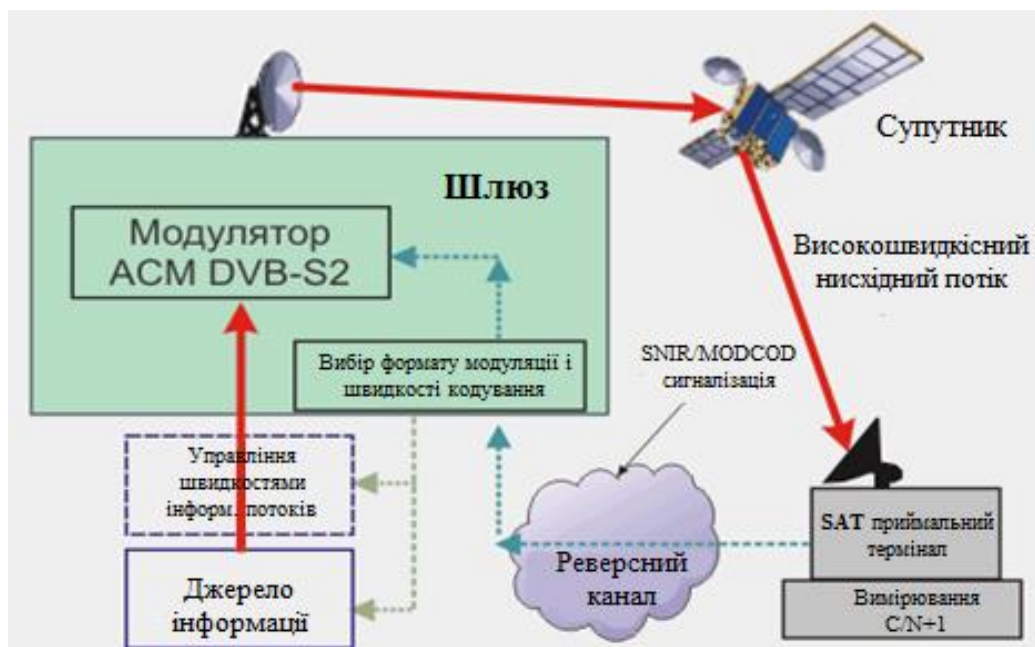


Рис. 1.1 Спрощена структурна приймально-передавальна схеми з відображенням елементів ACM

DVB-S2 ACM-модулятор працює з постійною символічною швидкістю, щоб займана на супутнику смуга була постійною. ACM вбудовується модулятором в передану послідовність кадрів, де параметри кодування і модуляції можуть змінюватися від кадру до кадру [3]. При цьому, в залежності від умов прийому, одночасно в кадрі буде змінюватися корисна швидкість передачі і FEC - чим гірше умови прийому (нижче FEC), тим нижче швидкість, і навпаки. Таким чином забезпечується сталість сервісу. Фізичний рівень адаптації параметрів передачі досягається наступним чином:

1. кожна приймальна станція вимірює статус каналу ($C/N + I$) і повідомляє про це по зворотному каналу на GW;
2. за повідомленнями від приймальні станції GW встановлює рівень захисту пакетів даних, переданих на приймальну станцію;
3. щоб уникнути переповнення прийнятої інформації під час загасання, повинен бути застосований механізм контролю швидкості переданої інформації для адаптації трафіку до можливостей каналу. Це може досягатися кількома шляхами, відповідно до вимог сервісу та архітектури мережі. Що стосується сервісів "точка - точка", то за допомогою DVB-S2 ACM можна адаптувати рівень захисту від користувача до користувача; при цьому кількість користувачів необмежено. Крім того, безпосередній контроль швидкості джерела часто неможливий, оскільки він може перебувати далеко від передавальної станції.

Ключовим моментом в ACM-системах є фізичний рівень адаптації затримки зворотного каналу, так як це жорстко прив'язане до можливості системи змінювати параметри контрольного каналу. Якщо дана адаптація відбувається швидко, то можна забезпечити безперебійну роботу сервісу при швидких коливаннях умов прийому і в той же час підтримувати значення C/N на низькому рівні, щоб максимізувати пропускну здатність системи. Затримка зворотного каналу в межах однієї секунди дозволяє мінімізувати втрату переданих пакетів [3].

1.2 Основні відомості про стандарт супутникового ТВ мовлення DVB-S2X

У березні 2014 року був представлений стандарт DVB-S2X. У порівнянні з класичним DVB-S2 можливо потенційне збільшення продуктивності ліній супутникового зв'язку більш ніж на 50%. Серед нововведень найбільш значущими є [4]:

- багатопозиційні методи модуляції 64/128/256-APSK;
- поліпшені алгоритми завадостійкого кодування;
- менші значення коефіцієнта скруглення (roll-off factor);
- покращені схеми фільтрів, які роблять можливим зменшення проміжків між несучими.

Стандарт DVB-S2X по суті є розширенням стандарту DVB-S2 і додає в нього додаткові технологічні можливості і функції. DVB-S2X був офіційно випущений як ETSI EN 302 307, частина друга, першою частиною якого є DVB-S2. Уже той факт, що новий стандарт названий розширенням існуючого, говорить про те, що корінних змін в його специфікацію не вносилося, а були додані лише нові опції і покращення.

Оскільки супутниковий канал мовлення дуже дорогий в експлуатації, навіть незначним змінам у стандартах приділяється особлива увага. Вартість оренди одного транспондера становить від кількох сотень тисяч до мільйонів євро в рік. За ці гроші оператор отримує супутниковий канал із заданою смугою частот і зоною покриття.

При організації експлуатації транспондера оператору доводиться вирішувати складне завдання вибору параметрів мовлення. Використання високих форматів модуляції дозволяє збільшувати бітрейт в каналі, тобто розподіляти більше програм в стовбурі, але одночасно звужує зону обслуговування і вимагає від абонентів установки антен більшого розміру, що зменшує потенційне число користувачів. Використання низьких форматів з високою завадостійкістю розширює зону охоплення, вимагає антени меншого розміру, але при цьому зменшує доступну кількість сервісів для трансляції в

каналі. До цього ж потрібно враховувати щільність населення в зонах обслуговування, наявність вітрів, погоду і законодавчі обмеження. Тому вибір оптимального формату модуляції стає для оператора складним маркетинговим завданням.

На рис. 1.2 наведені залежності доступної спектральної ефективності при різних відношеннях сигнал/шум на прийомі (SNR) з урахуванням використання різних сполучень модуляції і завадостійкого кодування для систем DVB-S2 і DVB-S2X [4]. Крім того, враховуються найменші доступні для обох систем коефіцієнти скруглення $\alpha = 0.2$ і $\alpha = 0.05$ відповідно. Як видно на рисунку 1.2, DVB-S2X може забезпечити більш високу спектральну ефективність при рівних значеннях SNR. Крім того, завдяки безлічі доступних сполучень модуляції і кодування, можливий більш тонкий підбір такого поєднання для відповідності поточним умовам прийому і забезпечення максимальної спектральної ефективності без перевищення заданої ймовірності помилки біта.

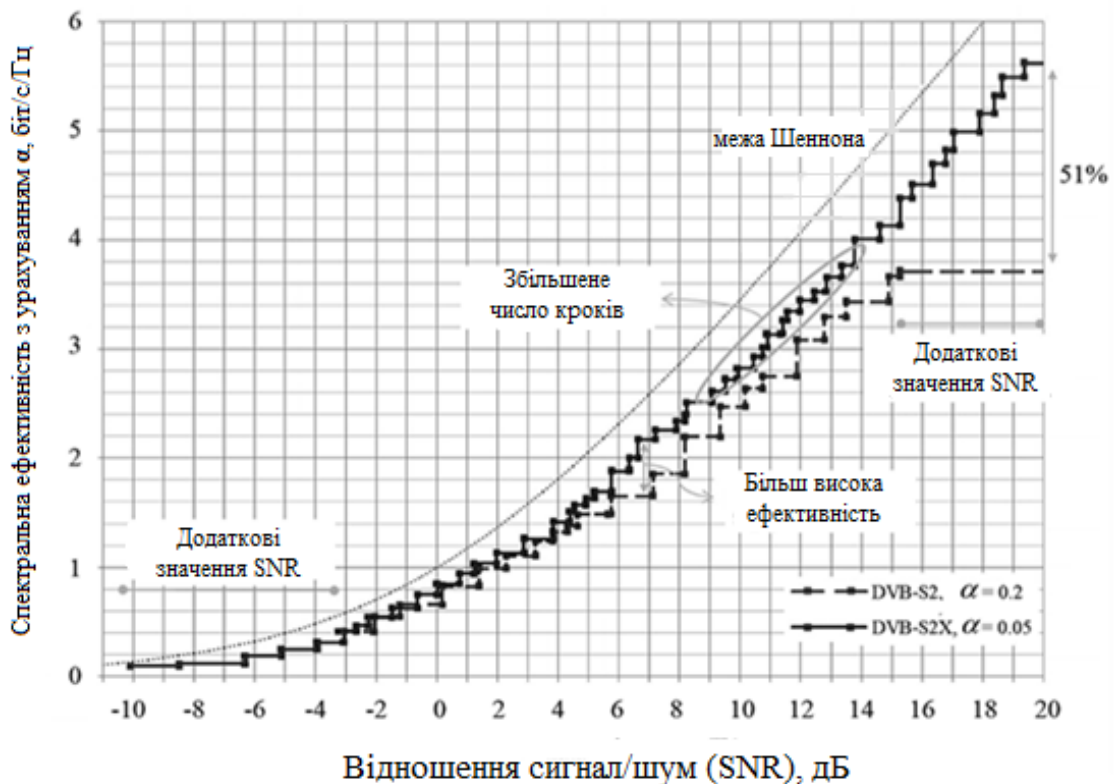


Рис. 1.2 Спектральна ефективність систем DVB-S2 і DVB-S2X

З інших особливостей DVB-S2X варто згадати можливість використання RO (roll off) фактора 5%, 10%, 15% на додаток до 20%, 25% і 35%, що використовуються в DVB-S2. Зменшення коефіцієнту скруглення до 5%, 10%, 15% призводить до прямого посилення пропускної здатності. Чим менше цей параметр, тим ближче форма спектра сигналу до прямокутної, що дозволяє більш повно використовувати весь доступний спектр супутникового транспондера. На рис. 1.3 можна побачити, що при використанні менших значень коефіцієнту скруглення, фронт сигналу стає більш крутішим, але все ще добре вписується у виділену смугу частот. При цьому втрати потужності в 0.4 дБ можуть бути повністю відновленні, шляхом застосування в передавачі попередніх спотворень[10].

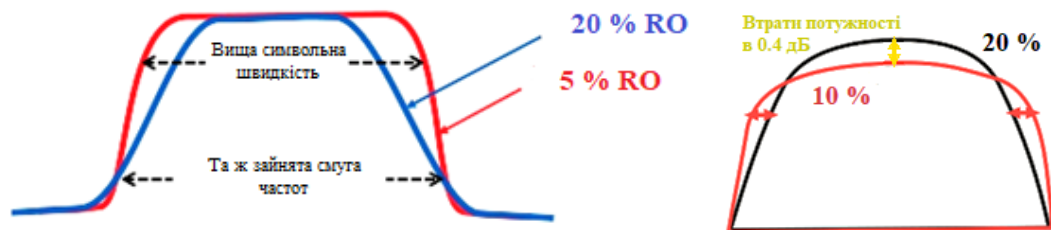


Рис. 1.3 Зміна спектру сигналу при різних значеннях roll off

Також особливістю стандарту DVB-S2X є зменшення рівнів шуму бокових пелюсток, оскільки вони перешкоджають розміщенню супутникових носіїв близько один до одного. Застосування вдосконалених фільтрів впливає на економію пропускної здатності, оскільки відстань між несучими може бути в 1.05 разів ближче, ніж їх символна швидкість (див.рис. 1.4) [10].

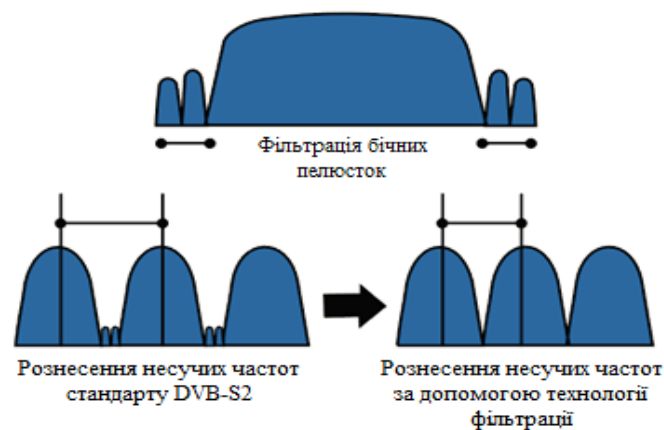


Рис. 1.4 Оптимальний простір між несучими

Ще одним способом збільшення ефективності використання смуги транспондера є застосування статистичного мультиплексування. Суть методу полягає в тому, що при одночасній трансляції великого числа сервісів в каналі транспондера бітрейт між ними динамічно перерозподіляється, що дозволяє збільшити число трансльованих в транспондері програм на 20-30%. Однак при переході на UHD-мовлення в каналі транспондера уміщається всього два-три сервіси і цей спосіб не працює. Новий стандарт дозволяє об'єднувати в єдиний віртуальний канал до трьох стандартних транспондерів і здійснювати статистичне мультиплексування UHD-сервісів в рамках цього віртуального каналу [5].

З огляду на те, що практично всі нові супутникові DVB-приймачі, випущені після 2014 року, підтримують як DVB-S2, так і DVB-S2X, при створенні нових супутникових мереж практично безальтернативно використання нового стандарту. Однак вже існуючих супутникових операторів новий стандарт не надає настільки істотних переваг, щоб спонукати їх перейти на нього і замінити все приймальне обладнання у абонентів.

Зона 1 описує можливості стандарту при наднизьких відношеннях сигнал/шум - від -3,5 дБ до -10 дБ. Таке низьке співвідношення не дає змоги ефективно використовувати можливості супутникового каналу для телемовлення, тому в початковій версії стандарту були відсутні модуляційні схеми для таких відношень сигнал/шум. Але часи змінюються. Сьогодні розглядаються проекти, для яких прийнятні навіть дуже низькі потоки, якщо їх можна отримувати на дуже маленьку антену або на рухомих об'єктах - літаках, кораблях, автотранспорті. Наприклад, мобільне супутникове телебачення або мобільний супутниковий Інтернет. Тому в новому стандарті додані модуляційні схеми, які можуть працювати при таких низьких відношеннях сигнал/шум [5].

Зона 3 описує можливості стандарту при високих відношеннях сигнал/шум вище 15 дБ. Таке співвідношення можна отримати тільки при використанні

антен великого діаметра - до декількох метрів, які відрізняються високою вартістю і складністю в налаштуванні і експлуатації. Тому такі антени не застосовуються в системах DTH, а використовуються тільки як професійне обладнання. При такому високому відношенні сигнал/шум відповідно до теореми Шеннона можна забезпечити істотне підвищення швидкості передачі інформації в каналі. Однак існуючий стандарт DVB-S2 був орієнтований на системи DTH і не мав у своєму складі високих модуляційних схем, які необхідні для реалізації потенційно досяжної пропускної здатності для систем з високим відношенням сигнал/шум [5].

Нова специфікація стандарту DVB-S2X в області масового застосування для DTH-систем має певні переваги, особливо для сервісів нового покоління (UHD, HEVC), що робить привабливим його використання при реалізації нових супутникових проектів.

Додавання модуляційних схем для роботи в області наднизьких відношень сигнал/шум дозволяє реалізовувати нові класи супутникових проектів: супутникове мобільне телебачення, супутниковий мобільний Інтернет, мобільні додатки і т.п.

Додавання поліпшених модуляційних схем для роботи в області високих відношень сигнал/шум з підвищеним бітрейтом дозволить значно підвищити ефективність роботи професійних систем дистрибуції телепрограм. З огляду на обмежену кількість використовуваного приймального обладнання в таких системах і суттєву перевагу пропускної здатності каналів, можна очікувати швидкого впровадження формату DVB-S2X в такі системи.

1.3 Узагальнена структурна схема системи супутникового ТВ мовлення стандартів DVB-S2 та DVB-S2x

Система DVB-S2 [6] складається з послідовності функціональних блоків, які зображено на рисунку 1.5.

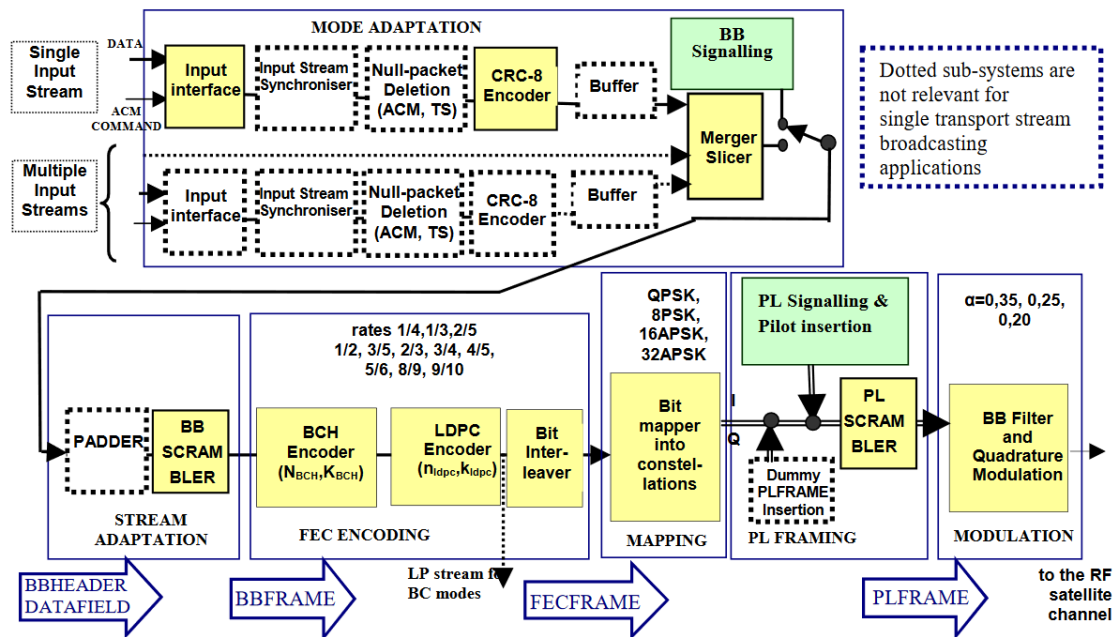


Рис. 1.5 Функціональна блок-схема системи DVB-S2

Формування сигналу засноване на двох рівнях структур формування кадрів:

- BBFRAME на рівні основної смути (BB), переносить різноманітні біти сигналізації для конфігурації гнучкості приймача відповідно до сценарію застосування;
- PLFRAME на фізичному рівні (PL), переносить кілька бітів сигналізації з високим ступенем захисту для забезпечення надійної синхронізації і передачі сигналів на фізичному рівні.

Залежно від застосування вхідна послідовність DVB-S2 може представляти собою один або кілька транспортних потоків (TS) MPEG, один або кілька потоків загального призначення як пакетованих, так і безперервних. Блок «Адаптація режиму» забезпечує:

- інтерфейс вхідного потоку. Вхідна послідовність може являти собою один або кілька TS, один або кілька потоків загального призначення (пакетованих або безперервних);
- синхронізацію вхідного потоку. Обробка даних в DVB-S2 може викликати різні затримки в передачі. Цей блок дозволяє гарантувати постійну швидкість

передачі бітів і затримку в наскрізній передачі для пакетованого вхідного потоку;

- виключення порожніх пакетів. Для зниження швидкості передачі інформації і підвищення захисту від помилок в модуляторі. В результаті цього процесу порожні пакети відновлюються в приймачі саме в тому місці, де вони були спочатку.
- кодування CRC-8 для виявлення помилок на пакетному рівні в приймачі (тільки для пакетних вхідних потоків),
- об'єднання вхідних потоків (тільки для режимів декількох вхідних потоків) і поділ на поля даних.

Потоковий заголовок додається перед полем даних для повідомлення приймачу даних про формат вхідного потоку і типу режиму адаптації: один або безліч вхідних потоків, загальний або транспортний потік, постійні кодування і модуляція, (SCM) або ACM і багато інших деталей конфігурації. Завдяки захисту з попередньою корекцією помилок (FEC) (розповсюджується як на заголовок, так і на корисне навантаження даних) і загальну довжину кадру FEC, потоковий заголовок може фактично містити багато бітів сигналізації, не втрачаючи ефективності передачі або стійкості до шуму. Слід зазначити, що мультиплексні транспортні пакети MPEG можуть бути асинхронно відображені в поточкових кадрах [6].

Потім застосовується адаптація потоку для забезпечення заповнення в разі, якщо наявні для передачі дані користувача недостатні для повного заповнення VBF-RAME, а також для потокового скремблювання.

Кодування з попередньою корекцією помилок (FEC) здійснює зв'язування зовнішнього коду BCH (код Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема) і внутрішніх кодів LDPC (з малою щільністю перевірок на парність). Залежно від області застосування блоки кодів FEC (кадри FEC) можуть мати довжину 64800 або 16200 бітів. Коли використовуються змінні кодування і модуляція (VCM) або ACM, FEC і режим модуляції є постійними в межах кадру, однак можуть бути

змінені в інших кадрах; більш того, переданий сигнал може містити суміш нормальних і коротких кодових блоків.

Відображення може бути вибрано з груп QPSK, 8-PSK, 16-APSK і 32-APSK (див. рис. 1.6) в залежності від області застосування. QPSK і 8-PSK зазвичай пропонуються для радіомовних застосувань, оскільки вони по суті є типами модуляції з постійною огинаючою, і можуть бути використані в нелінійних супутникових ретрансляторах, що працюють в режимі, близькому до насичення. Режимми 16-APSK і 32-APSK, головним чином призначені для застосувань доставки телевізійних програм, також можуть бути використані для радіомовлення, однак це вимагає більш високого рівня існуючого відношення C/N і покращених методів попередньої корекції на станції лінії вгору для зведення до мінімуму ефекту нелінійності ретранслятора. Хоча ці режими не є настільки енергозберігаючими, як інші, ефективність використання спектра виявляється набагато вище. Групи 16-APSK і 32-APSK були оптимізовані для роботи на нелінійному ретрансляторі шляхом нанесення точок на круги. Проте їх робочі характеристики на лінійному каналі можна порівняти з робочими характеристиками 16-QAM і 32-QAM, відповідно [6].

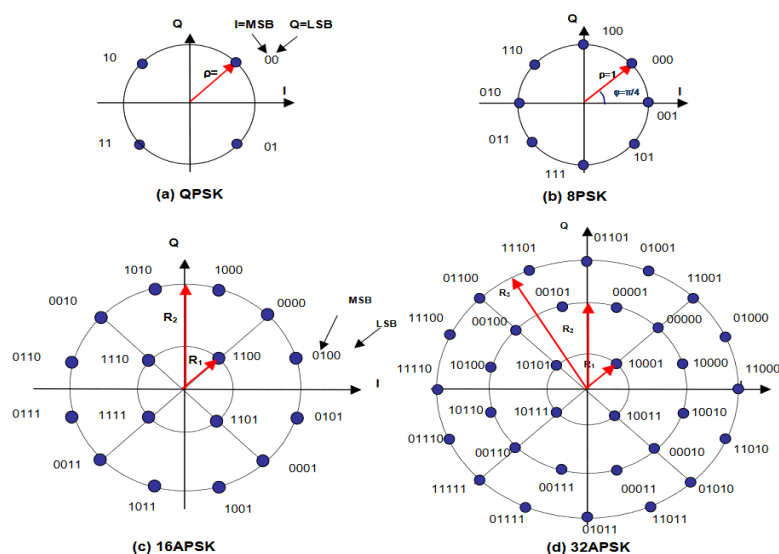


Рис. 1.6 Чотири можливі сузір'я DVB-S2 перед скремблюванням фізичного рівня

Формування кадрів фізичного рівня було розроблено для забезпечення надійної синхронізації і сигналізації на фізичному рівні. Таким чином, приймач може синхронізувати і виявляти параметри модуляції і кодування перед демодуляцією і декодуванням з FEC. Сигнал фізичного рівня DVB-S2 складається зі звичайної послідовності кадрів (див. рис. 1.7): в межах кадру схема модуляції і кодування однорідна, проте може змінюватися (при адаптивній конфігурації модуляції і кодування) в сусідніх кадрах. Кожен кадр складається з корисного навантаження в 64800 біт в конфігурації "нормального кадру", 16200 біт в конфігурації "короткого кадру", відповідаючи кодовому блоку FEC. Корисному навантаженню передують заголовок в 90 двійкових символів модуляції, який містить інформацію про синхронізацію і сигналізації, з тим щоб приймач міг синхронізувати і виявляти параметри модуляції і кодування перед демодуляцією і декодуванням з FEC.

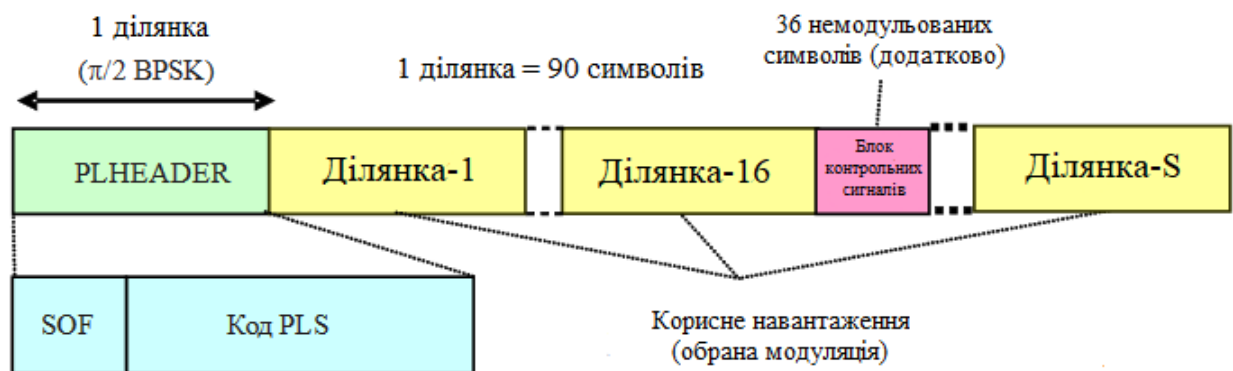


Рис. 1.7 Схема кадру PL

У завершенні здійснюється скремблювання з метою розсіювання енергії для дотримання вимог Регламенту радіозв'язку щодо заповнення спектра і для передачі свого роду "підпису" оператора служби з метою оперативної ідентифікації в разі помилок в процедурах лінії вгору.

Потім застосовується потокова фільтрація і квадратурна модуляція, для того щоб сформувати спектр сигналу і створити РЧ-сигнал. На стороні передачі використовується фільтрація квадратного кореня з піднесеного косинуса з вибором трьох коефіцієнтів скруглення: 0,35; 0,25 і 0,20 в залежності від обмежень ширини смуги.

1.3.1 Особливості стандарту DVB-S2X у порівнянні зі стандартом DVB-S2

DVB-S2X - стандарт супутникового цифрового телебачення, який є розширенням стандарту DVB-S2, та привносить в нього додаткові технологічні можливості і функції.

На рисунку 1.8 зображена схема передачі за стандартом DVB-S2X. Розглянемо її більш детально.

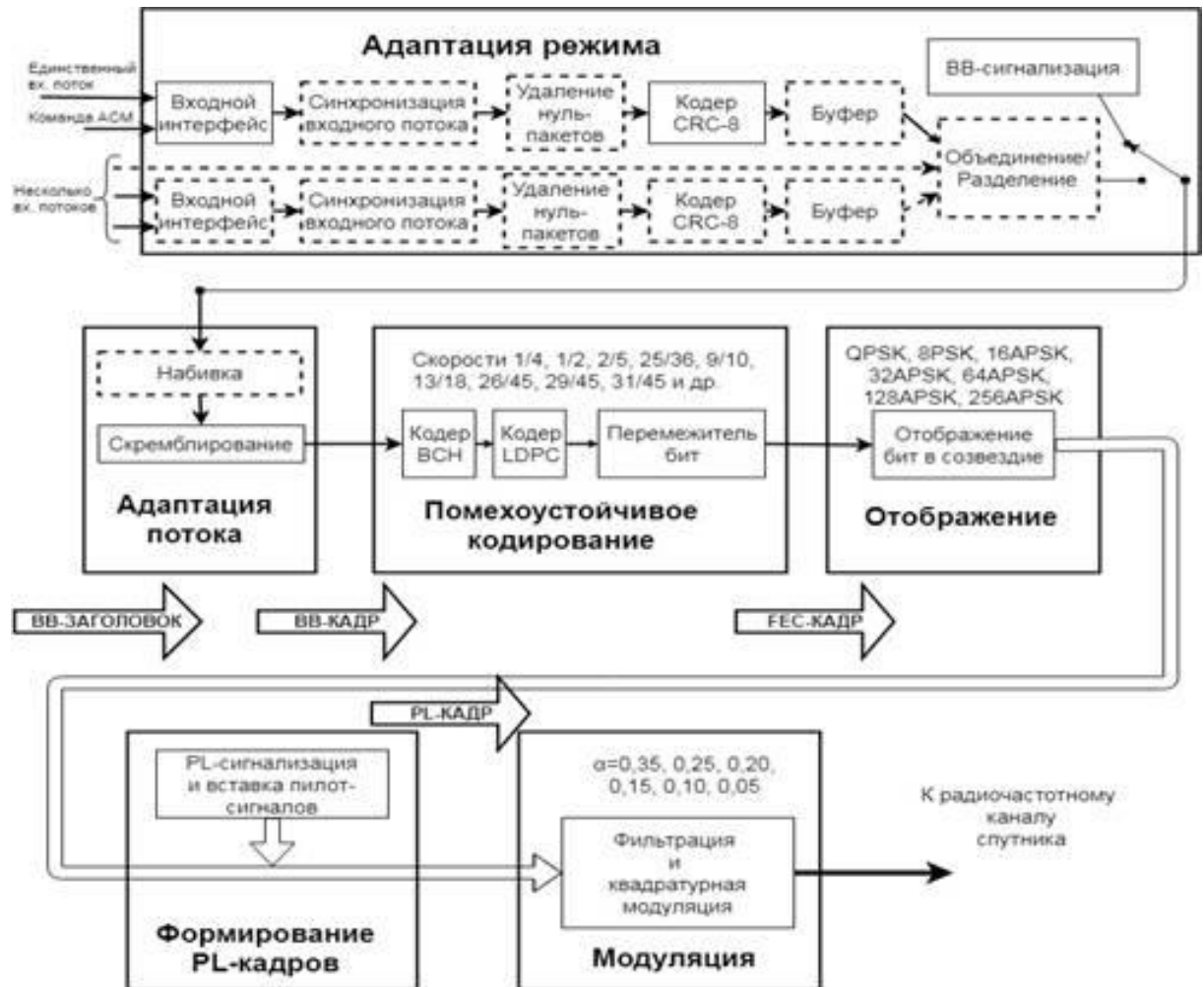


Рис. 1.8 Функціональна схема системи DVB-S2X

Підсистема вхідного інтерфейсу перетворює вхідний фізичний формат у внутрішній формат логічних біт. Перший прийнятий біт позначається як старший значущий біт.

Підсистема синхронізації вхідного потоку забезпечує постійну швидкість передачі даних (CBR) і постійну затримку у цілому тракті для пакетованного вхідного потоку (тобто для транспортного потоку).

У режимі АСМ і при форматі транспортного потоку нульові пакети МРЕГ розпізнаються і видаляються. Це дозволяє скоротити інформаційну швидкість і збільшити завадостійкість при обробці сигналу, що передається модулятором.

Кодер CRC-8 (тільки для пакетованих потоків). У вхідному потоці, що представляє послідовність користувальницьких пакетів з довгою UPL біт з байтом синхронізації, на початку кожного пакета дані користувача пакета (за винятком байта синхронізації) обробляються 8-бітовим систематичним CRC-кодером.

Пристрій нарізки зчитує (тобто нарізає) з входу (при одному вхідному потоці) або з одного з входів (при декількох вхідних потоках) поле даних, що складається з кількості біт, рівних довжині поля даних (DFL). Пристрій об'єднання об'єднує в одному вихідному сигналі поля даних, зчитаних і нарізаних з одного з входів. При одному вхідному сигналі потрібно тільки пристрій нарізки [7].

У стандарті DVB-S2X також представлені інструменти для реалізації «склеювання каналів», де один вхідний потік передається паралельно по L транспондерам. Максимальна кількість пов'язаних транспондерів може бути 3 ($L \leq 3$). Зв'язування каналів дозволяє, наприклад, уникати невикористаної потужності в транспондері в разі відеопрограм з постійною бітовою швидкістю (CBR) і/або максимізувати коефіцієнт статистичного мультиплексування в разі відеопрограм зі змінною швидкістю передачі (VBR). Пов'язані канали повинні знаходитися в одному і тому ж діапазоні частот. Крім того, склеювання каналів має використовувати тільки ССМ і не повинно поєднуватися з широкосмуговими тюнерами. ССМ (Constant Coding and Modulation) - режим функціонування супутника з постійним кодуванням і модуляцією [7].

Вставка заголовка немодульованого сигналу. Перед полем даних вставляється заголовок немодульованого сигналу (BBHEADER) довжиною 10

байт, що описує формат поля даних. Вихідною послідовністю є заголовок немодульованого сигналу (10 байт), за яким слідує поле даних.

Підсистема адаптації потоку забезпечує заповнення до постійної довжини кадру немодульованого сигналу і скремблювання. Постійна довжина кадру залежить від швидкості завадостійкого коду. Заповнення являє собою додавання нульових біт після поля даних, в результаті чого кадр стає постійної довжини, необхідної для БЧХ-коду [7]. На відміну від стандарту DVB-S2 в DVB-S2X біти для заповнення не обов'язково повинні бути нульовими, також була покращена інкапсуляція загального потоку (GSE-HEM), який забезпечує представлення функцій інкапсуляції пакетів і фрагментації загального потоку [7].

Підсистема завадостійкого кодування здійснює зовнішнє кодування (БЧХ), внутрішнє кодування (LDPC) и перемеження біт. Вхідний потік складається з кадрів немодульованого сигналу (BBFRAMES), вихідний - з кадрів немодульованого сигналу, оброблених завадостійким кодом (FECFRAMES) [7]. У стандарті DVB-S2X, на відміну від стандарту DVB-S2 вводяться додаткові швидкості кодування.

Перемежувач біт. Для сигналів всіх видів модуляцій, виключаючи QPSK, здійснюється перемеження біт вихідного потоку кодера LDPC за допомогою блокового перемежувача. Дані послідовно записуються в стовпці перемежувача і послідовно зчитуються построчно.

Підсистема формування кадрової структури фізичного рівня (PLFRAMING) генерує кадр фізичного рівня (PLFRAME) шляхом виконання наступних операцій:

1. Генерація «порожніх» кадрів фізичного рівня у випадках, коли немає готових до обробки і передачі кадрів комплексних даних, схильних до завадостійкого кодування (XFECFRAME).
2. Нарізка кадрів комплексних даних, схильних до завадостійкого кодування (XFECFRAME) на ціле число S слотів постійної довжини.

3. Генерація заголовка фізичного рівня (PLHEADER) і вставка його перед кадрами комплексних даних, схильних до завадостійкого кодування (XFECFRAME) для конфігурації приймального тракту. Заголовок займає рівно один слот (90 символів). Крім цього, до звичайних PLFRAME, де PLHEADER додається до кожного XFECFRAME, DVB-S2X може передавати VL-SNR XFECFRAME. У цьому випадку, після звичайного PLHEADER, передається додатковий заголовок VLSNR.

4. Вставка блоку пілот-символів (для режиму відновлення несучої по пілот-сигналу) через кожні 16 слотів з метою забезпечення синхронізації приймального тракту. Блок пілот-символів складається з $P = 36$ символів.

5. Додання модульованим символам підканалів (I, Q) випадкового характеру шляхом скремблювання на фізичному рівні.

Після скремблювання сигнал обробляється SQRT-фільтром. На додаток до коефіцієнтів скруглення стандарту DVB-S2 ($\alpha = 0,35, 0,25$ і $0,20$), в стандарті DVB-S2X введені додаткові коефіцієнти $\alpha = 0,15; 0,10$ і $0,05$. Далі сигнал проходить квадратурну модуляцію [7].

Таким чином, на основі аналізу функціональної схеми стандарту, виділимо його основні переваги перед попереднім стандартом:

- більш високі рівні модуляції - 64/128 / 256APSK;
- більша кількість варіантів FEC (наприклад: 23/36, 13/18, 77/90 і т.п.), що добре впливає на ACM;
- склеювання каналів - до 3;
- підтримка операцій з дуже низьким коефіцієнтом SNR до -10 dB;
- менші опції загасання на рівні 5 і 10 відсотків (на додаток до 20%, 25% і 35%, доступним в DVB-S2);
- режим підвищеної ефективності для передачі даних - GSE-HEM (High Efficiency Mode).

1.4 Перспективні технології та стандарти супутникового ТВ мовлення Novelsat

Заснована у 2007 році, компанія NovelSat є світовим лідером у галузі супутникових технологій зв'язку. Перевірені на практиці платформи супутникового зв'язку забезпечують неперевершену спектральну ефективність, швидкість передачі та високопродуктивні функції для підприємств усіх розмірів, які використовують супутниковий зв'язок для передачі даних та радіомовлення.

У 2011 році компанією була розроблена інноваційна технологія модуляції супутникових сигналів - NovelSat NS3, яка забезпечила ефективність використання частотного спектра на 25%, що перевищила показники стандарту DVB-S2. Але пізніше компанія представила оновлену технологію NovelSat NS4, яка змогла перевершити всі очікування галузі щодо ефективності використання спектра, підвищивши цю ефективність на 45% без необхідності заміни апаратної частини. Розглянемо деякі основні характеристики цих стандартів (див. рис. 1.9) [8].

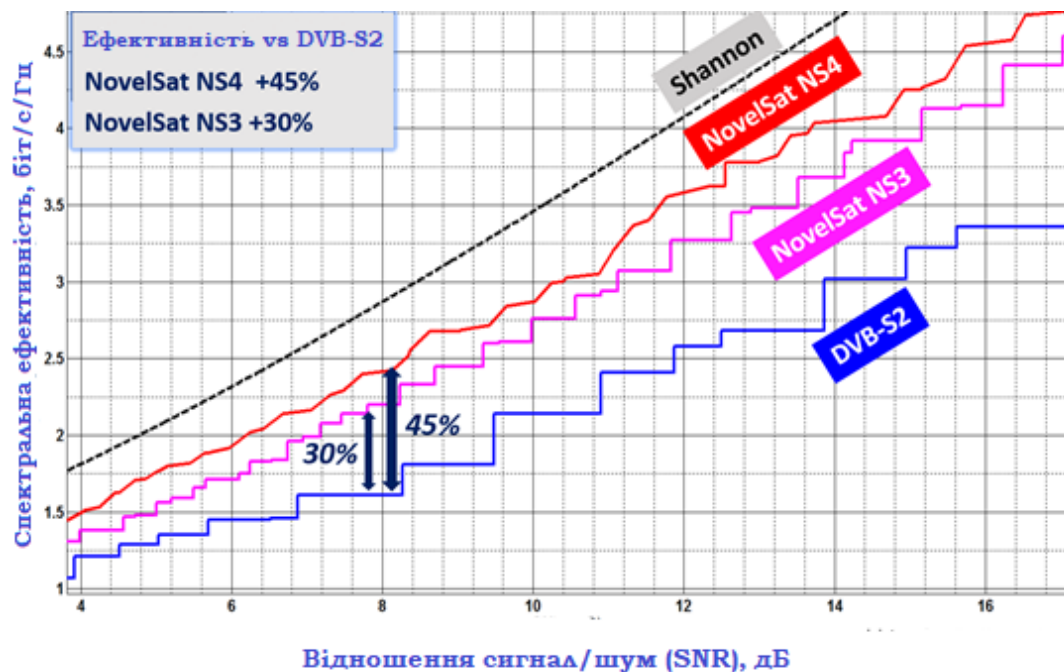


Рис. 1.9 Порівняння ефективності використання спектра стандартів NovelSat NS3, NovelSat NS4, DVB-S2

Супутникові модулятори та демодулятори з вбудованою технологією NovelSat NS3, зазвичай, можуть досягти збільшення спектральної ефективності від 40% до 60% порівняно з DVB-S2.

Забезпечуючи найефективніше використання пропускної здатності, NovelSat NS3 зменшує експлуатаційні витрати, дозволяючи організаціям супутникового зв'язку передавати більше даних за фіксовану кількість пропускної здатності, також орендувати менше пропускної здатності для обробки інформації та використовувати менші антени для задоволення потреб в комунікаціях. Економії також сприяє інтелектуальне управління запасом на завмирання (ACM) та переданою потужністю (AUPC) для оптимізації використання смуги пропускання, одночасного відео та даних на одному носії та дуже високої стійкості для всіх типів перешкод сигналу [8].

Хоча радіозавади можуть бути проблемою, яка погіршує якість сигналу в будь-якій точці світу, частотні завади також стають більш поширеною проблемою для супутникового зв'язку. Особливо це стосується країн, що розвиваються. Хоча не завжди вдається усунути всі сигнальні завади, NovelSat NS3 розблоковує частоти з більшою інтерференцією (до 15 дБ), ніж обладнання на базі DVB-S2. Цей вид стійкості до завад означає, що сигнал має набагато більше шансів дістатися до місця призначення.

Також технологія NS3 інтелектуально управляє запасом на завмирання, оскільки зміни погодних умов призводять до ще більшого покращення ефективності пропускної здатності. У нормальних умовах експлуатації, використовуючи NovelSat NS3, можна виділити запас на завмирання для регулярної передачі. Але, коли погодні умови змінюються, загрожуючи якості зв'язку, NovelSat NS3 може автоматично регулювати необхідне співвідношення запасу на завмирання, що використовується для нормальної передачі та пом'якшення погодних впливів, щоб забезпечити оптимізацію використання пропускної здатності та QoS [8].

Супутникові модеми, модулятори та демодулятори, оснащені технологією NovelSat NS3 - ідеальне економічне рішення в галузі супутникових послуг.

Сумісність з попередніми стандартами, такими як DVB-S та DVB-S2, дає можливість зберегти існуючу інфраструктуру при модернізації до швидкості та стійкості NovelSat NS3. Крім того, обладнання на базі NovelSat NS3 було розроблено для підтримки супутників з високою пропускну здатністю (HTS), є можливість перейти до нових стандартів та додати нові функції за допомогою оновлень програмного забезпечення, які можна навіть впроваджувати в ефірі (OTA).

Стандарт NovelSat NS4 в даний час доступний як опціональний програмний пакет у всіх супутникових модемах, модуляторах і демодуляторах виробництва NovelSat, які також підтримують всі галузеві стандарти, включаючи DVB-S, DVB-S2 і DVB-S2X, і є сумісними з ними. Для індустрії супутникового зв'язку дане підвищення ефективності використання частотного спектра при використанні NovelSat NS4 означає можливість трансляції більшої кількості HD і 4K UHD каналів і передачі більшої кількості даних без додаткових витрат на розширення супутникових ємностей.

Технічні переваги NovelSat NS4 базуються на розширенні функцій, включаючи унікальний 2% коефіцієнт скруглення (з режимами, що дозволяють використовувати коефіцієнт скруглення від 5% і до 20%), вдосконалені алгоритми спектральної ефективності та покращені границі допустимого відхилення спотворення сигналу та всі види завад.

NovelSat NS4 - це технологія супутникової передачі, яка найкраще підходить для адаптації до майбутніх тенденцій, таких як HTS, діапазон Ka, сузір'я LEO / MEO та постійно зростаючого попиту на супутникове відео та пропускну здатність даних.

1.5 Вплив коефіцієнта скруглення спектру (roll-off) на пропускну спроможність супутникового каналу телевізійного мовлення стандартів DVB-S2 та DVB-S2X

Чим більше є стиснутим спектр передачі сигналів, тим вище дозволена швидкість передачі даних або більше число користувачів, які можуть обслуговуватися одночасно. Це має велике значення для постачальників послуг зв'язку, оскільки більш ефективне використання доступної ширини смуги частот приносить більший дохід. Для більшості систем зв'язку основним завданням є максимальне звуження необхідної смуги частот системи.

Якщо змусити систему працювати з меншою смугою, ніж визначається обмеженням, то імпульси стануть витягнутими за часом, що, внаслідок збільшення міжсимвольної інтерференції, негативно позначиться на достовірності передачі. Більш розумним було б стиснення смуги інформаційних імпульсів до деякого розумного значення, яке більше мінімуму, визначеного Найквістом. Це виконується шляхом формування імпульсів за допомогою фільтра Найквіста. Якщо край смуги пропускання фільтра крутий, приблизно відповідний прямокутній формі (рис. 1.10 (а)), то спектр сигналу можна зробити більш компактним. У той же час використання подібного фільтра призводить до того, що тривалість імпульсного відгуку стає приблизно дорівнювати нескінченності, як показано на рис. 1.10 (б). Кожен імпульс накладається на всі імпульси послідовності. Тривалі відгуки дають хвости великих амплітуд близьких до головної пелюстки кожного імпульсу. Подібні хвости небажані, оскільки, як видно з рис. 1.10 (б), вони вносять нульову міжсимвольну інтерференцію тільки в тому випадку, якщо вибірка проводиться точно в відповідний момент часу; при великих хвостах навіть невеликі помилки синхронізації приведуть до міжсимвольної інтерференції. Отже, хоча компактний спектр і дозволяє оптимальним чином використовувати смугу, він виявляється дуже чутливим до помилок синхронізації, що призводить до збільшення міжсимвольної інтерференції [9].

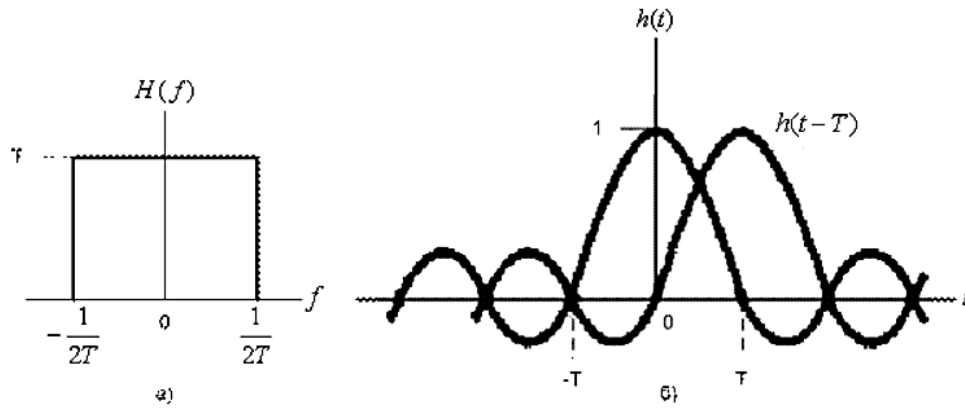


Рис. 1.10 Канали Найквіста для нульової міжсимвольної інтерференції:

- а) прямокутна передавальна функція системи $H(f)$; б) прийнятий імпульс $h(t) = \sin c(t/T)$

Приймаючий фільтр часто називається вирівнюючим, якщо він налаштовується на компенсацію спотворень, що вносяться передавачем і каналом. Іншими словами, конфігурація цього фільтра обрана так, щоб оптимізувати загальносистемну частотну передавальну функцію $H(f)$. Одна з часто використовуваних передавальних функцій $H(f)$ належить до класу функцій Найквіста і називається піднесеним косинусом (raised-cosine). Описується ця функція наступним виразом [9]:

$$H(f) = \begin{cases} 1 & \text{для } |f| < W - 2W_0 \\ \cos^2\left(\frac{\pi}{4} \frac{|f| + W - 2W_0}{W - W_0}\right) & \text{для } 2W_0 - W < |f| < W \\ 0 & \text{для } |f| > W \end{cases} \quad (1.1)$$

Тут W - максимальна ширина смуги, а $W_0 = \frac{1}{2T}$ - мінімальна ширина смуги по Найквісту для прямокутного спектра і ширина смуги за рівнем -6 дБ (або точка половинної амплітуди) для косинусоїдального спектру. Різниця $W - W_0$ називається «надлишком смуги» (excess bandwidth); вона визначає додаткову ширину смуги в порівнянні з мінімумом Найквіста. Коефіцієнт скруглення (roll-off factor) визначається як $r = (W - W_0)/W_0$, де $0 \leq r \leq 1$. Коефіцієнт скруглення - це надлишок смуги, поділений на ширину смуги за рівнем -6 дБ (тобто відносний надлишок смуги). Для даного W_0 вирівнювання r задає

необхідний надлишок відносно W_0 і характеризує крутизну фронту характеристики фільтра. На рис. 1.11 (а) для кількох значень коефіцієнта скруглення r ($r = 0$, $r = 0,5$ і $r = 1$) показана характеристика типу піднесеного косинуса. Випадок, коли $r = 0$, відповідає мінімальній ширині смуги по Найквісту. Відзначимо, що при $r = 1$ необхідний надлишок смуги дорівнює 100% і хвосту характеристики досить малі. Система з подібною спектральною характеристикою може підтримувати швидкість передачі символів R_c симв / с при використанні смуги в R_s , Гц (подвоєна мінімальна смуга по Найквісту), що дає ущільнення швидкості передачі, що дорівнює 1 симв / с / Гц. Імпульсний відгук, що відповідає функції $H(f)$ і визначається виразом (1.1), дорівнює наступному [9]:

$$h(t) = 2W_0(\sin c2W_0 t) \frac{\cos[2\pi(W - W_0)t]}{1 - [4(W - W_0)t]^2} \quad (1.2)$$

Цей імпульсний відгук зображений на рис. 1.11 (б) для $r = 0$, $r = 0,5$ і $r = 1$. Хвіст має нульові значення в кожен момент взяття вибірки, незалежно від значення коефіцієнта скруглення.

Фільтр, описаний рівнянням (1.1), і імпульс, представлений рівнянням (1.2), можна реалізувати тільки приблизно, оскільки, строго кажучи, спектр типу піднесеного косинуса фізично не може бути реалізований (причина та ж, що і при реалізації ідеального фільтра Найквіста). Реалізований фільтр повинен мати імпульсний відгук кінцевої тривалості і давати нульовий вихід до моменту включення імпульсу, що неможливо для сімейства характеристик типу піднесеного косинуса. Ці нереалізовані фільтри є непричинні (імпульсний відгук фільтра має нескінченну тривалість і фільтрований імпульс починається в момент $t = -\infty$). На практиці фільтр формування імпульсів повинен відповідати двом вимогам. Він повинен забезпечувати бажане згладжування і повинен бути реалізованим [9].

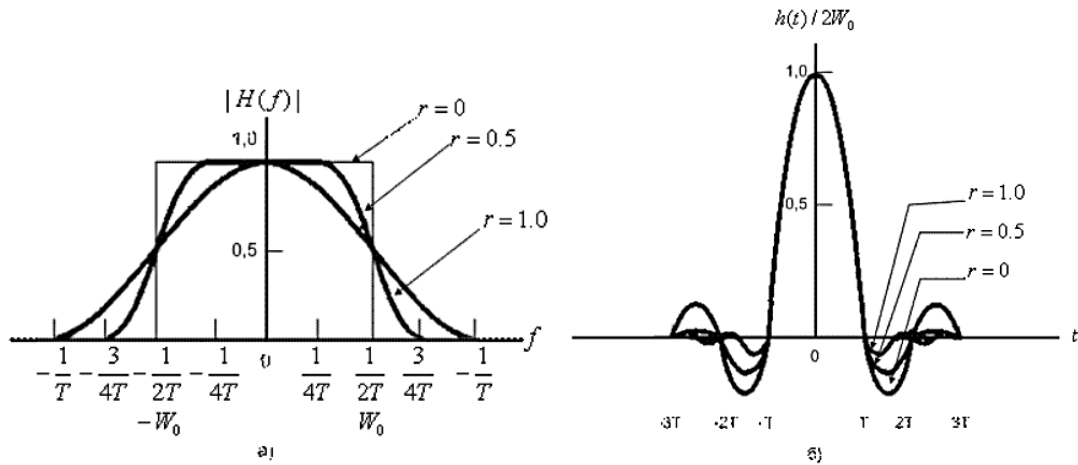


Рис . 1.11 Характеристики фільтрів типу піднесеного косинуса:
а) передавальна функція системи; б) імпульсний відгук системи

Використовуючи обмеження ширини смуги по Найквісту (мінімальна ширина смуги W , необхідна для підтримки швидкості R_s симв/с без міжсимвольної інтерференції, дорівнює $R_s/2$ Гц), можна вивести більш загальне співвідношення між необхідною смугою і швидкістю передачі символів, що включає коефіцієнт скруглення r .

$$W = \frac{1}{2}(1 + r)R_s \quad (1.3)$$

Таким чином, при $r = 0$ формула (1.3) описує мінімальну необхідну смугу для забезпечення ідеальної фільтрації по Найквісту. При $r > 0$, ширина смуги перевищує мінімум Найквіста; а отже, для цього випадку R_s менше подвоєної ширини смуги. Якщо демодулятор подає на вихід одну вибірку на символ, теорема про дискретне представлення Найквіста порушується, оскільки у нас залишається дуже мало вибірок для однозначного відновлення аналогового сигналу (присутні накладення).

Висновки до розділу

У першому розділі був проведений аналіз основних особливостей стандартів супутникового телевізійного мовлення DVB-S2 та DVB-S2X. Були виявленні основні відмінності, а саме у стандарті DVB-S2X:

- застосовуються багатопозиційні методи модуляції 64/128/256-APSK;
- були поліпшені алгоритми завадостійкого кодування;
- застосовуються менші значення коефіцієнта скруглення;
- були покращені схеми фільтрів, які роблять можливим зменшення проміжків між несучими.

Були розглянуті нові технології супутникового телевізійного мовлення Novelsat NS3 та Novelsat NS4. Остання є досить перспективною, оскільки може підвищити ефективність використання спектру на 45% без необхідності заміни апаратної частини.

Також було розглянуто вплив коефіцієнта скруглення спектру на пропускну спроможність супутникового каналу телевізійного мовлення стандартів DVB-S2 та DVB-S2x. Був зроблений висновок, що коефіцієнт скруглення визначає форму модульованих імпульсів: чим він нижчий, тим імпульси є більш прямокутними і менше розтягнутими по спектру, і тим більше інформації можна передати в одному і тому ж частотному каналі .

РОЗДІЛ №2 РОЗРАХУНОК ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЛІНІЇ СУПУТНИКОВОГО РАДІОМОВЛЕННЯ СТАНДАРТУ DVB-S2 та DVB-S2X ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ВИСОКОПОЗИЦІЙНИХ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ

2.1 Вихідні дані для розрахунку пропускної здатності лінії супутникового телевізійного мовлення

Для розрахунку пропускної здатності лінії супутникового телевізійного мовлення були використані наступні вихідні дані:

1. значення смуги частот Bandwidth = 10 МГц;
2. стандарт супутникового радіомовлення: DVB-S2 або DVB-S2X;
3. коефіцієнт скруглення Roll Off;
4. тип фрейму Frame Type = Normal;
5. режим роботи транспондера CarrPerTrans = single (з однією несучою);
6. частота появи помилкових кадрів FER = 10^{-5} ;
7. тип модуляції;
8. швидкість кодування.

2.2 Методика розрахунку пропускної здатності лінії супутникового телевізійного мовлення

Як відомо [9], смуги частот Δf_0 , Δf_1 , Δf_2 , зайняті сигналом DVB-S2 зі швидкістю символу R та коефіцієнтами згортання α_0 , α_1 , α_2 , відповідно рівні:

$$\Delta f_k = (1 + \alpha_k)R, k = \overline{0,2} \quad (2.1)$$

Тоді, якщо $\alpha_0 = 0,2$, $\alpha_1 = 0,15$, $\alpha_2 = 0,1$, то відносне зменшення $\delta\Delta f_{01}$ займаної сигналом DVB-S2 смуги частот при переході від використання коефіцієнта скруглення α_0 до α_1 , а також відносне $\delta\Delta f_{02}$ зменшення ширини смуги частот при переході від використання коефіцієнта скруглення α_0 до α_2 будуть відповідно рівні:

$$\delta\Delta f_{01} = \frac{\alpha_0 - \alpha_1}{1 + \alpha_0} \cdot 100\% \approx 4,2\%, \delta\Delta f_{02} = \frac{\alpha_0 - \alpha_2}{1 + \alpha_0} \cdot 100\% \approx 8,3\% \quad (2.2)$$

З іншого боку, якщо вважати, що смуга частот Δf , яку займає радіосигнал DVB-S2 на виході модулятора при будь-якому обраному значенні коефіцієнта скруглення $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ є постійною, то шукана символна швидкість буде дорівнювати:

$$R_k = \frac{\Delta f}{1+\alpha_k}, k = \overline{0,2} \quad (2.3)$$

При цьому бітова швидкість цифрового потоку, що переноситься сигналом DVB-S2 буде відповідно дорівнювати:

$$V_k = R_k \cdot \log_2 M, k = \overline{0,2}, \quad (2.4)$$

де $M = 4$ при модуляції QPSK и $M = 8$ при модуляції 8-PSK.

Тоді, відносне збільшення δR_{01} символної швидкості цифрового потоку, переданого в сигналі DVB-S2 при переході від використання коефіцієнта скруглення α_0 до α_1 , а також відносне збільшення δR_{02} символної швидкості при переході від використання коефіцієнта скруглення α_0 до α_2 , будуть відповідно рівні:

$$\delta R_{01} = \frac{\alpha_0 - \alpha_1}{1 + \alpha_1} \cdot 100\% \approx 4,3\%, \delta R_{02} = \frac{\alpha_0 - \alpha_2}{1 + \alpha_2} \cdot 100\% \approx 9,1\% \quad (2.5)$$

Тоді реальні значення символних швидкостей цифрового потоку, переданого за допомогою сигналу DVB-S2 при коефіцієнтах скруглення α_1 і α_2 будуть рівні:

$$R_1 = R_0(1 + 0,01\delta R_{01}) = 1,043R_0, R_2 = R_0(1 + 0,01\delta R_{01}) = 1,091R_0, \quad (2.6)$$

де R_0 – символна швидкість цифрового потоку при коефіцієнті скруглення α_0 .

При цьому збільшенні бітової швидкості ΔV_1 цифрового потоку при переході від використання коефіцієнта скруглення α_0 до α_1 , а також збільшення бітової швидкості ΔV_2 цифрового потоку при переході від використання коефіцієнта скруглення α_0 до α_2 відповідно дорівнюватимуть:

$$\Delta V_1 = \frac{\alpha_0 - \alpha_1}{(1 + \alpha_0)(1 + \alpha_1)} \cdot \Delta f \cdot \log_2 M, \Delta V_2 = \frac{\alpha_0 - \alpha_2}{(1 + \alpha_0)(1 + \alpha_2)} \cdot \Delta f \cdot \log_2 M \quad (2.7)$$

Таким чином, якщо, наприклад символна швидкість цифрового потоку дорівнюватиме $R_0 = 18$ Мсимв/с, а коефіцієнт скруглення дорівнює $\alpha_0 = 0,2$, то ширина спектра частот сигналу DVB-S2 дорівнюватиме $\Delta f = 21,6$ МГц. При

цьому бітова швидкість цифрового потоку, що переноситься сигналом DVB-S2, буде дорівнює $V_0 = 36$ Мбіт/с при використанні модуляції QPSK або $V_0 = 54$ Мбіт/с при використанні модуляції 8-PSK.

При формуванні сигналу DVB-S2 при переході до використання коефіцієнта скруглення $\alpha_1 = 0,15$ при тій же смузі частот $\Delta f = 21,6$ МГц символна швидкість може бути збільшена до $R_1 = 18,77$ Мсимв/с (що еквівалентно збільшенню бітової швидкості цифрового потоку на $\Delta V_1 = 1,54$ Мбіт/с при використанні модуляції QPSK і на $\Delta V_1 = 2,31$ Мбіт/с при використанні модуляції 8-PSK), а при $\alpha_2 = 0,1$ символна швидкість може бути збільшена до $R_2 = 19,64$ Мсимв/с (що еквівалентно збільшенню бітової швидкості цифрового потоку на $\Delta V_2 = 3,28$ Мбіт/с при використанні модуляції QPSK і на $\Delta V_2 = 4,92$ Мбіт/с при використанні модуляції 8-PSK).

2.3 Розрахунок пропускної здатності радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 та DVB-S2X при модуляції QPSK та різних значеннях коефіцієнту скруглення спектру (roll-off) з використанням NovelSat NS4 Calculator

Для розрахунку параметрів сигналів супутникового телевізійного мовлення стандартів DVB-S2 та DVB-S2X було використано калькулятор *NovelSat NS4 Calculator* [11]. Даний інструмент, застосовується для необхідності, аби розрахувати деталі щодо конкретних цифр оптимізації використання пропускної смуги завдяки використанню обраного стандарту зі змінними робочими параметрами.

Калькулятор *NovelSat* має три різні сценарії (рис. 2.1 – 2.3) для оцінки продуктивності модему:

- **Standard Performance Calculator;**
- **CeC Calculator;**
- **Spectral efficiency calculator.**

Standard Performance калькулятор дозволяє користувачеві оцінити продуктивність лінії зв'язку на основі різних вхідних даних.

NOVELSAT Calculator

Standard Calculator | Duet CeC Calculator | Spectral Efficiency Benchmark | Help

System Inputs

Constraint Type: Symbol Rate

Constraint Value: 10Mpsps

Optimization Type:

Given ModCod


Given Link Quality

Link Quality Type: CNR

Link Quality Value: 12dB

Phase Noise:

Phase Noise Mask: None



Line Mode		NS4
Roll Off		2%
Frame Type		Normal
Pilots		Yes
CarrPerTrans		Multi
FER		1E-5
Modulation		QPSK
Code Rate		1/4
Effective Code Rate		0.24
Symbol Rate	MBaud	10
Bandwidth	MHz	10.2
Info Rate	Mbits/sec	4.79
Spectral Efficiency	bits/sec/Hz	0.47
CNR Threshold	dB	-2.65
SNR Threshold	dB	-2.56
Eb/No Threshold	dB	0.64
Esat/No Threshold	dB	4.35
CNR	dB	-2.65
SNR	dB	-2.56
Eb/No	dB	0.64
Esat/No	dB	4.35
Link Margin	dB	0
OBO	dB	7
NLD	dB	0

Рис. 2.1 Інтерфейс **Standard Performance** калькулятора

CeC калькулятор, показує вплив придушення ехо-сигналу (carrier echo cancellation) на модульовані супутникові сигнали за допомогою NovelSat DUET CeC. NovelSat DUET CeC - це технологія повторного використання діапазону, що базується на програмному забезпеченні, що дозволяє одночасно використовувати однакову смугу частот як для висхідної, так і для низхідній лінії зв'язку, щоб максимально зменшити ефективну швидкість передачі даних у мережах точка-точка та точка-багатоточка.

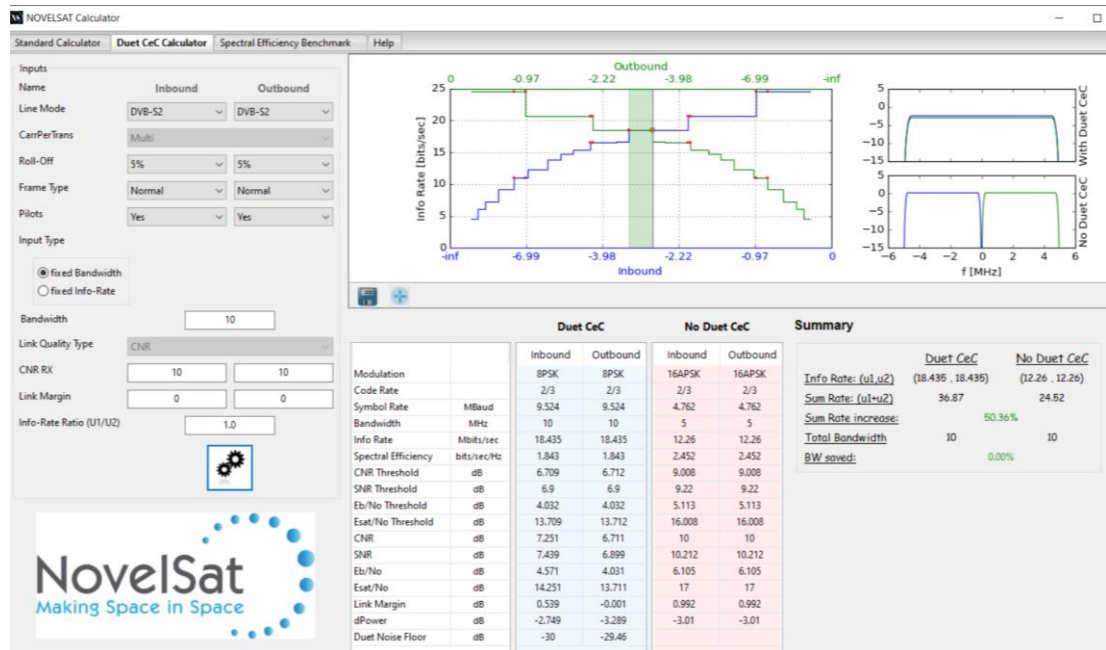


Рис. 2.2 Інтерфейс CeC калькулятора

Спектральну ефективність калькулятор показує спектральну ефективність, яку можна отримати в діапазоні CNR, при використанні обраного стандарту.

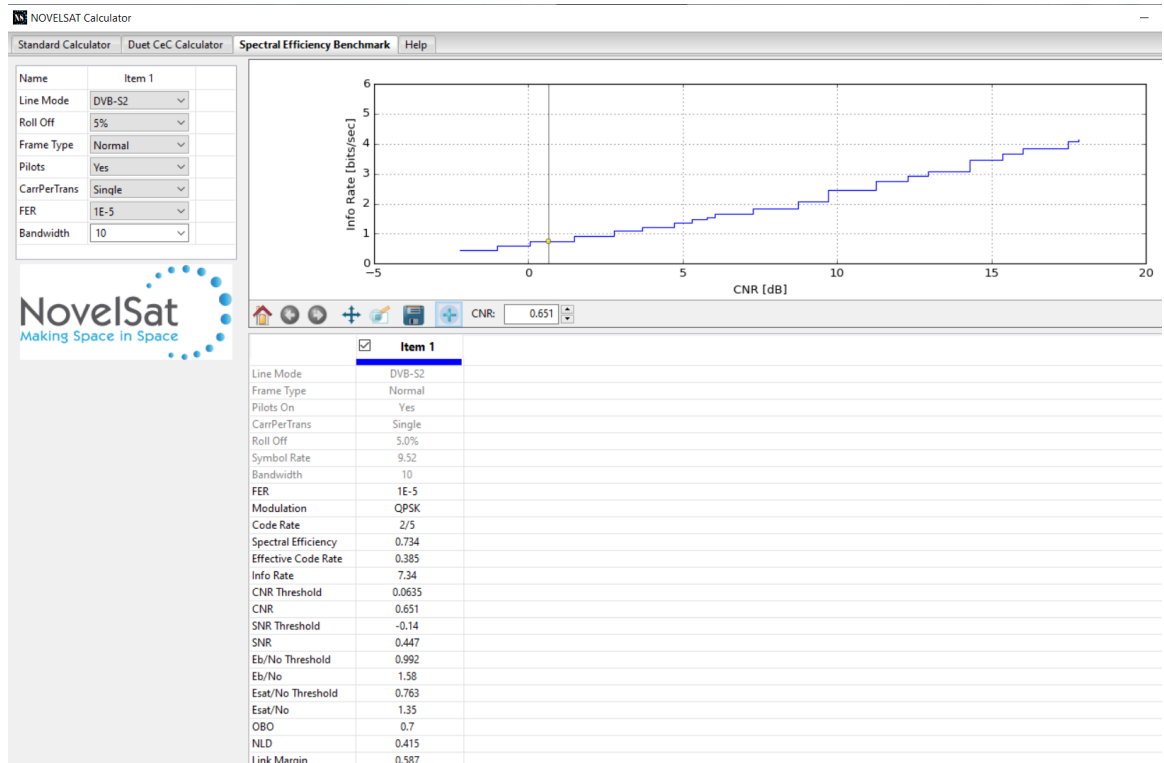


Рис. 2.3 Інтерфейс Spectral efficiency калькулятора

Розрахунок пропускної здатності радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 та DVB-S2X здійснювався за допомогою **Standard Performance** калькулятора.

Далі представлені результати розрахунків параметрів (Info Rate, Symbol Rate, CNR Threshold) сигналу DVB-S2 та DVB-S2X при різних значеннях коефіцієнту скруглення (табл. 2.1 – 2.8).

Таблиця 2.1 Вимірювання параметрів сигналу DVB-S2 при модуляції QPSK для різних значень коефіцієнту скруглення

5%			20%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Mpsps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Mpsps	CNR Threshold дБ
4,56	9,52	-2,22	3,99	8,33	-2,8
6,1	9,52	-1,02	5,34	8,33	-1,6
7,34	9,52	0,06	6,42	8,33	-0,52
9,19	9,52	1,47	8,04	8,33	0,89
11,05	9,52	2,77	9,67	8,33	2,19
12,29	9,52	3,68	10,76	8,33	3,1
13,83	9,52	4,73	12,1	8,33	4,15
14,76	9,52	5,3	12,91	8,33	4,72
15,38	9,52	5,79	13,46	8,33	5,21
16,42	9,52	6,69	14,37	8,33	6,38
16,63	9,52	7,16	14,55	8,33	6,58

25%			35%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Mpsps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Mpsps	CNR Threshold дБ
3,83	8	-2,98	3,55	7,41	-3,31
5,13	8	-1,77	4,75	7,41	-2,11
6,17	8	-0,69	5,71	7,41	-1,03
7,72	8	0,71	7,15	7,41	0,38
9,28	8	2,01	8,59	7,41	1,68
10,33	8	2,92	9,56	7,41	2,59
11,62	8	3,98	10,76	7,41	3,64
12,4	8	4,54	11,48	7,41	4,21
12,92	8	5,03	11,97	7,41	4,7
13,8	8	6,2	12,77	7,41	5,87
13,97	8	6,4	12,93	7,41	6,07

На рис. 2.4 представлений графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції QPSK для стандарту DVB-S2.

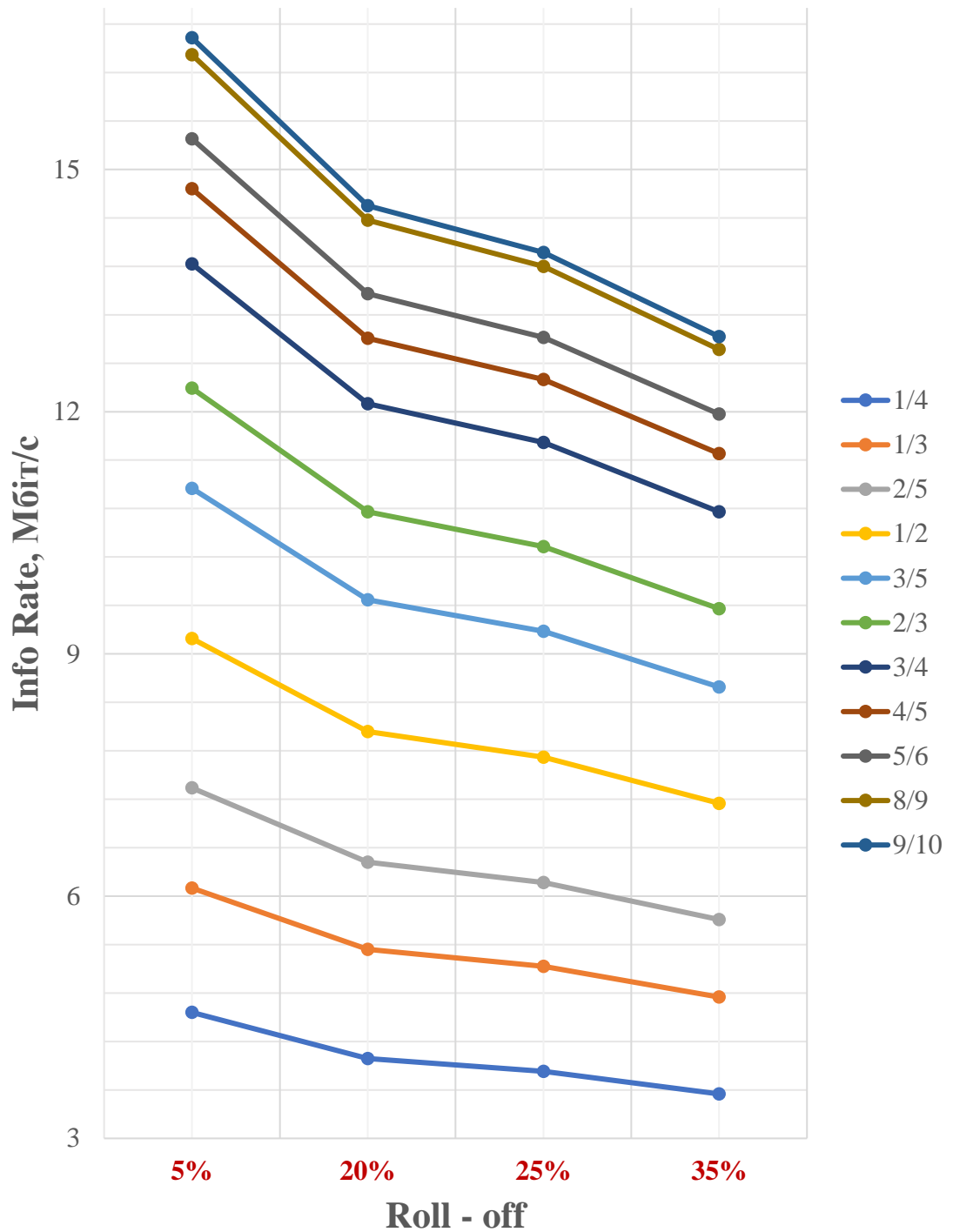


Рис. 2.4 Графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці QPSK для стандарту DVB-S2

На рис. 2.5 представлений графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці QPSK для стандарту DVB-S2.

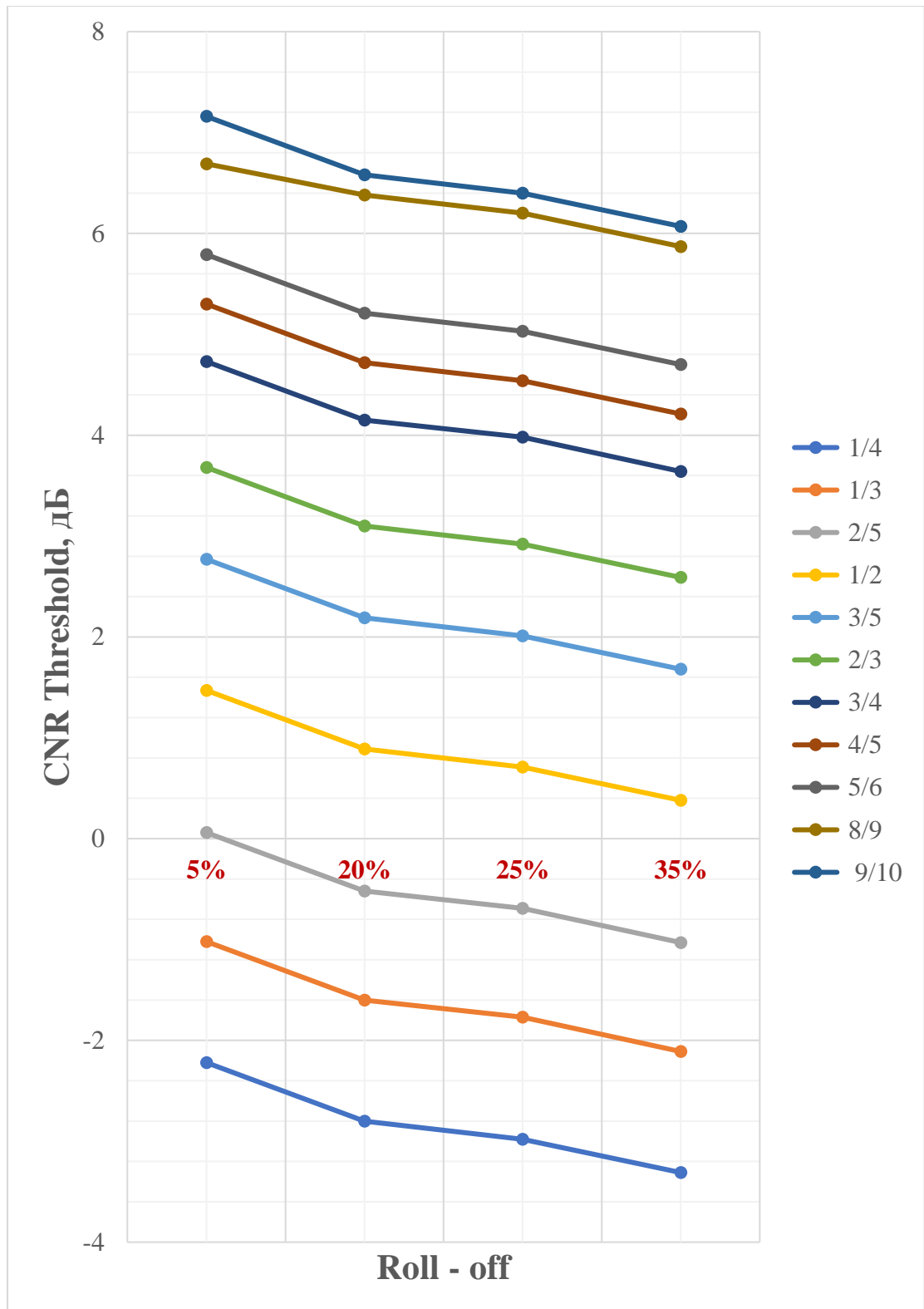


Рис. 2.5 Графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модульції QPSK для стандарту DVB-S2

Таблиця 2.2 Вимірювання параметрів сигналу DVB-S2X при модуляції QPSK для різних значень коефіцієнту скруглення

5%			10%			15%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ
4,56	9,52	-2,22	4,35	9,09	-2,42	4,16	8,7	-2,62
5,28	9,52	-1,17	5,04	9,09	-1,37	4,82	8,7	-1,57
6,1	9,52	-1,02	5,83	9,09	-1,22	5,57	8,7	-1,41
7,34	9,52	0,06	7,01	9,09	-0,14	6,7	8,7	-0,33
8,27	9,52	0,63	7,89	9,09	0,43	7,55	8,7	0,24
9,19	9,52	1,47	8,78	9,09	1,27	8,39	8,7	1,08
10,12	9,52	1,92	9,66	9,09	1,72	9,24	8,7	1,52
11,05	9,52	2,77	10,55	9,09	2,57	10,09	8,7	2,37
12,29	9,52	3,68	11,73	9,09	3,48	11,22	8,7	3,28
13,83	9,52	4,73	13,2	9,09	4,53	12,63	8,7	4,34
14,76	9,52	5,3	14,09	9,09	5,1	13,47	8,7	4,91
15,38	9,52	5,79	14,68	9,09	5,58	14,05	8,7	5,39
16,42	9,52	6,96	15,68	9,09	6,76	14,99	8,7	6,56
16,63	9,52	7,16	15,87	9,09	6,96	15,18	8,7	6,76

20%			25%			35%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ
3,99	8,33	-2,8	3,83	8	-2,98	3,55	7,41	-3,31
4,62	8,33	-1,75	4,43	8	-1,93	4,11	7,41	-2,26
5,34	8,33	-1,6	5,13	8	-1,77	4,75	7,41	-2,11
6,42	8,33	-0,52	6,17	8	-0,69	5,71	7,41	-1,03
7,23	8,33	0,05	6,94	8	-0,13	6,43	7,41	-0,46
8,04	8,33	0,89	7,72	8	0,71	7,15	7,41	0,38
8,86	8,33	1,34	8,5	8	1,16	7,87	7,41	0,83
9,67	8,33	2,19	9,28	8	2,01	8,59	7,41	1,68
10,76	8,33	3,1	10,33	8	2,92	9,56	7,41	2,59
12,1	8,33	4,15	11,62	8	3,98	10,76	7,41	3,64
12,91	8,33	4,72	12,4	8	4,54	11,48	7,41	4,21
13,46	8,33	5,21	12,92	8	5,03	11,97	7,41	4,7
14,37	8,33	6,38	13,8	8	6,2	12,77	7,41	5,87
14,55	8,33	6,58	13,97	8	6,4	12,93	7,41	6,07

На рис. 2.6 представлений графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці QPSK для стандарту DVB-S2X.

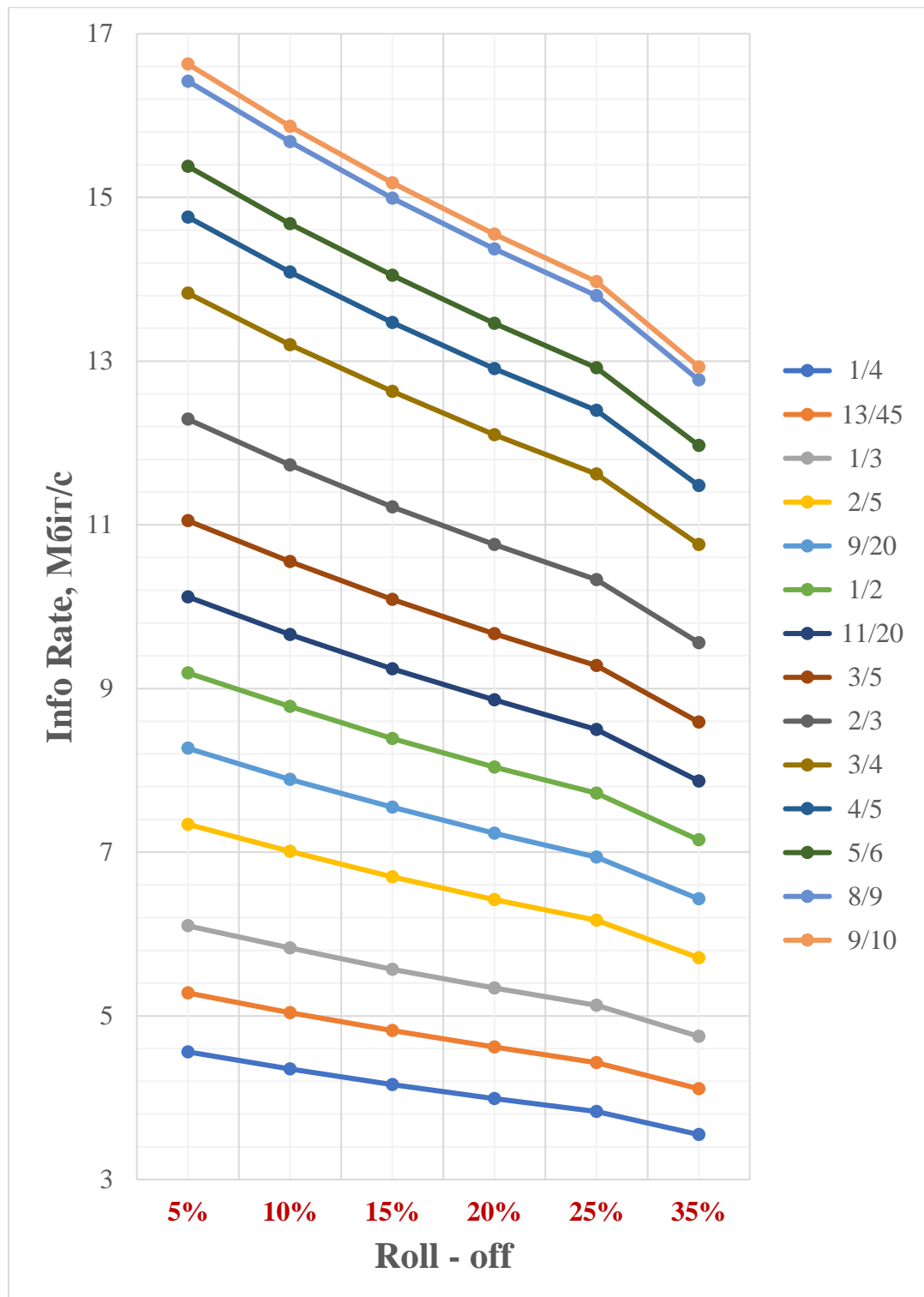


Рис. 2.6 Графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці QPSK для стандарту DVB-S2X

На рис. 2.7 представлений графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці QPSK для стандарту DVB-S2X.

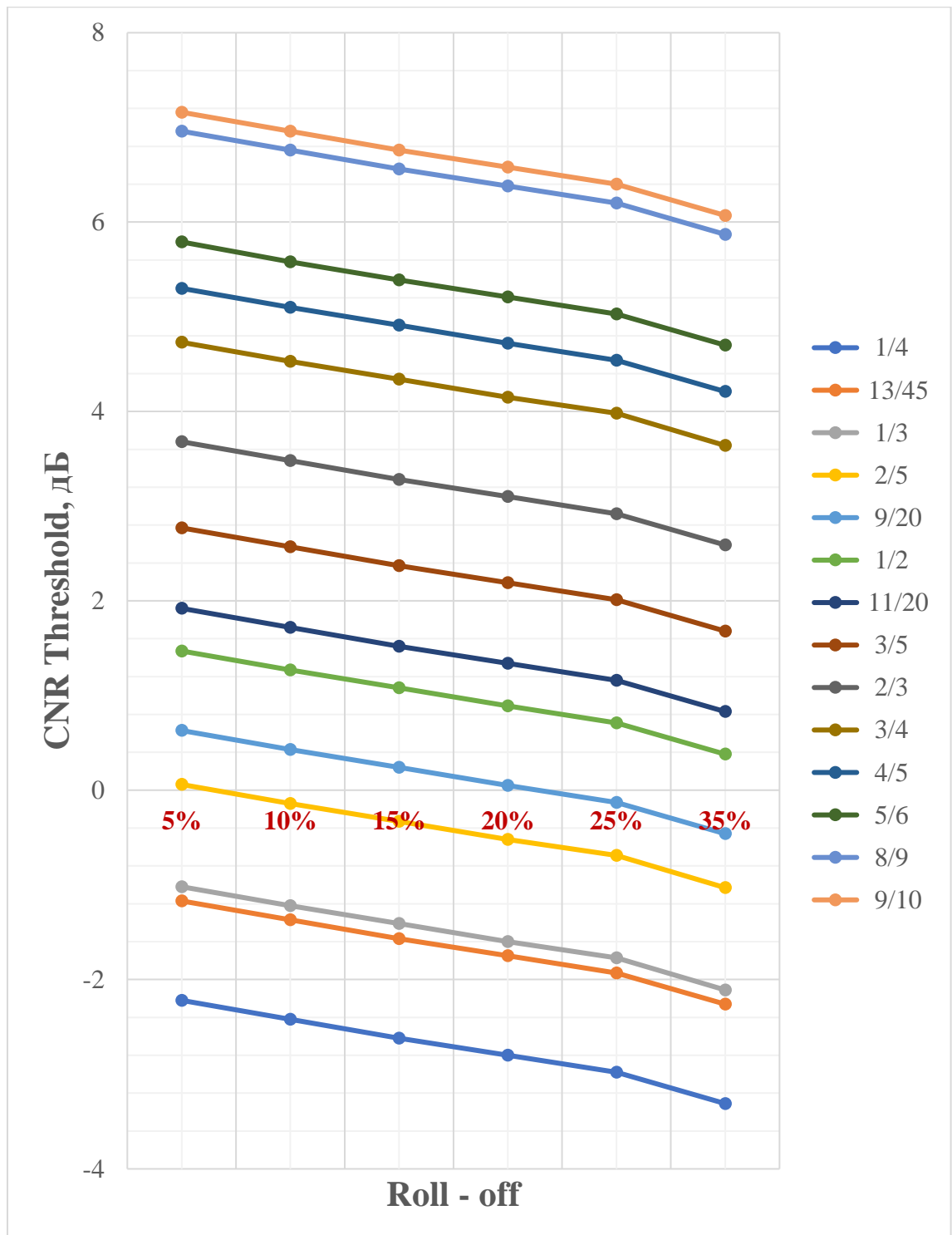


Рис. 2.7 Графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці QPSK для стандарту DVB-S2X

2.4 Розрахунок пропускної здатності радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 та DVB-S2X при модуляції 8-PSK та різних значеннях коефіцієнту скруглення спектру (roll-off)

Таблиця 2.3 Вимірювання параметрів сигналу DVB-S2 при модуляції 8-PSK для різних значень коефіцієнту скруглення

5%			20%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Mpsps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Mpsps	CNR Threshold дБ
16,57	9,52	6,03	14,5	8,33	5,45
18,43	9,52	7,26	16,13	8,33	6,68
20,74	9,52	8,72	18,15	8,33	8,14
23,07	9,52	10,43	20,19	8,33	9,85
24,63	9,52	11,88	21,55	8,33	11,3
24,94	9,52	12,28	21,82	8,33	11,7

25%			35%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Mpsps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Mpsps	CNR Threshold дБ
13,92	8	5,27	12,89	7,41	4,94
15,49	8	6,5	14,34	7,41	6,16
17,42	8	7,96	16,13	7,41	7,63
19,38	8	9,67	17,94	7,41	9,34
20,69	8	11,12	19,15	7,41	10,79
20,95	8	11,52	19,4	7,41	11,19

На рис. 2.8 представлений графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 8-PSK для стандарту DVB-S2.

На рис. 2.9 представлений графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 8-PSK для стандарту DVB-S2.

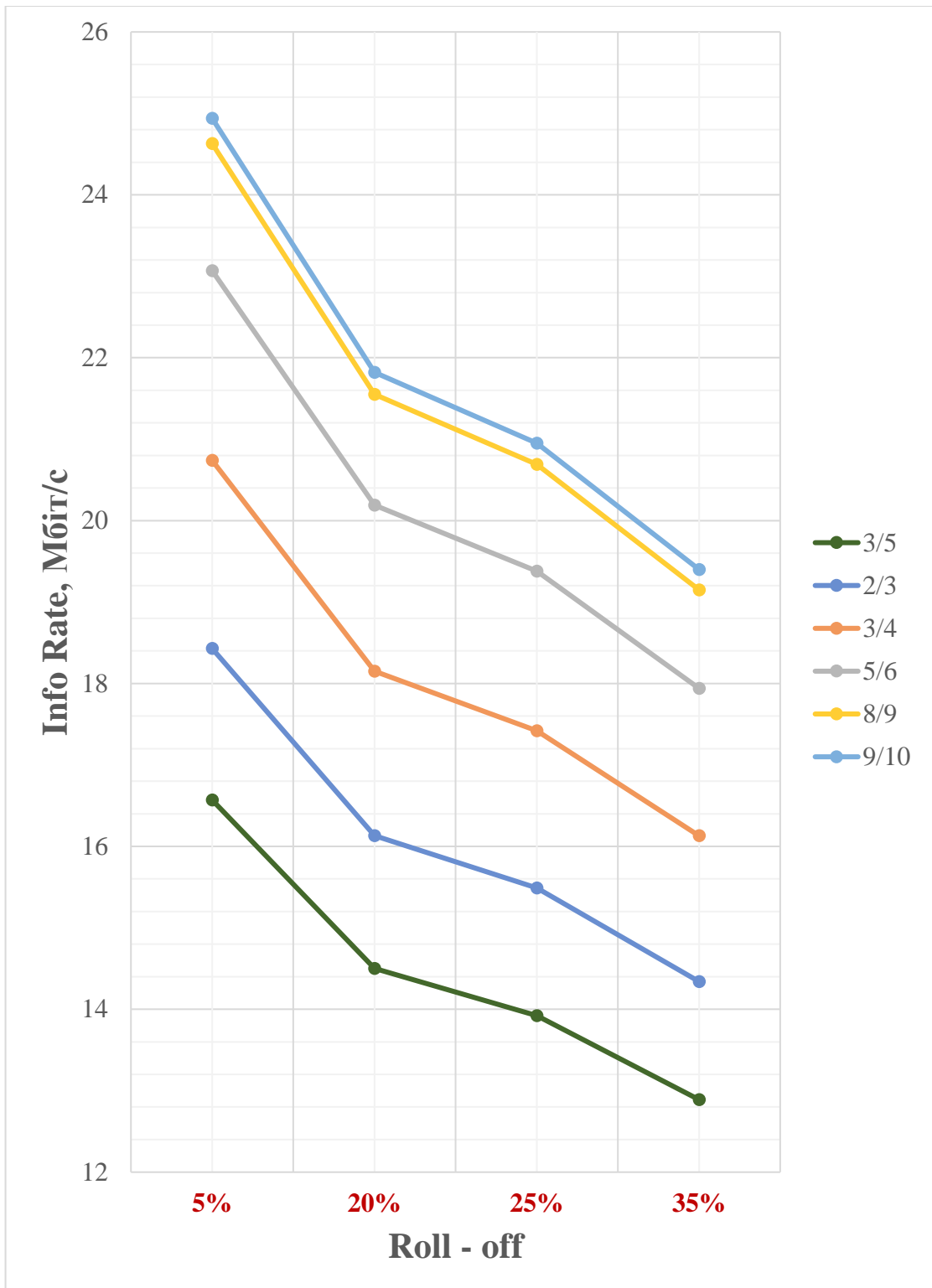
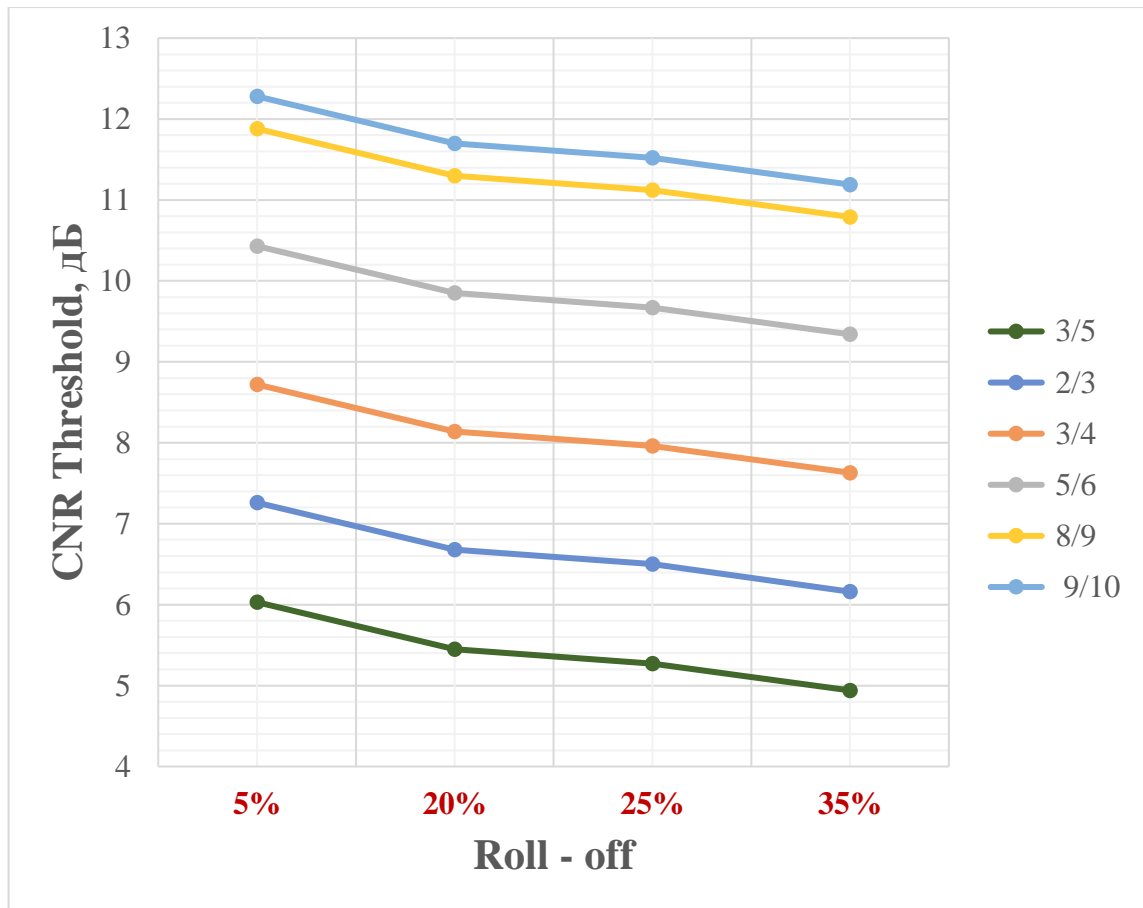


Рис. 2.8 Графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 8-PSK для стандарту DVB-S2



2.9 Графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 8-PSK для стандарту DVB-S2

Таблиця 2.4 Вимірювання параметрів сигналу DVB-S2X при модуляції 8-PSK для різних значень коефіцієнту скруглення

5%			10%			15%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ
16,57	9,52	6,13	15,81	9,09	5,93	15,13	8,7	5,74
17,65	9,52	6,74	16,85	9,09	6,54	16,11	8,7	6,35
18,43	9,52	7,34	17,6	9,09	7,13	16,83	8,7	6,94
19,19	9,52	7,68	18,32	9,09	7,48	17,52	8,7	7,29
19,97	9,52	8,27	19,06	9,09	8,06	18,23	8,7	7,87
20,74	9,52	8,77	19,8	9,09	8,57	18,94	8,7	8,37
23,07	9,52	10,45	22,02	9,09	10,25	21,06	8,7	10,06
24,63	9,52	11,88	23,51	9,09	11,68	22,49	8,7	11,49
24,94	9,52	12,28	23,8	9,09	12,08	22,77	8,7	11,88

20%			25%			35%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Mpsps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Mpsps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Mpsps	CNR Threshold дБ
14,5	8,33	5,55	13,92	8	5,37	12,89	7,41	5,04
15,44	8,33	6,16	14,82	8	5,98	13,73	7,41	5,65
16,13	8,33	6,76	15,49	8	6,58	14,34	7,41	6,24
16,79	8,33	7,1	16,12	8	6,92	14,93	7,41	6,59
17,47	8,33	7,69	16,77	8	7,51	15,53	7,41	7,17
18,15	8,33	8,19	17,42	8	8,01	16,13	7,41	7,68
20,19	8,33	9,87	19,38	8	9,7	17,94	7,41	9,36
21,55	8,33	11,3	20,69	8	11,13	19,15	7,41	10,79
21,82	8,33	11,7	20,95	8	11,52	19,4	7,41	11,19

На рис. 2.10 представлений графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 8-PSK для стандарту DVB-S2X.

На рис. 2.11 представлений графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 8-PSK для стандарту DVB-S2X.

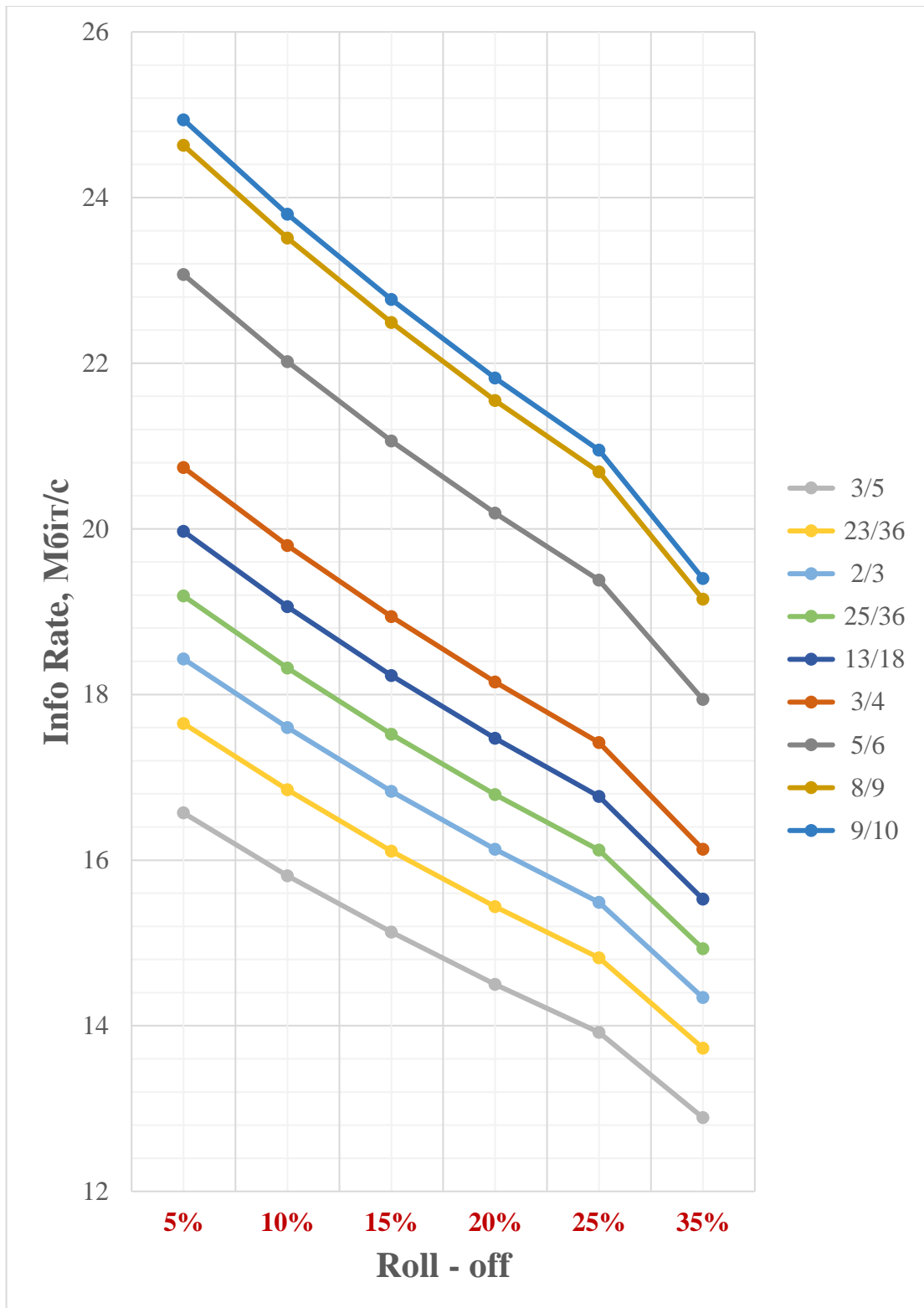


Рис. 2.10 Графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці 8-PSK для стандарту DVB-S2X

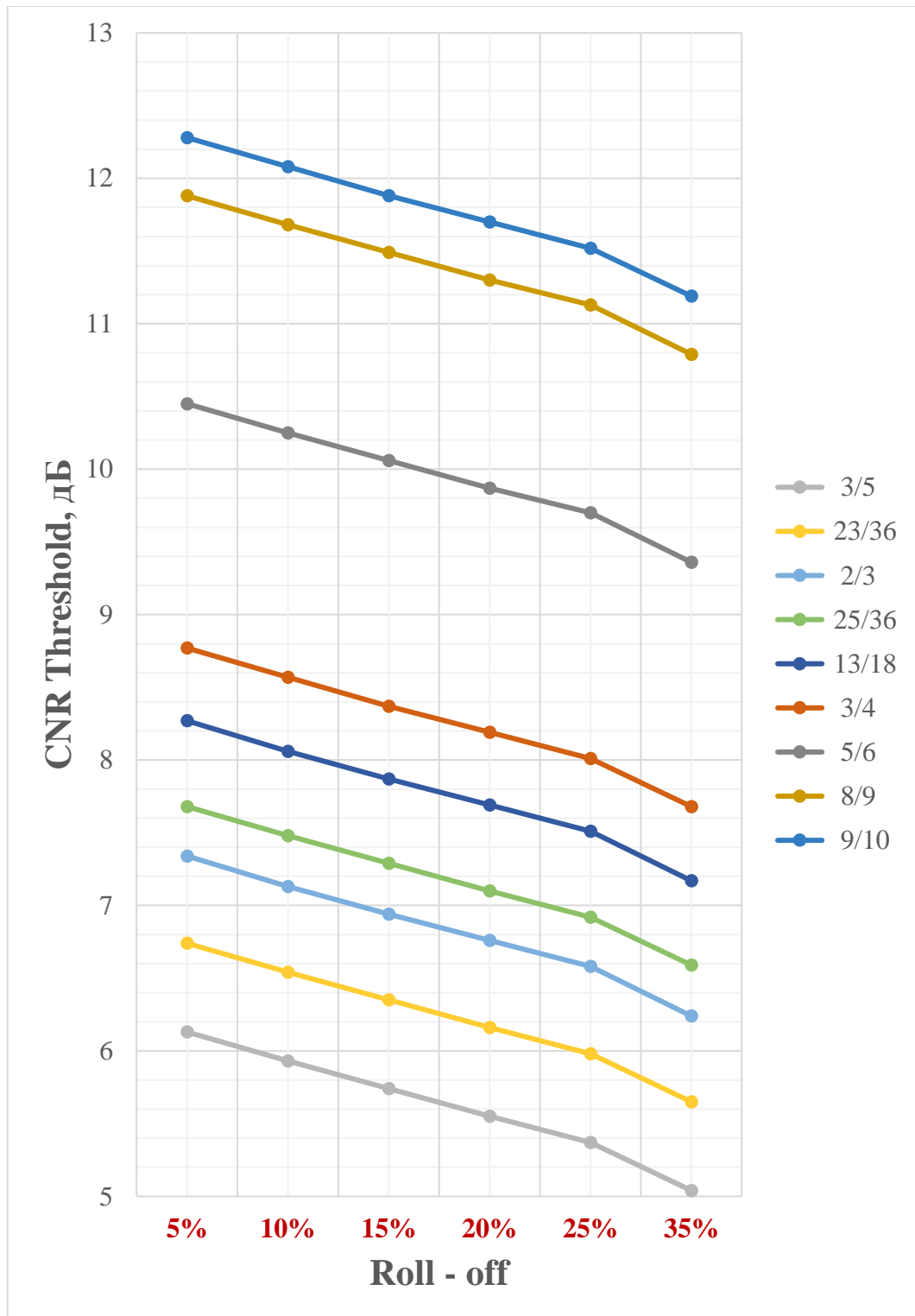


Рис. 2.11 Графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 8-PSK для стандарту DVB-S2X

2.5 Розрахунок пропускної здатності радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 та DVB-S2X при модуляції 16-APSK та різних значеннях коефіцієнту скруглення спектру (roll-off)

Таблиця 2.5 Вимірювання параметрів сигналу DVB-S2 при модуляції 16-APSK для різних значень коефіцієнту скруглення

5%			20%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ
24,52	9,52	9,7	21,46	8,33	9,12
27,58	9,52	11,24	24,14	8,33	10,66
29,43	9,52	12,28	25,75	8,33	11,7
30,68	9,52	12,95	26,85	8,33	12,37
32,76	9,52	14,45	28,66	8,33	13,87
33,17	9,52	14,95	29,02	8,33	14,37

25%			35%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ
20,6	8	8,94	19,07	7,41	8,61
23,17	8	10,49	21,45	7,41	10,15
24,72	8	11,52	22,89	7,41	11,18
25,77	8	12,19	23,87	7,41	11,86
27,52	8	13,69	25,48	7,41	13,36
27,86	8	14,19	25,8	7,41	13,86

На рис. 2.12 представлений графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 16-APSK для стандарту DVB-S2.

На рис. 2.13 представлений графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 16-APSK для стандарту DVB-S2.

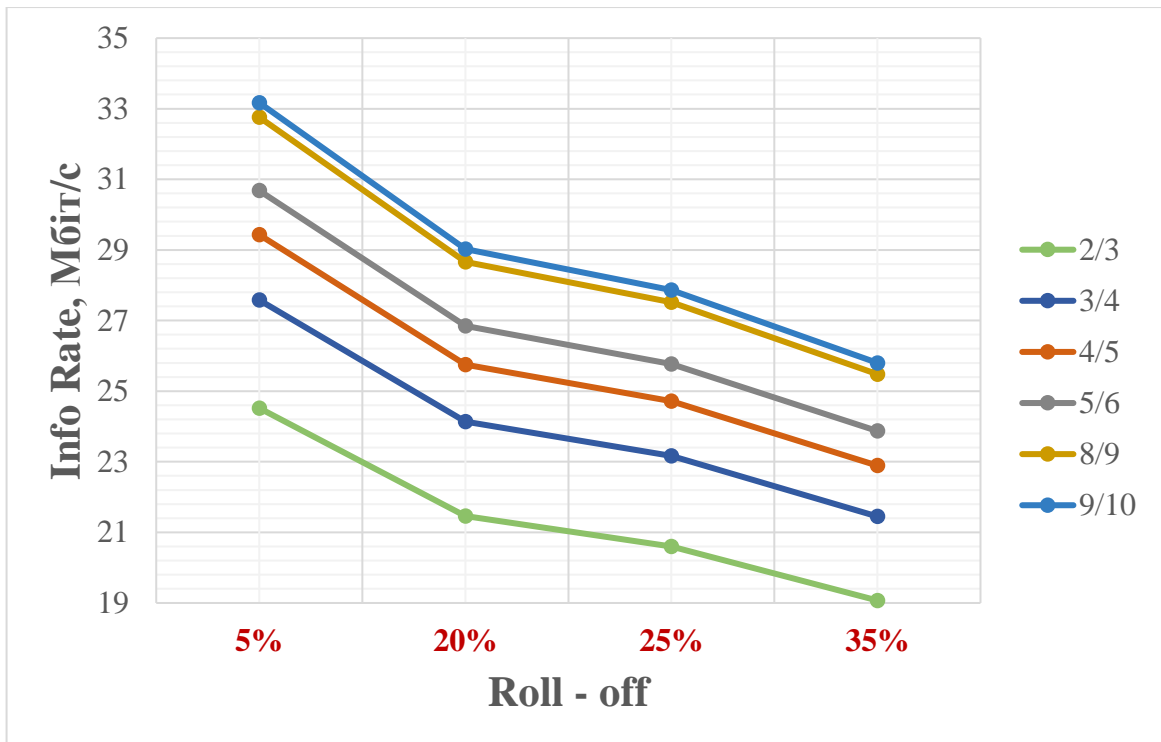


Рис. 2.12 Графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці 16-APSK для стандарту DVB-S2

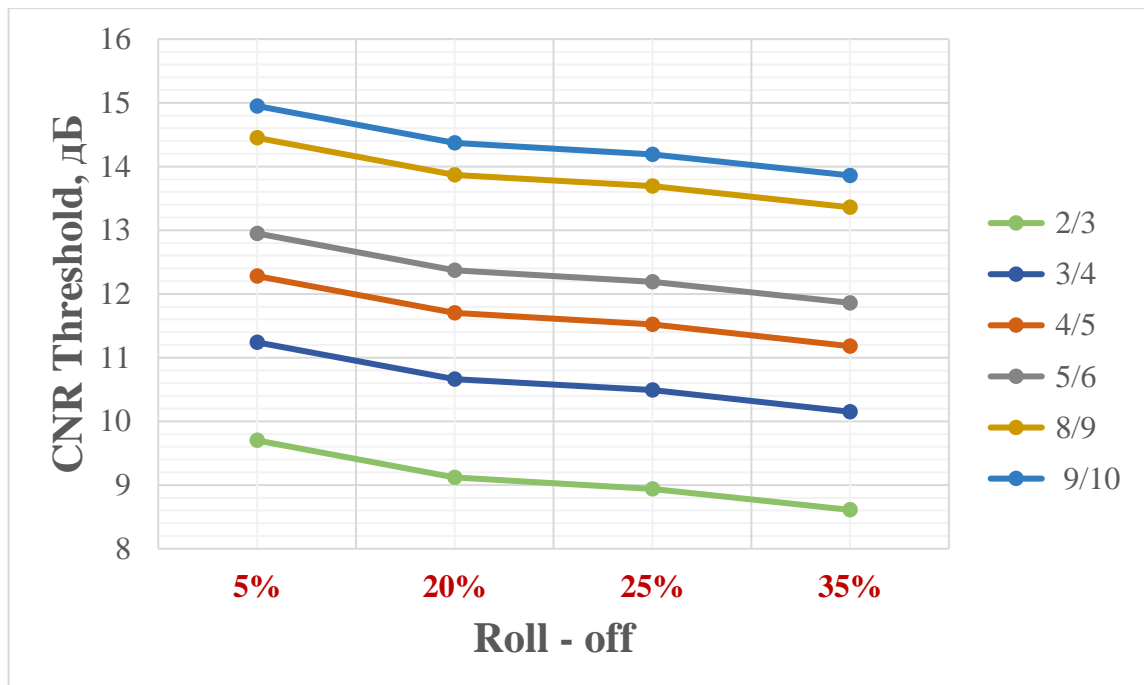


Рис. 2.13 Графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці 16-APSK для стандарту DVB-S2

Таблиця 2.6 Вимірювання параметрів сигналу DVB-S2X при модуляції 16-APSK для різних значень коефіцієнту скруглення

5%			10%			15%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ
21,21	9,52	12,6	20,25	9,09	12,4	19,37	8,7	12,21
22,04	9,52	8,8	21,03	9,09	8,6	20,12	8,7	8,4
22,86	9,52	9,09	21,82	9,09	8,89	20,87	8,7	8,7
23,47	9,52	9,27	22,41	9,09	9,06	21,43	8,7	8,87
24,52	9,52	10,03	23,41	9,09	9,83	22,39	8,7	9,64
25,53	9,52	10,3	24,37	9,09	10,09	23,31	8,7	9,9
26,56	9,52	10,87	25,35	9,09	10,67	24,25	8,7	10,48
27,58	9,52	11,46	26,33	9,09	11,26	25,19	8,7	11,06
28,61	9,52	11,78	27,31	9,09	11,58	26,12	8,7	11,39
29,43	9,52	12,42	28,1	9,09	12,22	26,87	8,7	12,02
30,68	9,52	13,04	29,29	9,09	12,84	28,02	8,7	12,65
31,49	9,52	13,14	30,06	9,09	12,94	28,75	8,7	12,74
32,76	9,52	14,47	31,27	9,09	14,26	29,91	8,7	14,07
33,17	9,52	14,95	31,66	9,09	14,75	30,28	8,7	14,55

20%			25%			35%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ
18,56	8,33	12,02	17,82	8	11,85	16,5	7,41	11,51
19,28	8,33	8,22	18,51	8	8,04	17,14	7,41	7,71
20	8,33	8,51	19,2	8	8,34	17,78	7,41	8
20,54	8,33	8,69	19,72	8	8,51	18,26	7,41	8,17
21,46	8,33	9,45	20,6	8	9,27	19,07	7,41	8,94
22,34	8,33	9,72	21,44	8	9,54	19,86	7,41	9,21
23,24	8,33	10,29	22,31	8	10,12	20,66	7,41	9,78
24,14	8,33	10,88	23,17	8	10,7	21,45	7,41	10,37
25,03	8,33	11,2	24,03	8	11,03	22,25	7,41	10,69
25,75	8,33	11,84	24,72	8	11,66	22,89	7,41	11,33
26,85	8,33	12,46	25,77	8	12,29	23,87	7,41	11,95
27,55	8,33	12,56	26,45	8	12,38	24,49	7,41	12,05
28,66	8,33	13,89	27,52	8	13,71	25,48	7,41	13,37
29,02	8,33	14,37	27,86	8	14,19	25,8	7,41	13,86

На рис. 2.14 представлений графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 16-APSK для стандарту DVB-S2X.

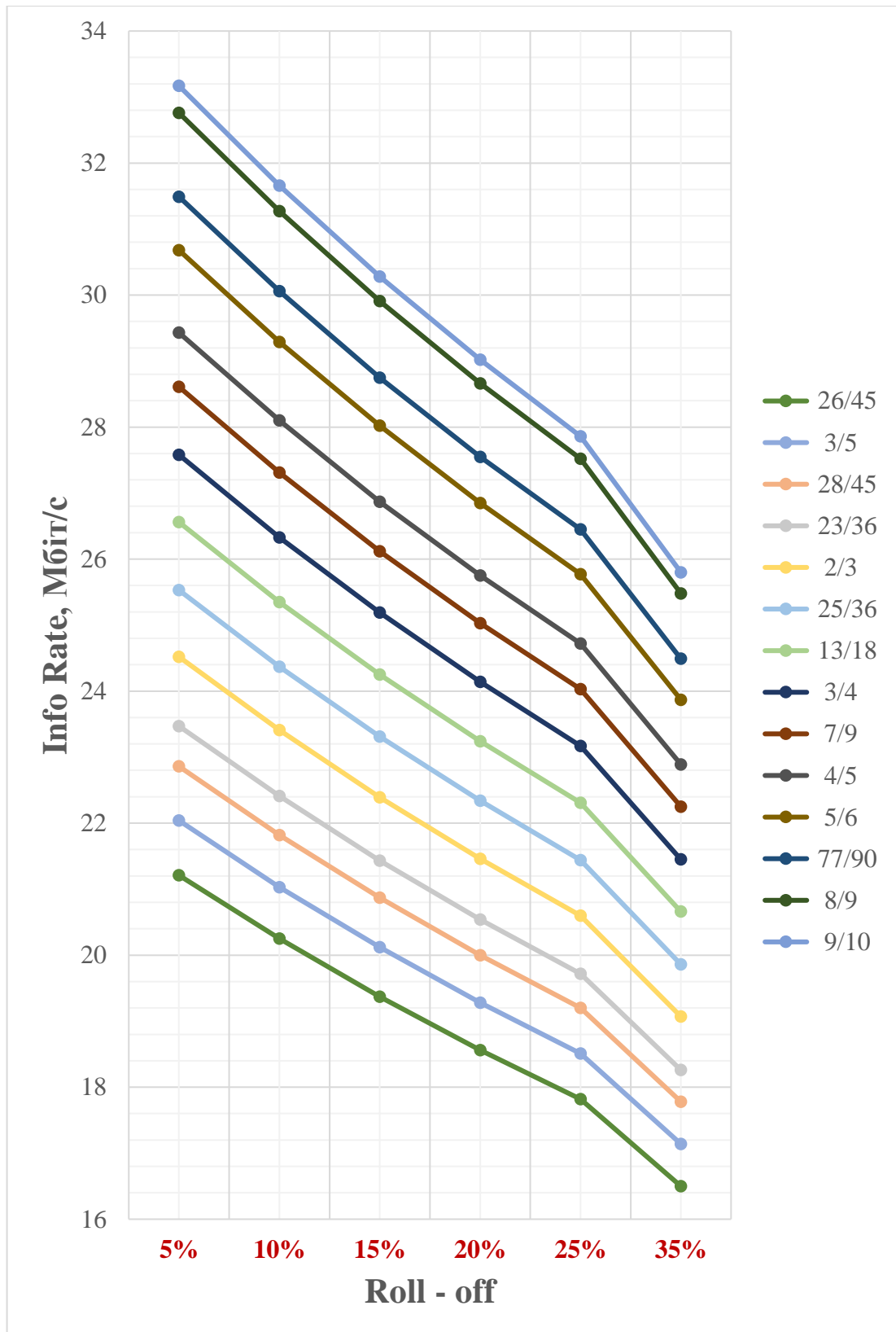


Рис. 2.14 Графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці 16-APSK для стандарту DVB-S2X

На рис. 2.15 представлений графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці 16-APSK для стандарту DVB-S2X.

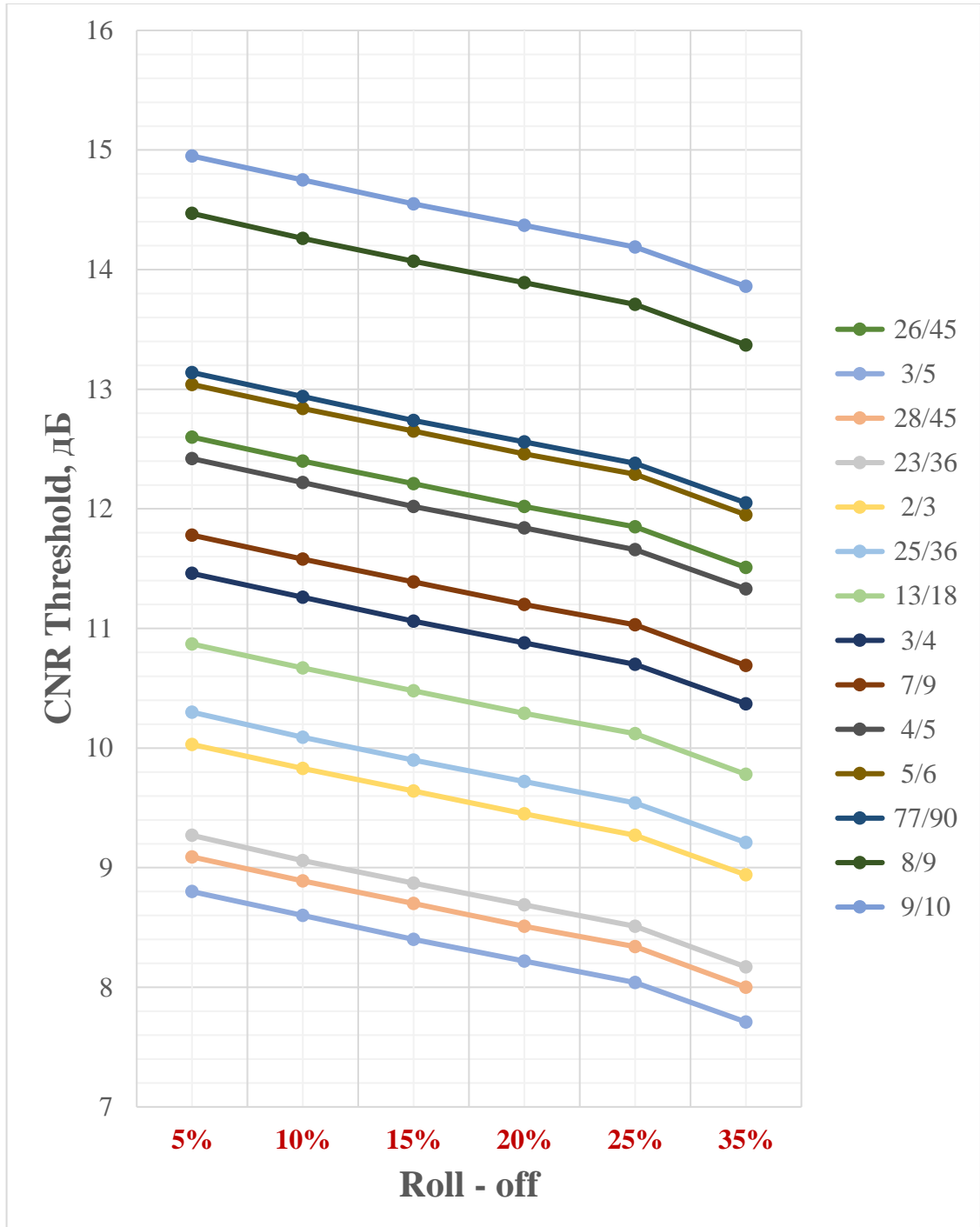


Рис. 2.15 Графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці 16-APSK для стандарту DVB-S2X

2.6 Розрахунок пропускної здатності радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 та DVB-S2X при модуляції 32-APSK та різних значеннях коефіцієнту скруглення спектру (roll-off)

Таблиця 2.7 Вимірювання параметрів сигналу DVB-S2 при модуляції 32-APSK для різних значень коефіцієнту скруглення

5%			20%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ
34,51	9,52	14,29	30,19	8,33	13,71
36,82	9,52	15,36	32,22	8,33	14,78
38,39	9,52	16,01	33,59	8,33	15,43
40,98	9,52	17,48	35,86	8,33	16,9
41,49	9,52	17,81	36,31	8,33	17,23

25%			35%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ
28,99	8	13,53	26,84	7,41	13,2
30,93	8	14,6	28,64	7,41	14,27
32,24	8	15,26	29,86	7,41	14,92
34,42	8	16,72	31,87	7,41	16,38
34,86	8	17,05	32,27	7,41	16,72

На рис. 2.16 представлений графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 32-APSK для стандарту DVB-S2.

На рис. 2.17 представлений графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 32-APSK для стандарту DVB-S2.

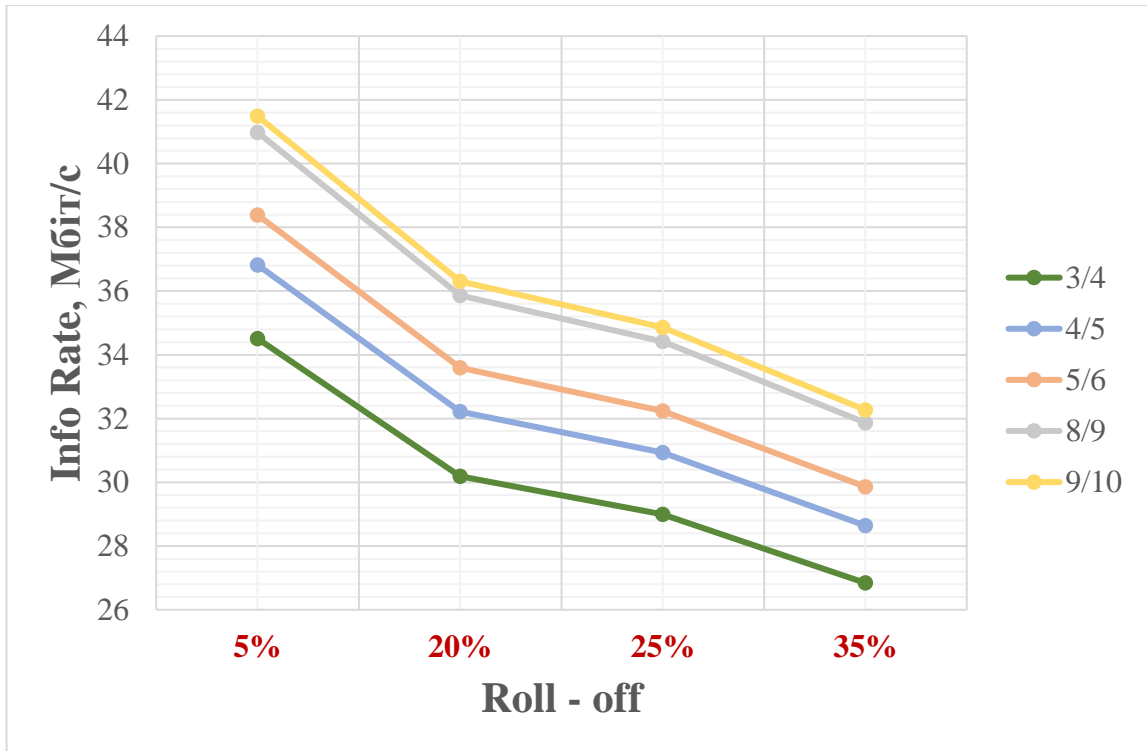


Рис. 2.16 Графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 32-APSK для стандарту DVB-S2

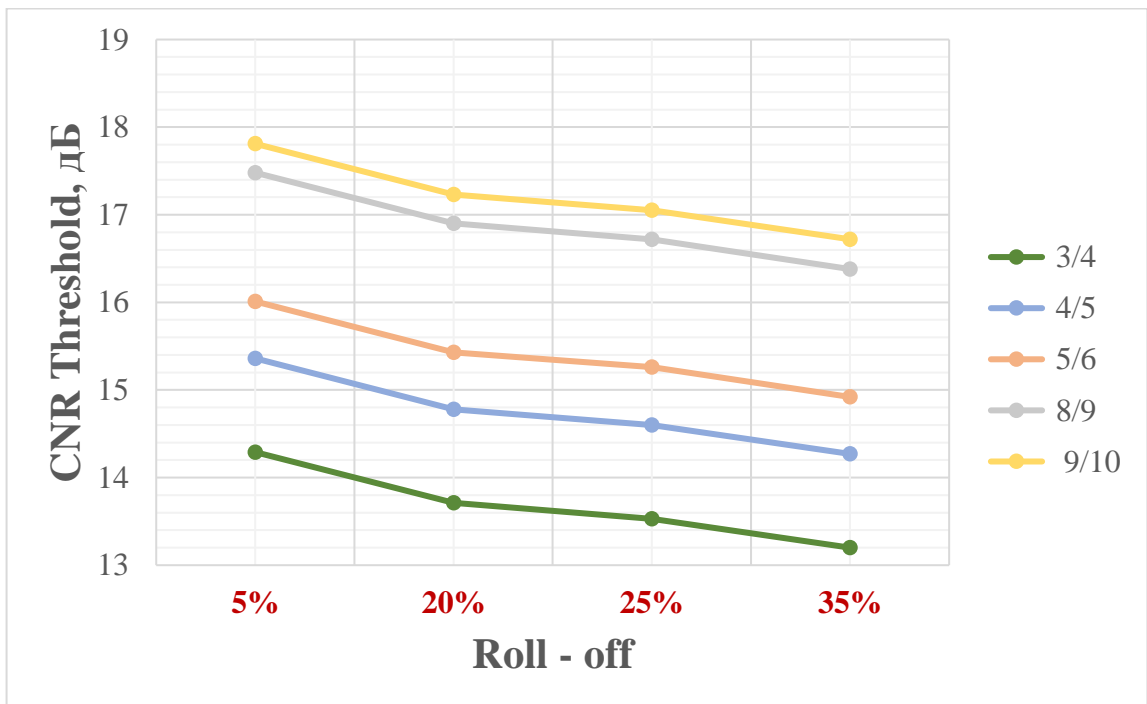


Рис. 2.17 Графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 32-APSK для стандарту DVB-S2

Таблиця 2.8 Вимірювання параметрів сигналу DVB-S2X при модуляції 32-APSK для різних значень коефіцієнту скруглення

5%			10%			15%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ
32,71	9,52	13,57	31,22	9,09	13,36	29,86	8,7	13,17
33,74	9,52	13,59	32,2	9,09	13,39	30,8	8,7	13,2
34,51	9,52	14,4	32,94	9,09	14,19	31,51	8,7	14
35,79	9,52	14,49	34,17	9,09	14,29	32,68	8,7	14,1
36,82	9,52	15,43	35,15	9,09	15,23	33,62	8,7	15,03
38,39	9,52	16,06	36,64	9,09	15,86	35,05	8,7	15,67
40,98	9,52	17,48	39,12	9,09	17,28	37,42	8,7	17,09
41,49	9,52	17,81	39,61	9,09	17,61	37,89	8,7	17,41

20%			25%			35%		
Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ	Info Rate Мбит/с	Symbol Rate Msps	CNR Threshold дБ
28,62	8,33	12,99	27,48	8	12,81	25,44	7,41	12,47
29,52	8,33	13,01	28,34	8	12,84	26,24	7,41	12,5
30,19	8,33	13,82	28,99	8	13,64	26,84	7,41	13,3
31,32	8,33	13,91	30,07	8	13,73	27,84	7,41	13,4
32,22	8,33	14,85	30,93	8	14,67	28,64	7,41	14,34
33,59	8,33	15,78	32,24	8	15,31	29,86	7,41	14,97
35,86	8,33	16,9	34,42	8	16,73	31,87	7,41	16,39
36,31	8,33	17,23	34,86	8	17,05	32,27	7,41	16,72

На рис. 2.18 представлений графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 32-APSK для стандарту DVB-S2X.

На рис. 2.19 представлений графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 32-APSK для стандарту DVB-S2X.

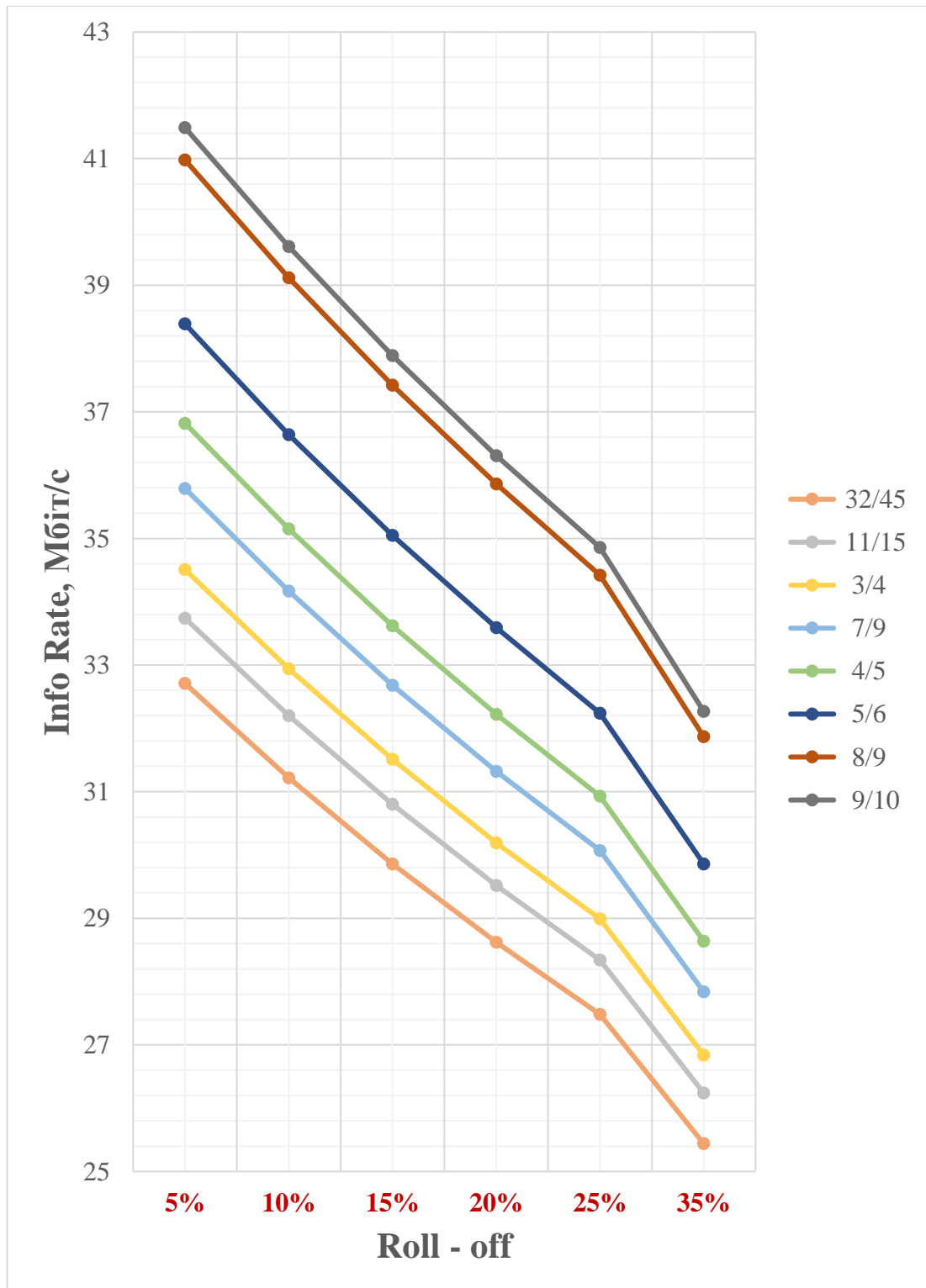


Рис. 2.18 Графік залежності швидкості передачі інформації від різних значень коефіцієнта скруглення при модульці 32-APSK для стандарту DVB-S2X

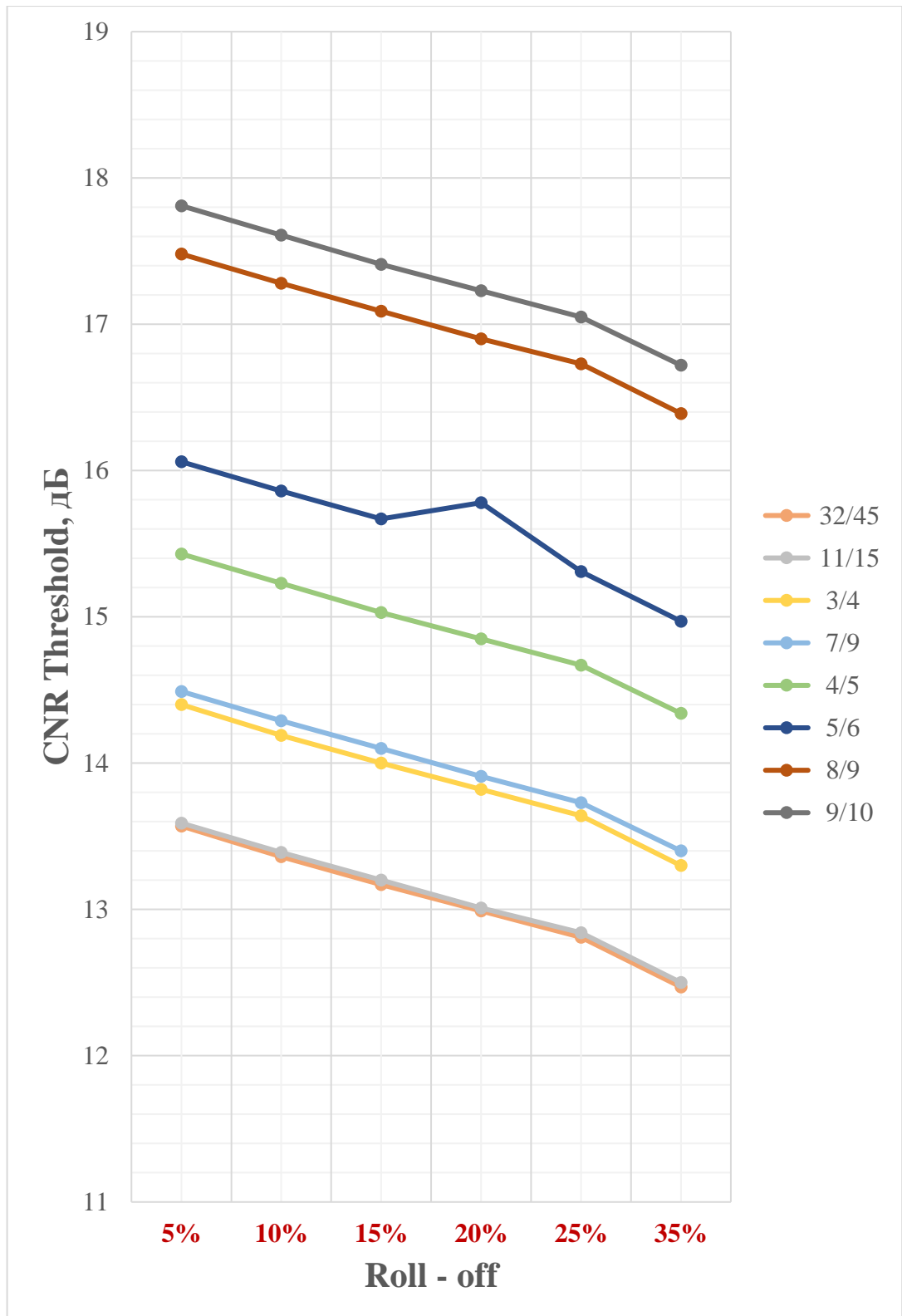


Рис. 2.19 Графік залежності мінімально необхідного відношення несуча/шум від різних значень коефіцієнта скруглення при модуляції 32-APSK для стандарту DVB-S2X

Висновки до розділу

1. Таким чином, результати аналітичних розрахунків показують, що при зменшенні коефіцієнту скруглення швидкість передачі інформації збільшується.
2. Зменшення коефіцієнту скруглення призводить до збільшення символної швидкості.
3. Також при зменшенні коефіцієнту скруглення спостерігається збільшення мінімально необхідного відношення несуча/шум, що забезпечує гарну якість прийому та зменшення інтенсивності бітових помилок.

Можна зробити висновок, що за рахунок введення в стандарти DVB-S2 та DVB-S2X більш різноманітних схем модуляції, використання більш ефективних систем захисного кодування і введення додаткових коефіцієнтів скруглення, що забезпечують крутіші фронти модульованого сигналу, призвели до збільшення ефективності використання транспортного потоку. Тобто дало можливість в смузі стандартного каналу передавати більше біт корисної інформації.

РОЗДІЛ №3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТУ ЛІНІЇ СУПУТНИКОВОГО МОВЛЕННЯ СТАНДАРТУ DVB-S2

3.1 Постановка задачі дослідження

Мета – довести формування цифрового телевізійного сигналу DVB-S2 з багатопрограмного MPEG TS з використанням трансиверу Nuand BladeRF x40 SDR та програмного середовища GNURadio з подальшою оцінкою якості сформованого DVB-S2 сигналу.

Основні **завдання**, які було поставлено:

- показати як змінюється відношення сигнал/шум в приймачі при різних значеннях коефіцієнту скруглення (roll-off);
- показати як змінюється форма спектру сигналу при зменшенні коефіцієнту скруглення та збільшенні кількості відводів (порядку) цифрового фільтру Найквіста.

3.2 Методика проведення експериментального дослідження

Для дослідження параметрів сигналу супутникового телевізійного мовлення стандарту DVB-S2 було зібрано схему рис. 3.1 на базі одного персонального комп'ютера з операційною системою Windows 10 та віртуального персонального комп'ютера (віртуальна машина) з операційною системою Ubuntu 18.04. Фізично супутниковий приймач та трансивер BladeRFx40 підключені до материнської плати персонального комп'ютера, але програмою всі функції управління трансивером передані віртуальній машині, тобто саме вона управляє роботою цього трансиверу.

Віртуальна машина була реалізована за допомогою програми «VMware Workstation Pro», що була встановлена на персональному комп'ютері.

Для роботи з трансивером BladeRFx40 була використана віртуальна машина з операційною системою Ubuntu 18.04 і встановленою на ній бібліотекою драйверів. Установка драйверів для BladeRFx40 виконувалася в

три етапи з сервісу ІТ-проектів GitHub: 1) установка бібліотеки драйверів зі сховищ PPA; 2) установка бібліотеки libbladerf для роботи BladeRFx40 із середовищем GNURadio; 3) установка прошивки мікронтоллера і FPGA bladerf-fpga-hostedx40. Після встановлення зазначених бібліотек було можливо здійснювати управління основними параметрами трансивера BladeRFx40 за допомогою консольної програми bladeRF-cli у вікні терміналу Ubuntu. Перелік основних команд консолі bladeRF-cli, які використовувалися для налаштування трансивера BladeRFx40 представлені в таблиці 3.1.

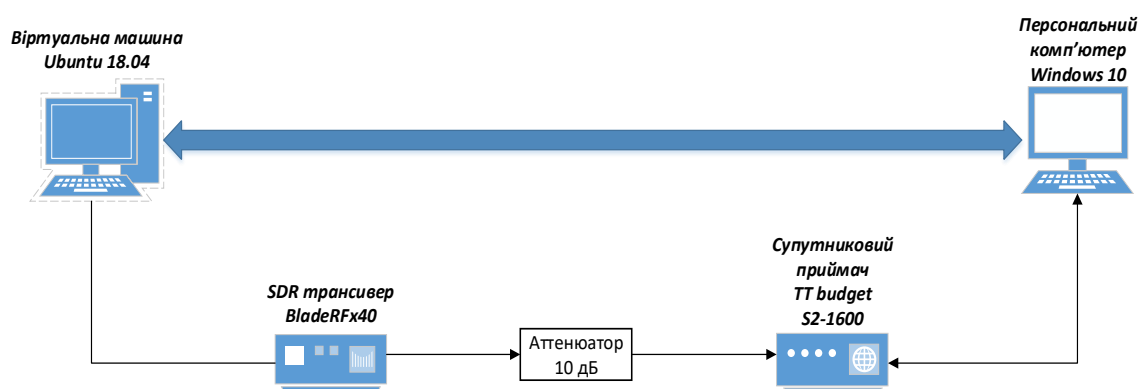


Рис. 3.1 Схема для дослідження параметрів сигналу супутникового телевізійного мовлення стандарту DVB-S2

Табл. 3.1 Перелік основних команд консолі bladeRF-cli, які використовувалися для налаштування трансивера BladeRFx40

Назва команди	Призначення
print	Отримання інформації про встановленні значення деяких параметрів (bandwidth, frequency, sample rate, tx gain)
set frequency	Встановлення частоти передаючого/приймального тракту трансивера
cal lms	Калібрування I/Q каналів трансивера
cal dc tx	Калібрування значення постійної складової I і Q - каналів передавального тракту трансивера

В результаті роботи з консоллю bladeRF-cli за допомогою команди `set frequency tx 1500M` була встановлена вихідна частота передавального тракту трансивера, що дорівнює $f_0 = 1500$ МГц.

Для формування радіосигналу стандарту DVB-S2 на віртуальній машині у програмному середовищі GNURadio було зібрано узагальнену блок-схему модулятора DVB-S2, яка показана на рис. 3.2 (додаток схема GNURadio) і включає такі елементи:

- 1) блок «Джерело файлу», в параметрах якого вказується шлях до файлу із записаним транспортним потоком з розширенням *.ts;
- 2) генератор заголовків поточкових кадрів (BBHeader);
- 3) скремблер поточкових кадрів (BBScrambler);
- 4) BCH-кодер;
- 5) LDPC-кодер;
- 6) інтерлівер (переміжувач);
- 7) модулятор;
- 8) генератор PLP- кадрів (Physical layer Frammer);
- 9) FFT-фільтр;
- 10) приймач даних (osmosom Sink) – інтерфейс між програмною та апаратною частиною BladeRF x40.

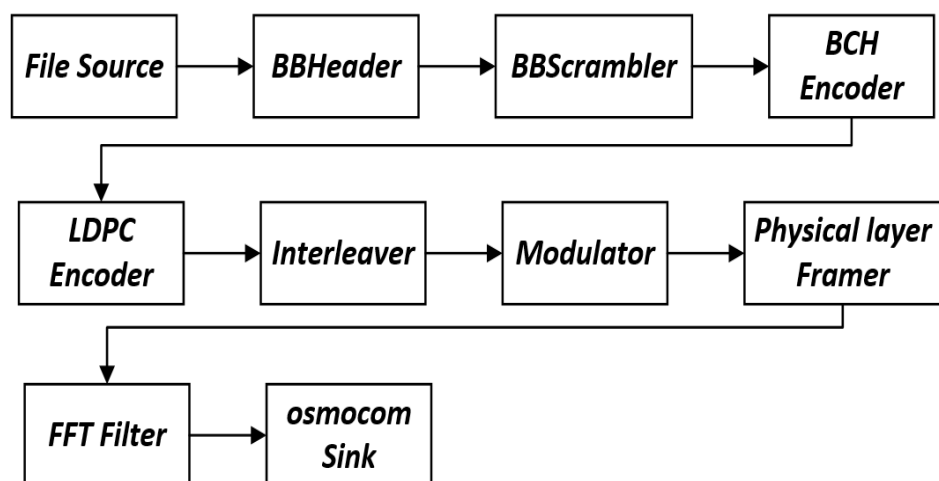


Рис. 3.2 Узагальнена блок-схема моделі ПЗ модулятора DVB S2 в програмному середовищі GNURadio

Крім того, модель DVB-S2 модулятора додатково (на рис. 3.2 не показано) включала в себе блоки: 1) вибору символної швидкості; 2) вибору roll-off; 3) вибору кількості відводів цифрового фільтра; 4) вибору коефіцієнтів посилення 1-го і 2-го підсилювача передавального тракту `vga1_gain`, `vga2_gain`; 5) графічного віджета відображення спектру сигналу.

В блоках: формувач заголовка ВВ (baseband) фреймів, скремблер ВВ фреймів (BBscrambler), BCH-енкодер (BCH Encoder), LDPC-енкодер (LDPC Encoder), перемежувач (Interleaver), блок модулятора сімейства DVB-S2X (DVB-S2X Modulator), формувач фреймів фізичного рівня (Physical Layer Framer) було встановлено тип модуляції QPSK або 8-PSK, швидкість кодування та коефіцієнт скруглення (рис. 3.3).

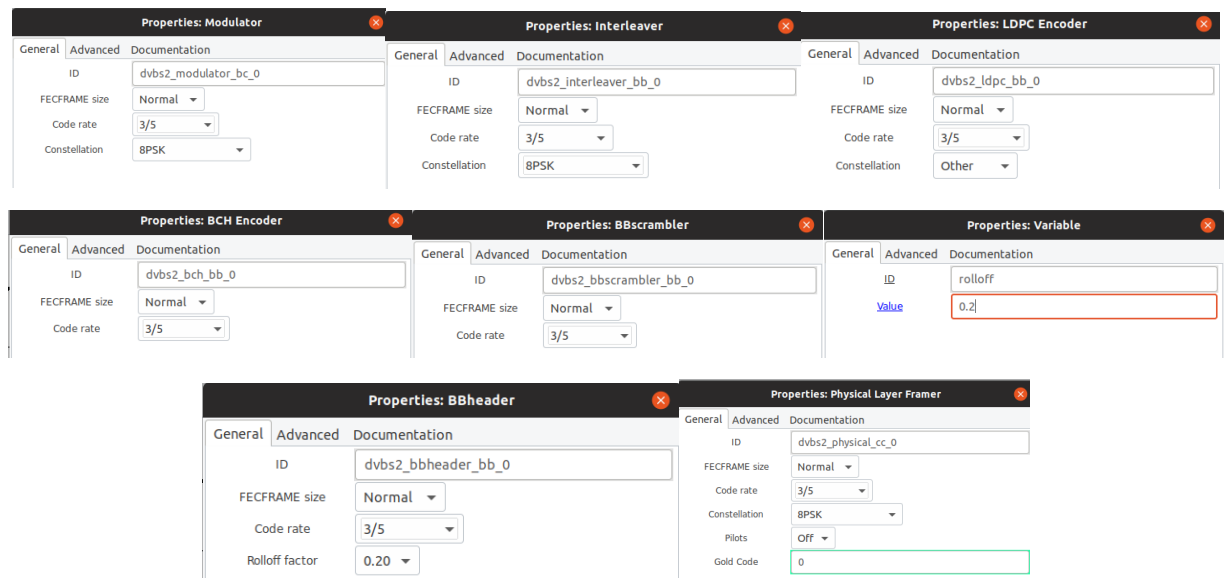


Рис. 3.3 Вікна блоків, в яких були встановленні данні про тип модуляції, швидкість кодування та коефіцієнт скруглення

Після запуску компілятора моделі було отримано спектр сигналу, який показано на рис. 3.3.

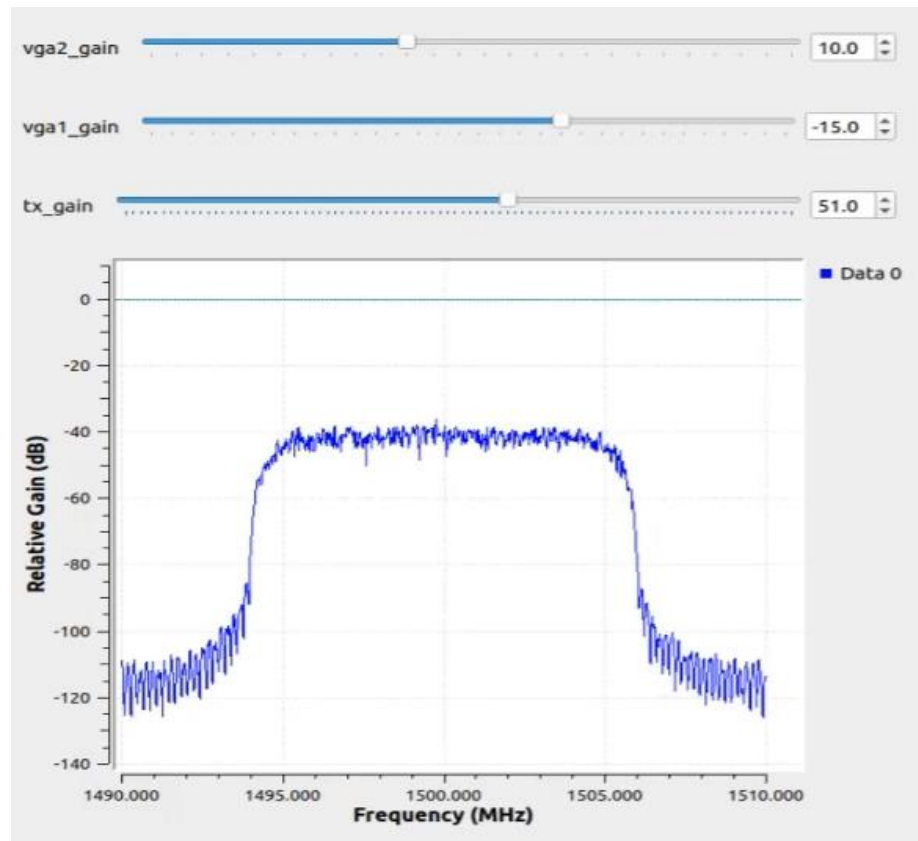


Рис. 3.4 Спектр сигналу в GNURadio у вікні QT GUI

Далі на комп'ютері було запущено програму CrazyScan, яка керує роботою супутникового приймача TT Budget S2-1600 для отримання спектру прийнятого сигналу та сигнального сузір'я (рис. 3.5 – 3.6). Результати були оформлені у вигляді таблиць 3.2 – 3.15. Також по відповідним таблицям були побудовані графіки (рис. 3.15 та 3.23) для наочності.

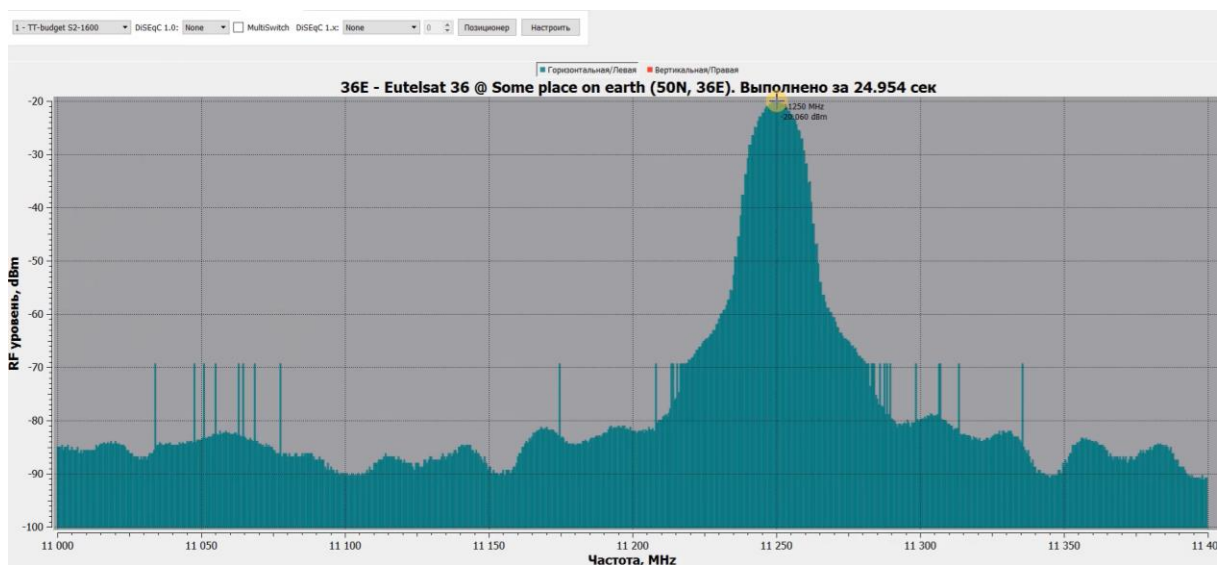
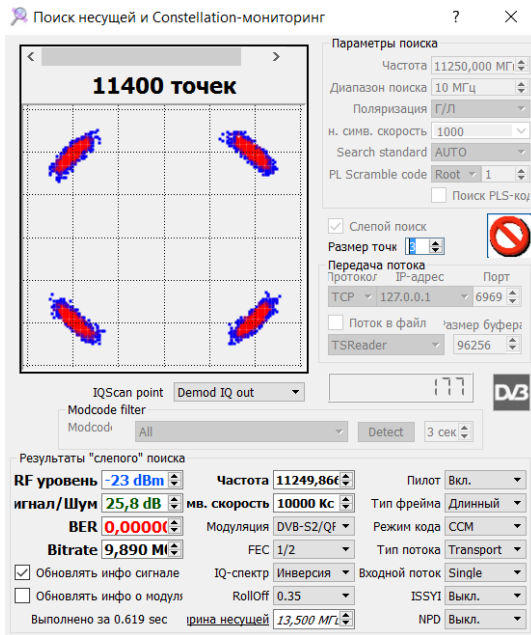


Рис. 3.5 Спектр прийнятого сигналу у програмі Crazy Scan

Продовження таблиці 3.2

Рівень сигналу, дБм	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23
SNR, дБ	25,8	27,1	25,3	24,2	24,9	24,6	24,5	24,3	23,9	23,5

Roll-off = 0,35 (35%)



Roll-off = 0,001 (0,1%)

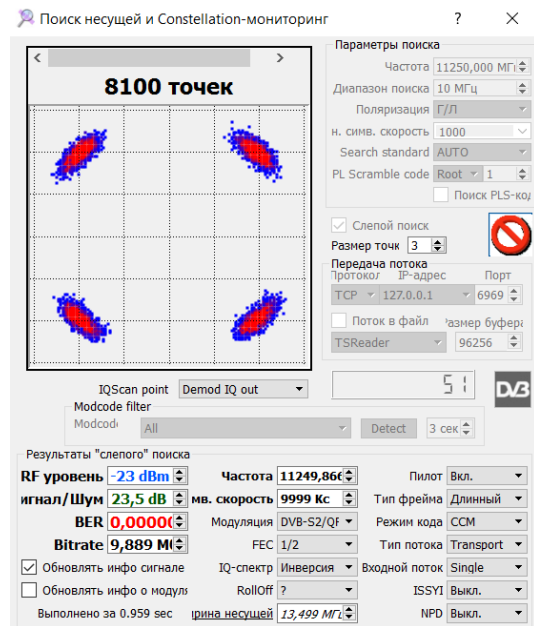


Рис. 3.7 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.3 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції QPSK та FEC = 3/5

QPSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	11,89	11,89	11,89	11,89	11,89	11,89	11,89	11,89	11,89	11,89
FEC	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5
Рівень сигналу, дБм	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23
SNR, дБ	26,5	26,0	24,8	23,4	24,5	23,9	23,9	23,8	23,3	23,5

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

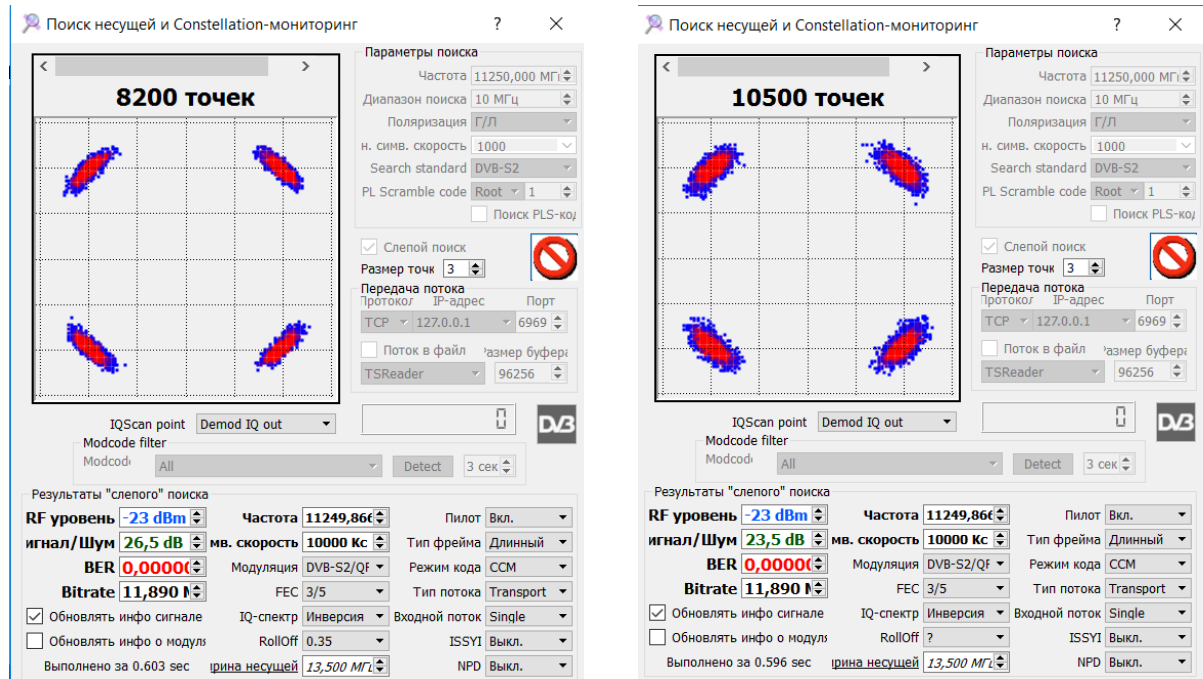


Рис. 3.8 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.4 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції QPSK та FEC = 2/3

QPSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23	13,23
FEC	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3
Рівень сигналу, дБм	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23
SNR, дБ	26,5	26,0	24,9	23,5	24,8	24,3	24,1	23,8	23,5	23,3

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

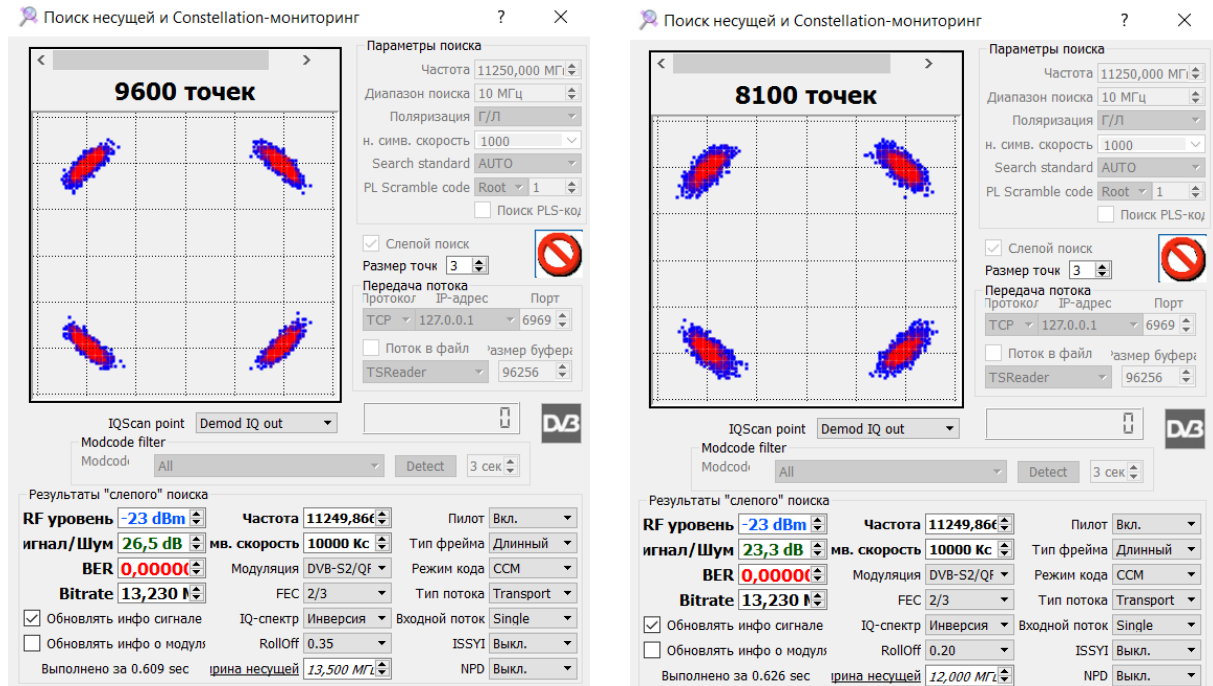


Рис. 3.9 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.5 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції QPSK та FEC = 3/4

QPSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	14,88	14,88	14,88	14,88	14,88	14,88	14,88	14,88	14,88	14,88
FEC	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
Рівень сигналу, дБм	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23
SNR, дБ	26,2	26,2	25,1	23,6	24,5	24,2	24,3	23,7	23,6	23,4

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

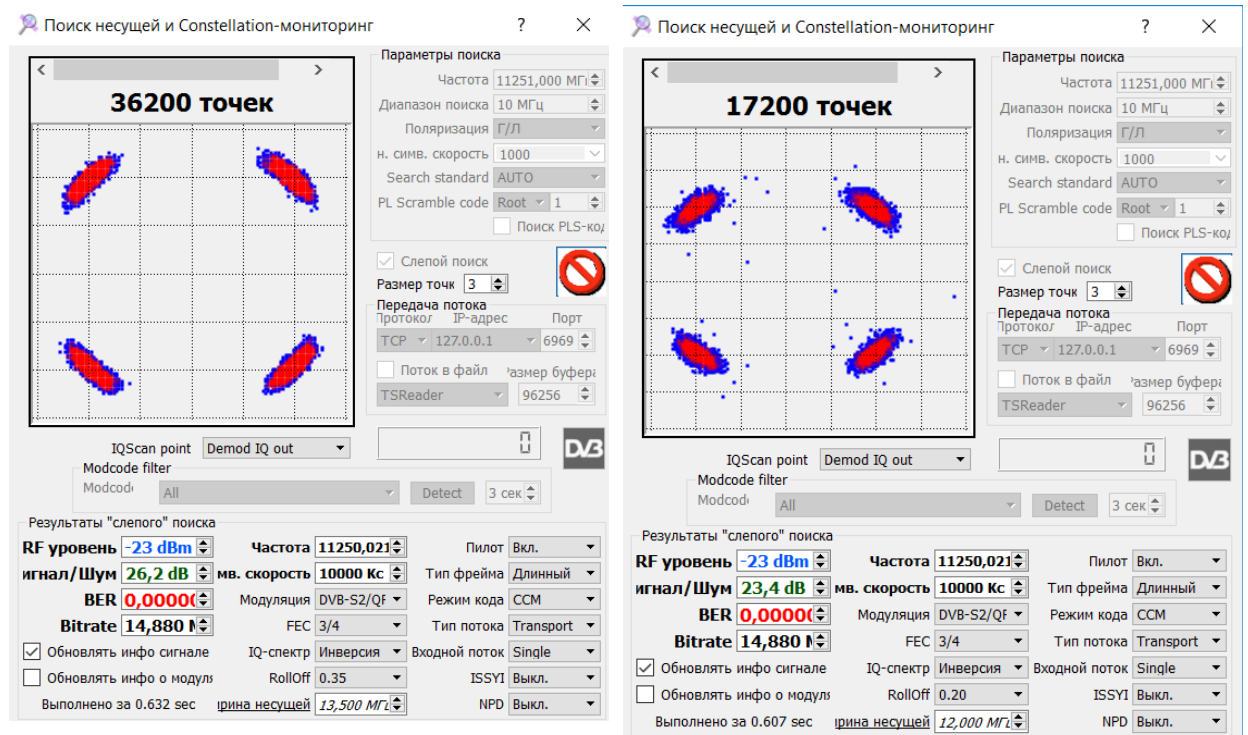


Рис. 3.10 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.6 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції QPSK та FEC = 4/5

QPSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	15,88	15,88	15,88	15,88	15,88	15,88	15,88	15,88	15,88	15,88
FEC	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
Рівень сигналу, дБм	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23
SNR, дБ	26,2	25,9	25,0	23,7	24,5	24,1	24,0	23,6	23,6	23,2

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

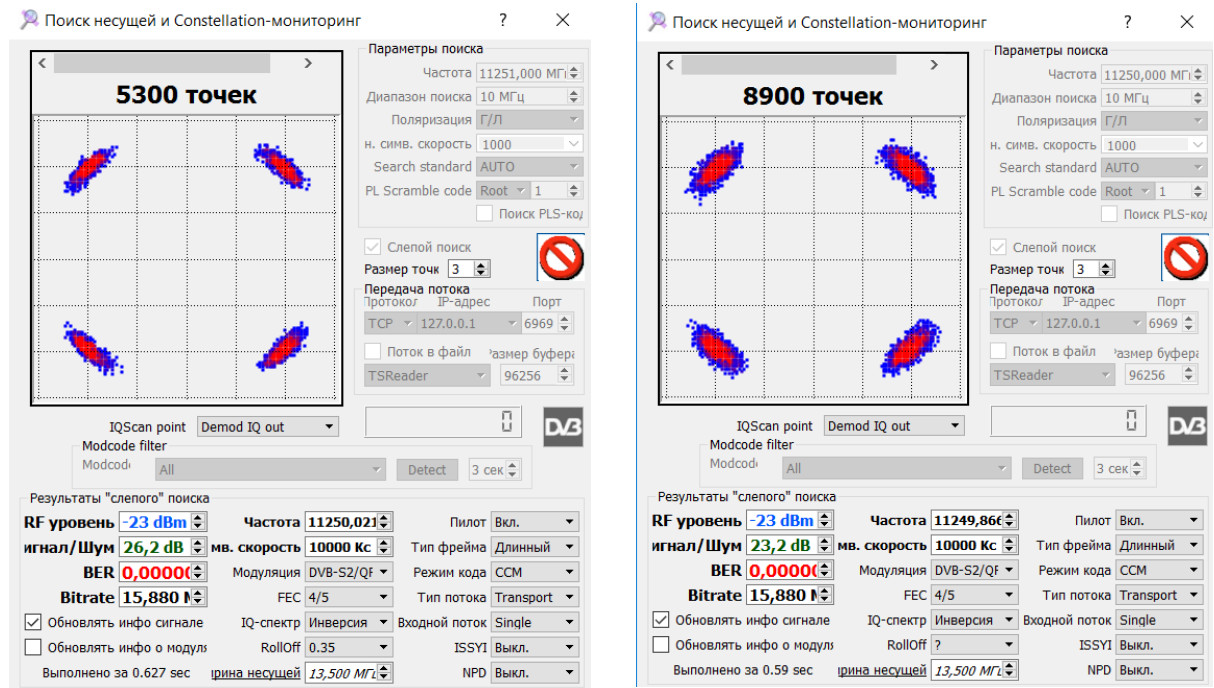


Рис. 3.11 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.7 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції QPSK та FEC = 5/6

QPSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	16,55	16,55	16,55	16,55	16,55	16,55	16,55	16,55	16,55	16,55
FEC	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6
Рівень сигналу, дБм	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23
SNR, дБ	26,0	25,8	25,0	23,5	24,2	23,9	23,8	23,8	23,5	23,6

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

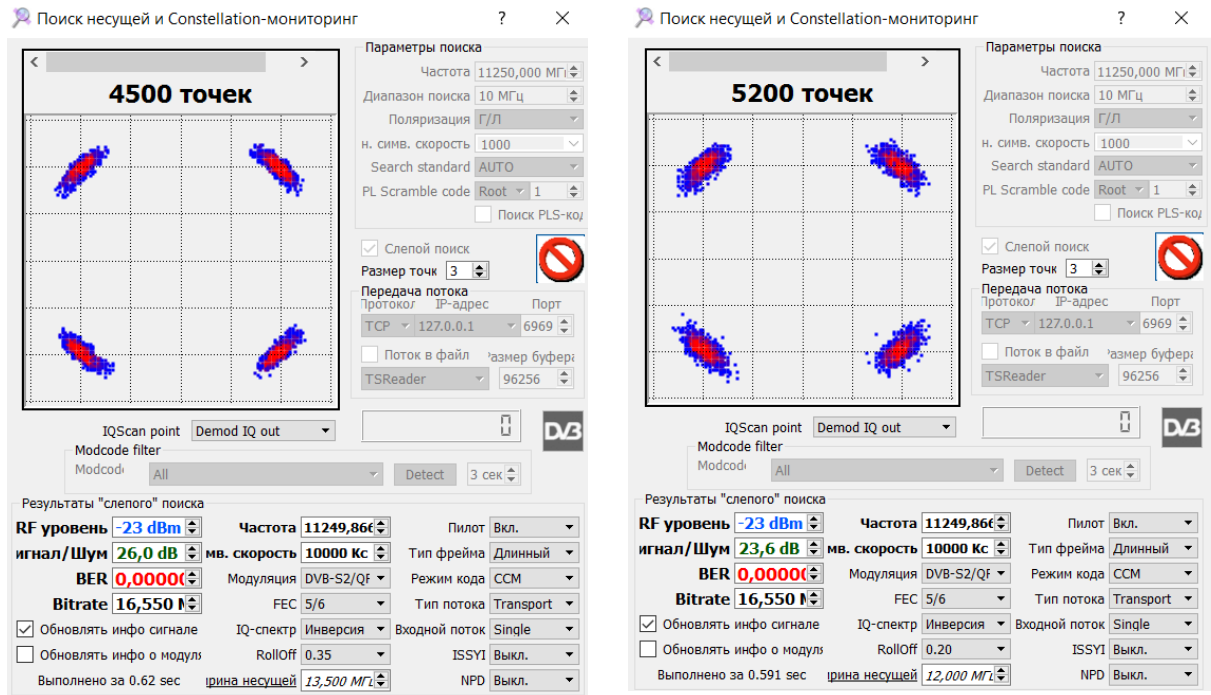


Рис. 3.12 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.8 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції QPSK та FEC = 8/9

QPSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67	17,67
FEC	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9
Рівень сигналу, дБм	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23
SNR, дБ	26,1	26,0	25,5	23,6	24,5	24,3	24,2	23,8	23,7	23,5

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

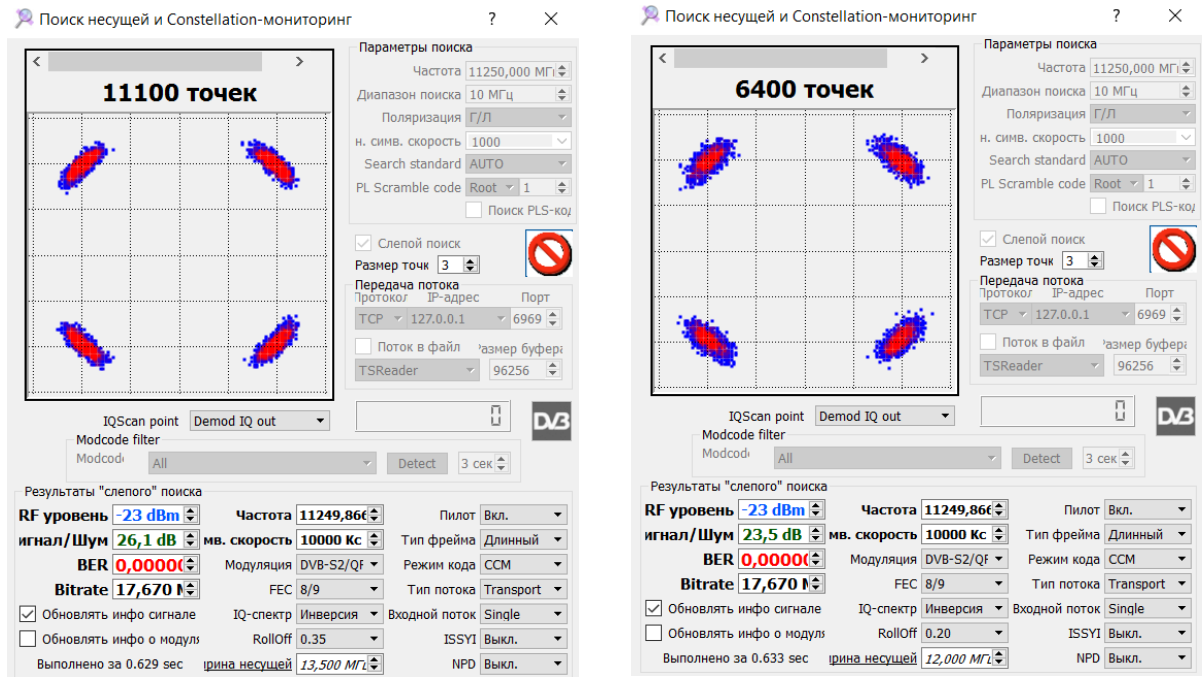


Рис. 3.13 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.9 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції QPSK та FEC = 9/10

QPSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	17,89	17,89	17,89	17,89	17,89	17,89	17,89	17,89	17,89	17,89
FEC	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10
Рівень сигналу, дБм	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23
SNR, дБ	26,3	26,1	25,2	23,8	24,3	24,5	24,1	23,8	23,6	23,4

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

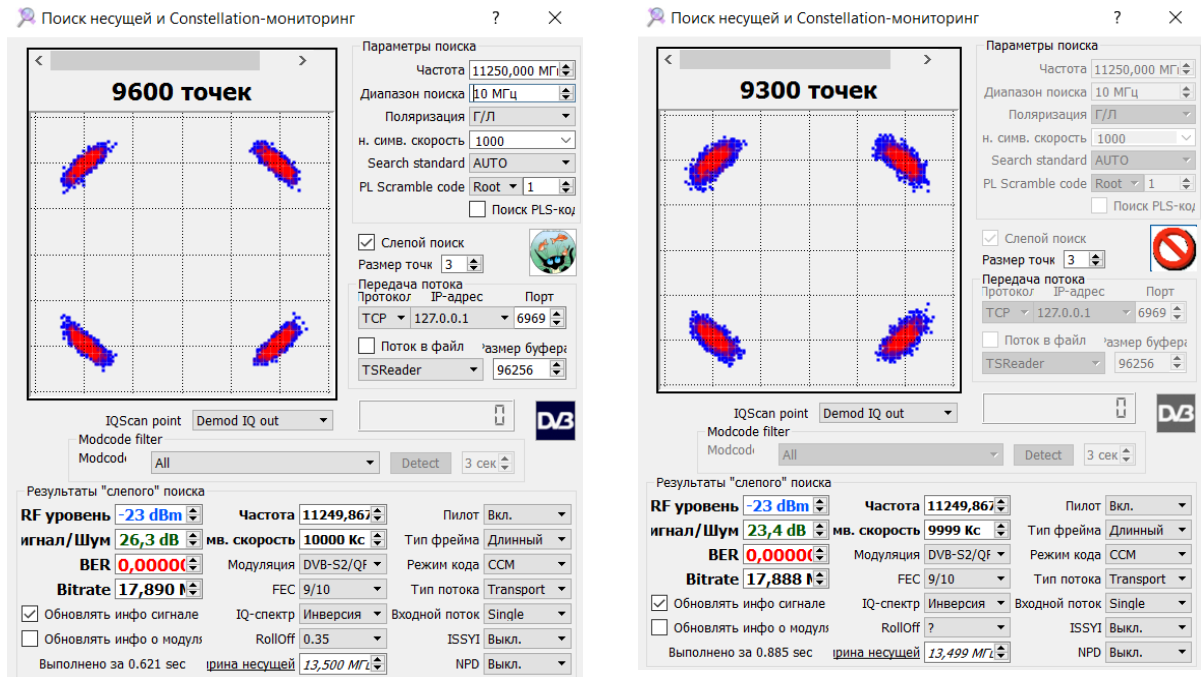


Рис. 3.14 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

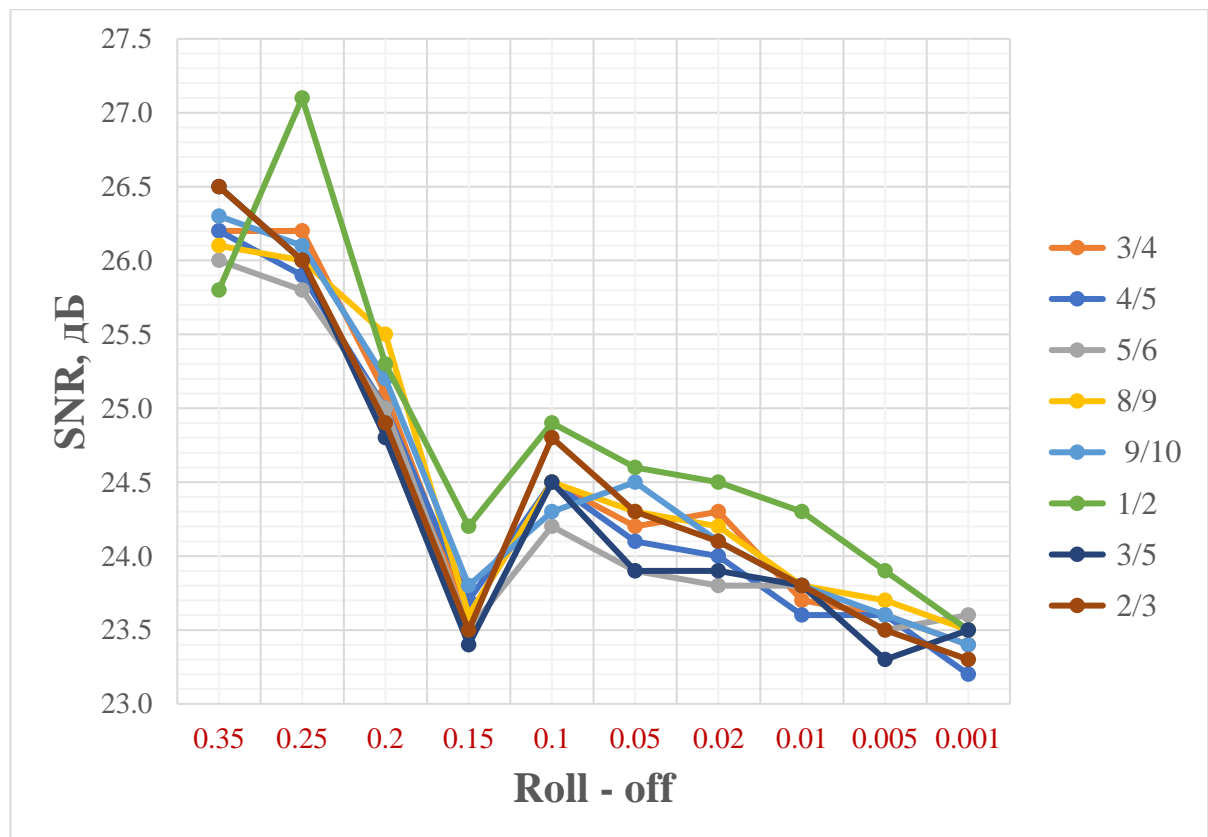
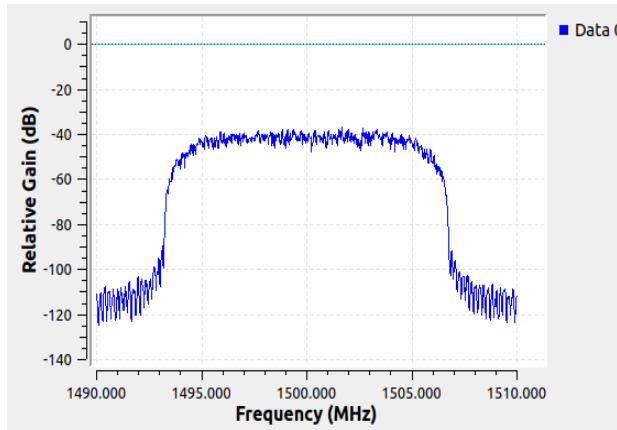
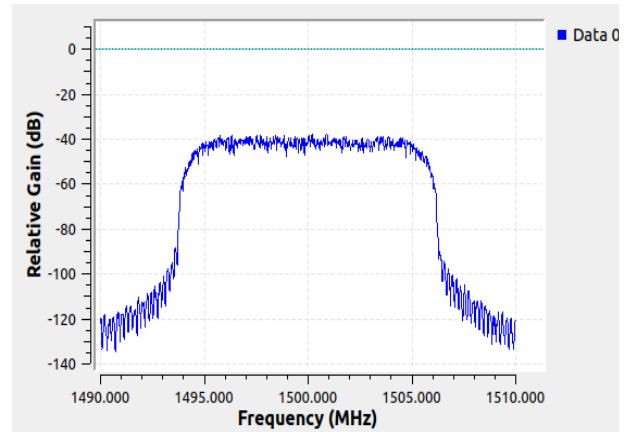
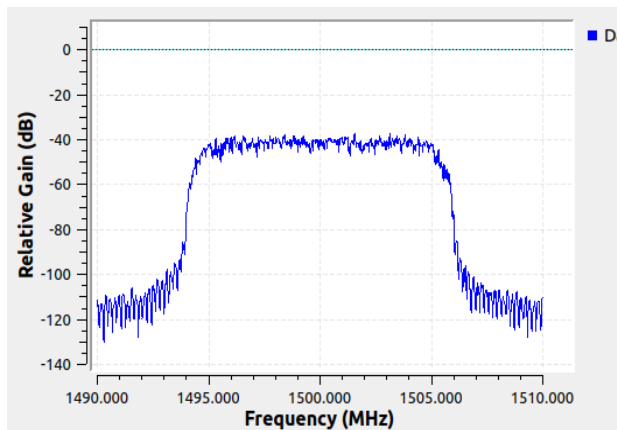
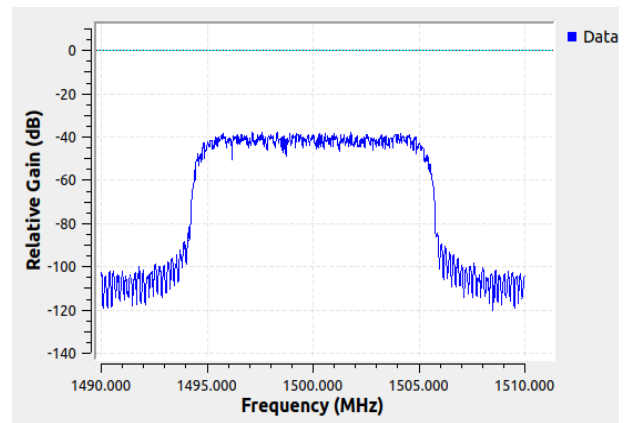
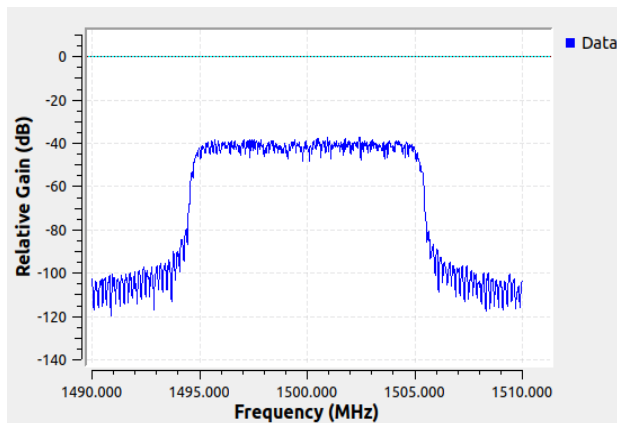
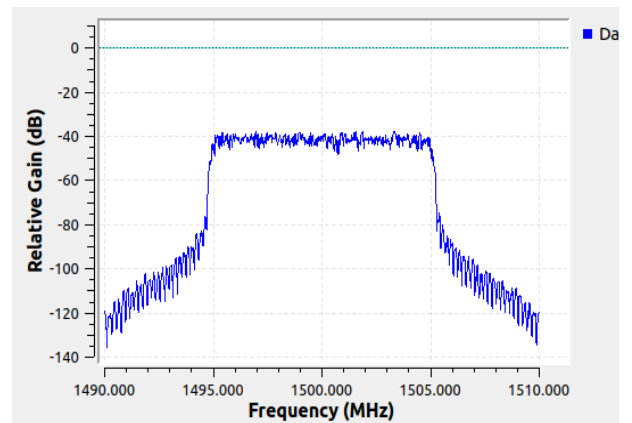


Рис. 3.15 Графік залежності відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення для модуляції QPSK

На рис. 3.16 представлені спектри сформованих сигналів отримані за допомогою програми GNU Radio для кількості відводів формуючого фільтра НЧ $N = 100$ та при різних значеннях коефіцієнту скруглення.

Roll-off = 0.35**Roll-off = 0.25****Roll-off = 0.2****Roll-off = 0.15****Roll-off = 0.1****Roll-off = 0.05**

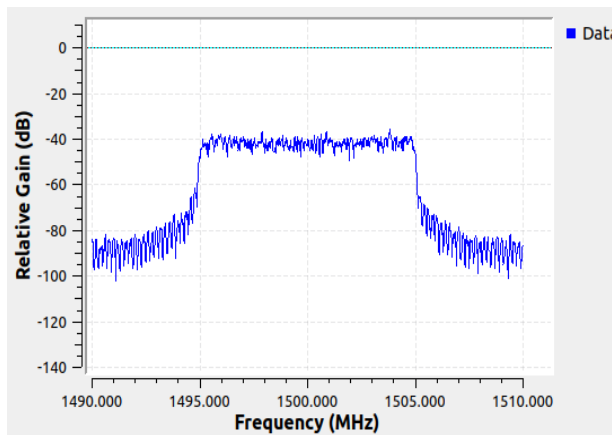
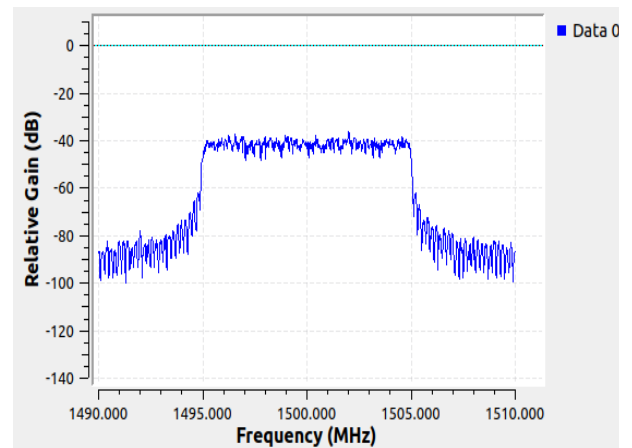
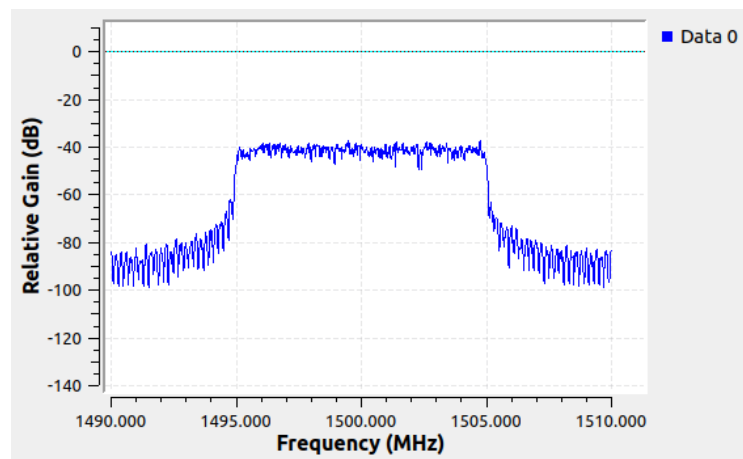
Roll-off = 0.01**Roll-off = 0.005****Roll-off = 0.001**

Рис. 3.16 Спектри сформованих сигналів стандарту DVB-S2, отримані за допомогою програми GNU Radio для кількості відводів формуючого фільтра НЧ $N = 100$

Із вищенаведених рисунків видно, що зменшення коефіцієнту скруглення сприяє формуванню більш компактного спектру сигналу, що в свою чергу призводить до зменшення рівня відношення сигнал/шум. Внаслідок чого спостерігається збільшення кількості завад і спотворень, що призводять до низької якості відеозображення.

3.4 Дослідження макету радіолінії супутникового мовлення стандарту DVB-S2 при модуляції 8-PSK та різних значеннях коефіцієнту скруглення спектру (roll-off)

Табл. 3.10 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції 8-PSK та FEC = 3/5

8PSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80
FEC	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5
Рівень сигналу, дБм	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
SNR, дБ	24,9	24,6	23,9	22,6	23,3	23,2	23,2	22,9	22,8	22,2

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

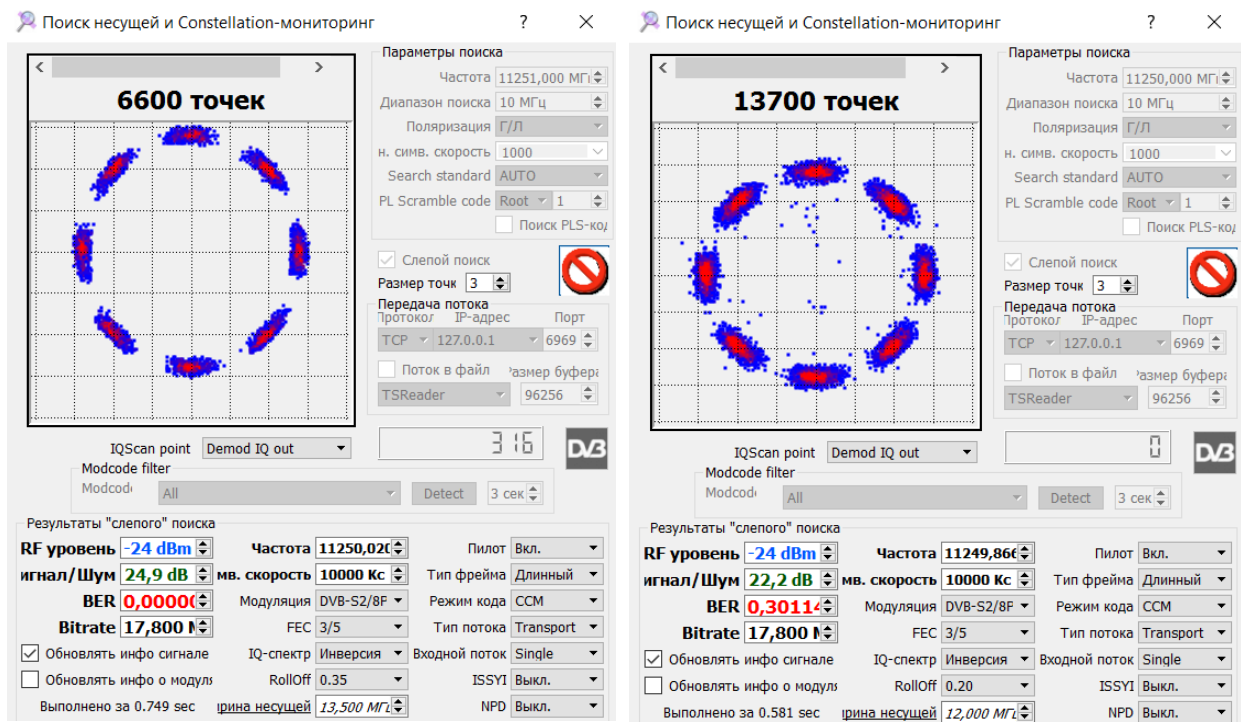


Рис. 3.17 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.11 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції 8-PSK та FEC = 2/3

8PSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	19,81	19,81	19,81	19,81	19,81	19,81	19,81	19,81	19,81	19,81
FEC	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3
Рівень сигналу, дБм	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
SNR, дБ	24,7	24,7	23,7	22,5	23,4	23,2	23,2	22,9	22,1	22,4

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

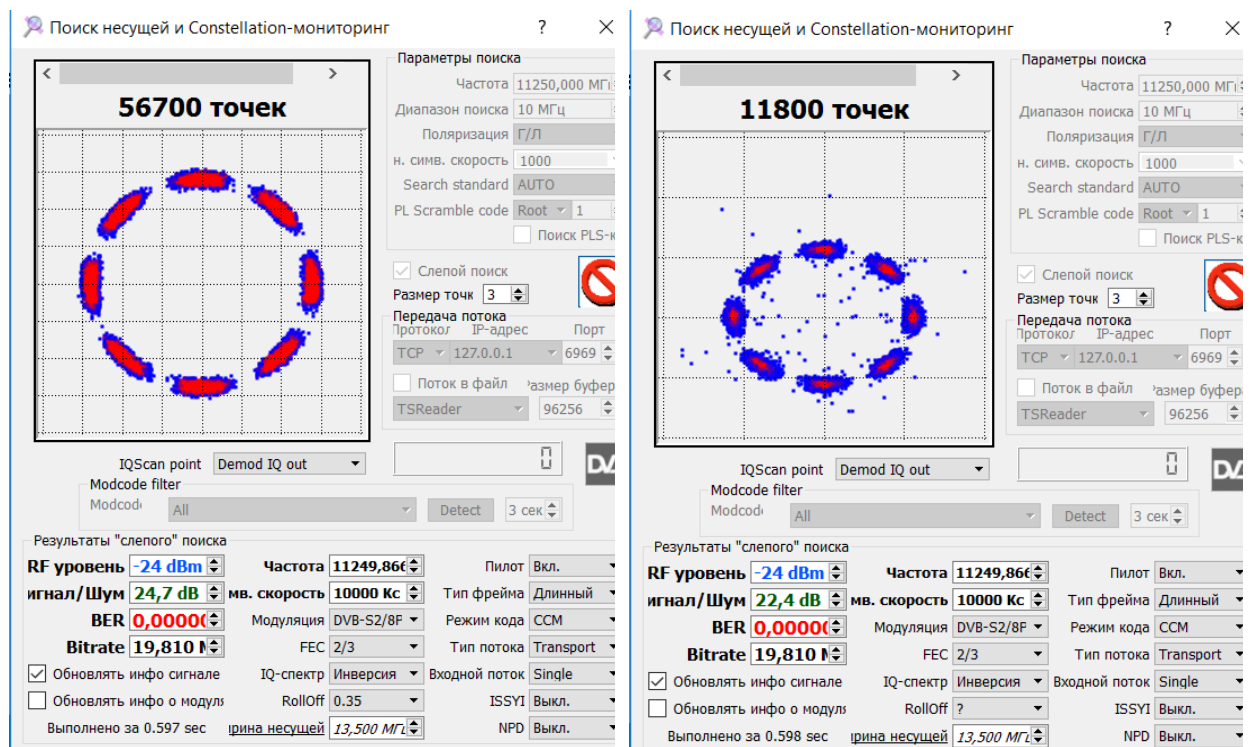


Рис. 3.18 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.12 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції 8-PSK та FEC = 3/4

8PSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	22,29	22,29	22,29	22,29	22,29	22,29	22,29	22,29	22,29	22,29
FEC	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
Рівень сигналу, дБм	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
SNR, дБ	25,1	24,7	23,5	22,6	23,3	23,1	23,1	22,8	22,7	22,4

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

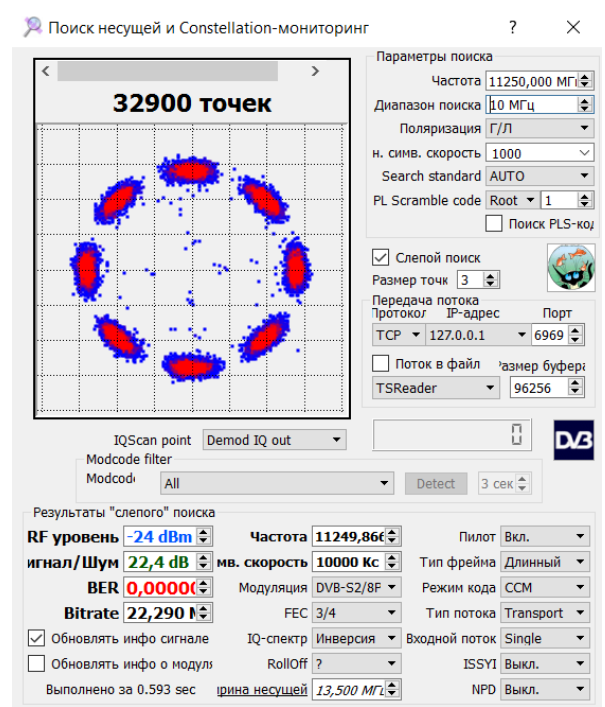
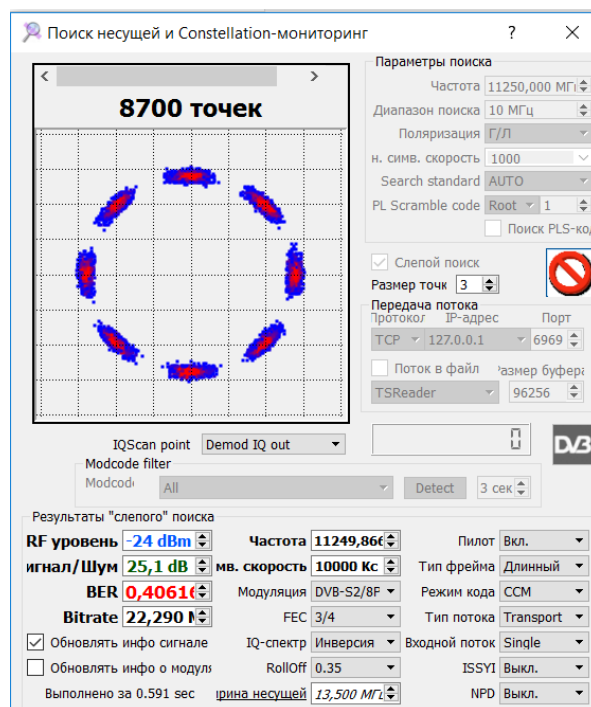


Рис. 3.19 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.13 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції 8-PSK та FEC = 5/6

8PSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	24,79	24,79	24,79	24,79	24,79	24,79	24,79	24,79	24,79	24,79
FEC	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6
Рівень сигналу, дБм	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
SNR, дБ	24,8	24,6	23,7	22,7	23,3	23,2	23,2	23,0	22,7	22,5

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

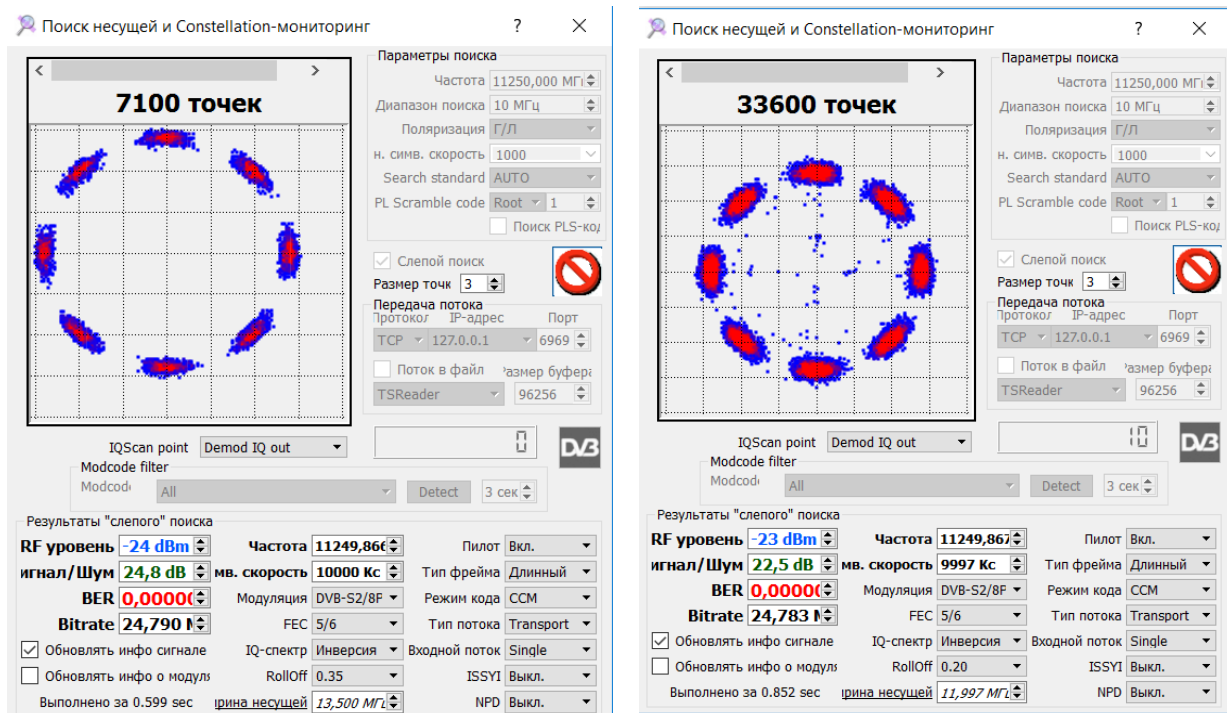


Рис. 3.20 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.14 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції 8-PSK та FEC = 8/9

8PSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	26,47	26,47	26,47	26,47	26,47	26,47	26,47	26,47	26,47	26,47
FEC	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9
Рівень сигналу, дБм	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
SNR, дБ	24,9	25,2	24,1	22,8	23,4	23,7	23,2	22,9	22,9	22,6

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

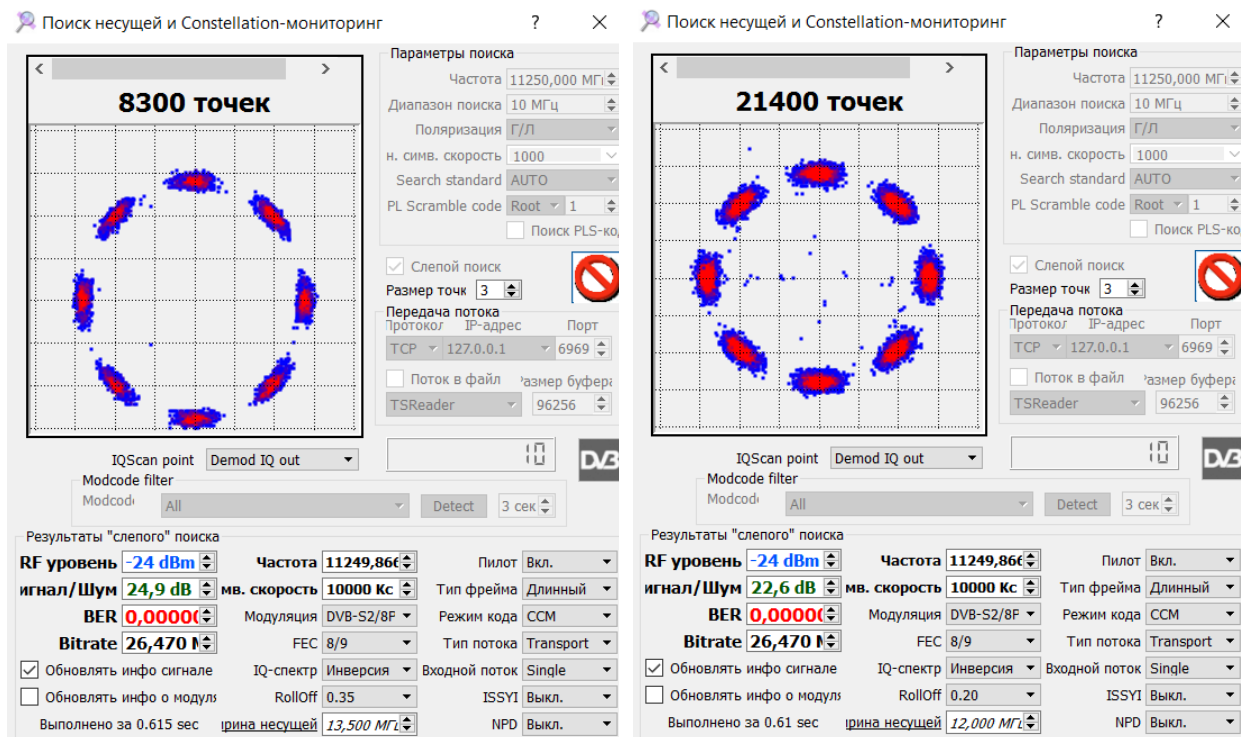


Рис. 3.21 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

Табл. 3.15 Залежність відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення при модуляції 8-PSK та FEC = 9/10

8PSK	Roll - off									
	0,35	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
Symbol Rate, Мсимв/с	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Info Rate, Мбіт/с	26,80	26,80	26,80	26,80	26,80	26,80	26,80	26,80	26,80	26,80
FEC	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10	9/10
Рівень сигналу, дБм	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24	-24
SNR, дБ	24,5	24,7	23,8	22,7	22,7	23,2	22,9	23,1	22,7	22,4

Roll-off = 0,35 (35%)

Roll-off = 0,001 (0,1%)

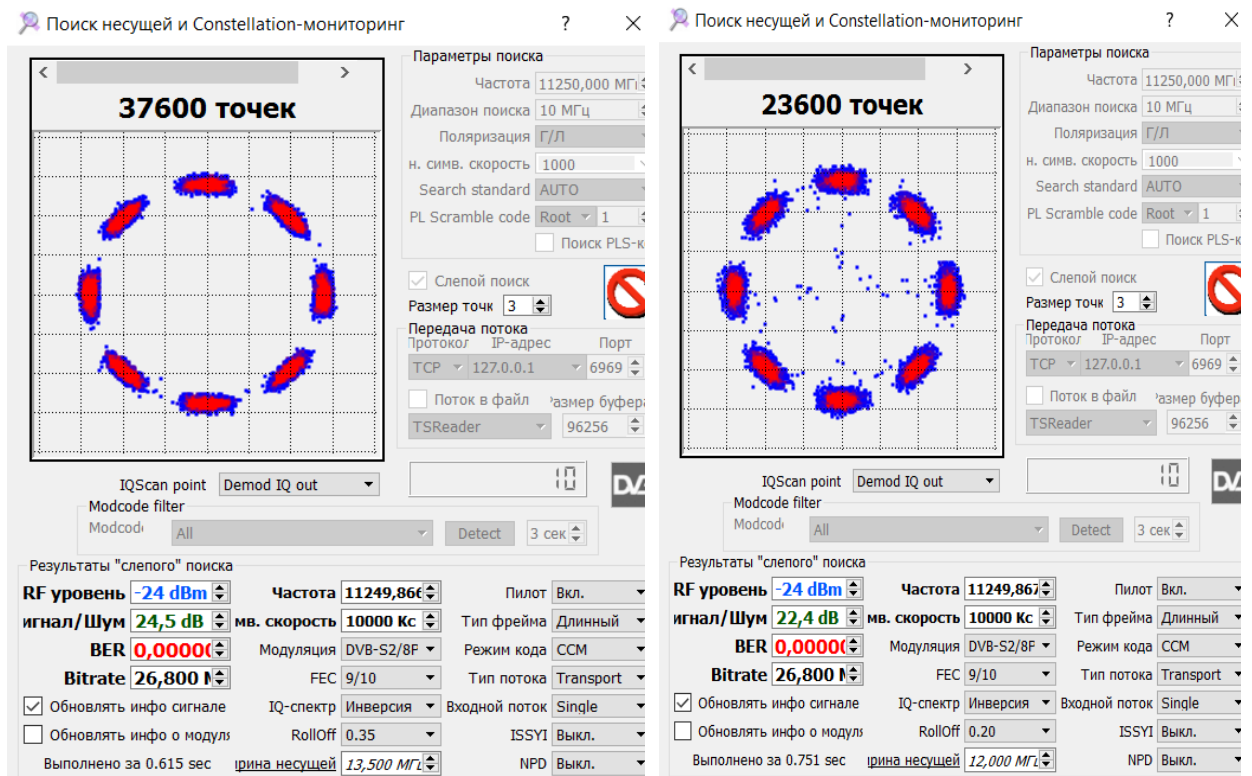


Рис. 3.22 Сигнальні сузір'я прийнятого сигналу

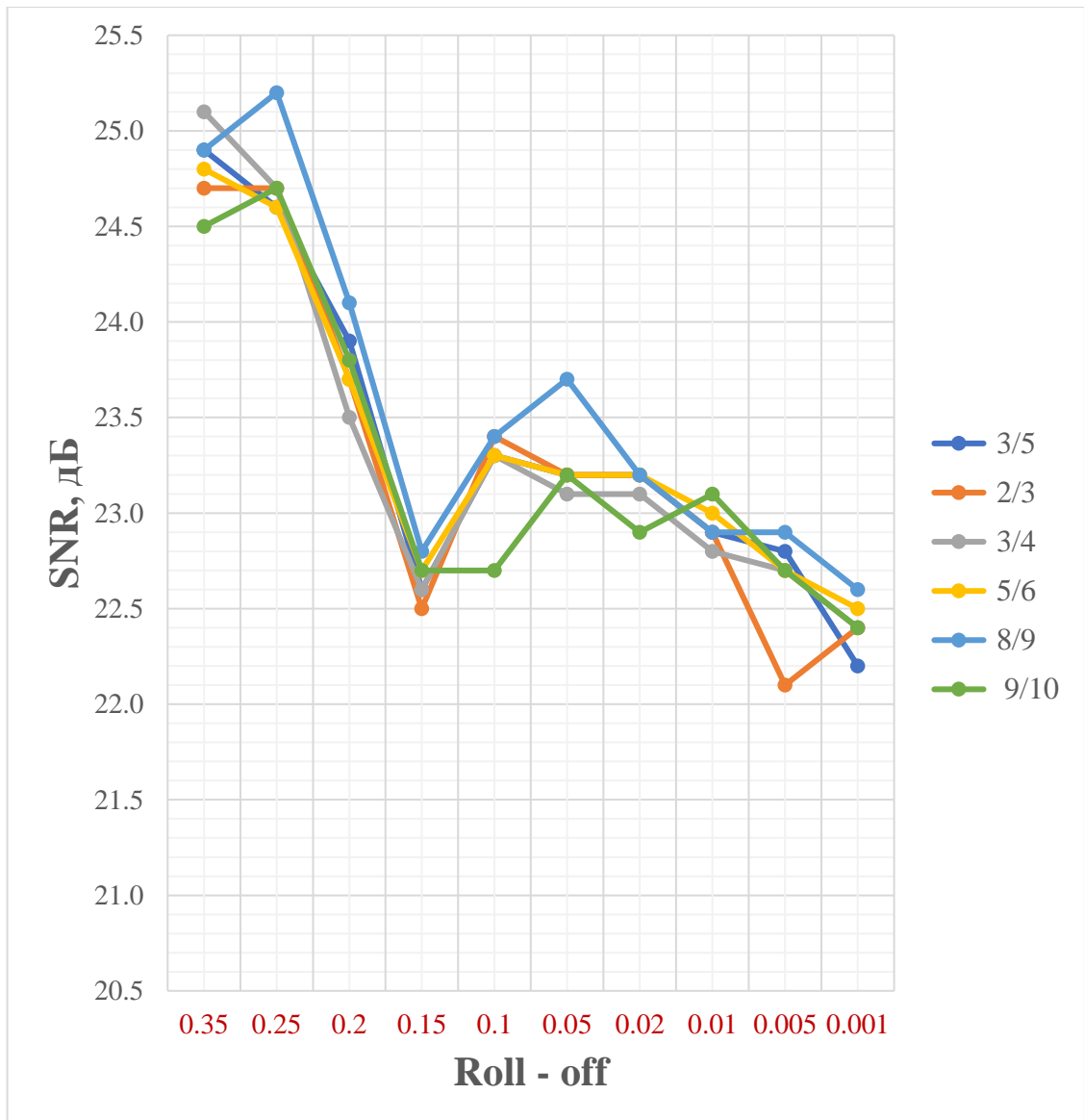


Рис. 3.23 Графік залежності відношення сигнал/шум від різних значень коефіцієнту скруглення для модуляції 8-PSK

На рис. 3.24 – 3.25 представлені спектри сформованих сигналів стандарту DVB-S2 отримані за допомогою програми GNU Radio для різних значень кількості відводів формуючого фільтра НЧ (Найквіста) для коефіцієнтів скруглення 0.35 та 0.05 відповідно.

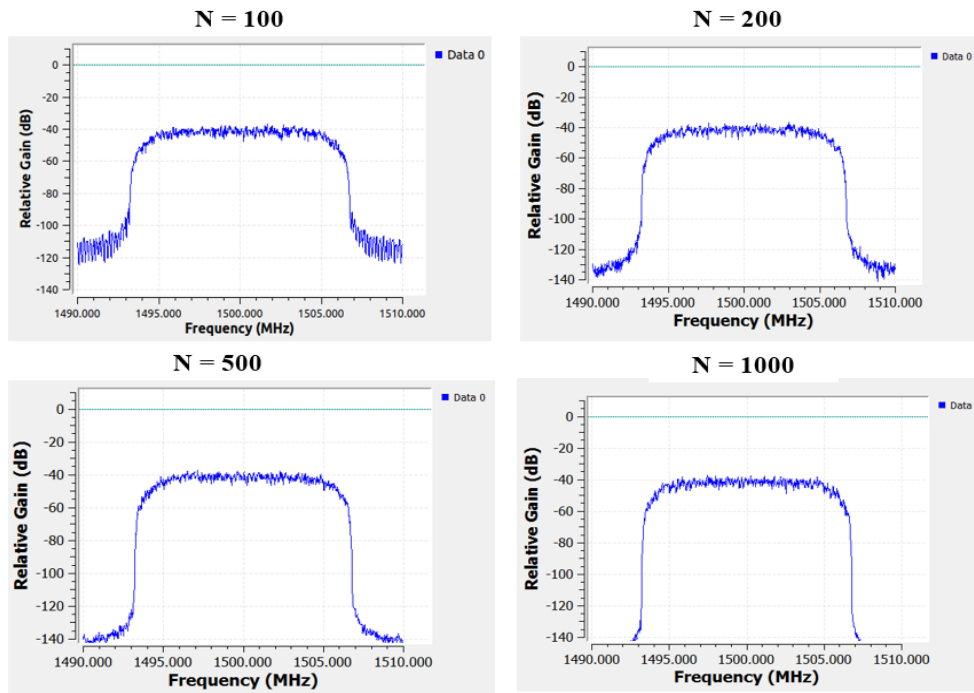


Рис. 3.24 Спектри сформованих сигналів стандарту DVB-S2, отримані за допомогою програми GNU Radio для різних значень кількості відводів формуючого фільтра НЧ для Roll-off = 0.35

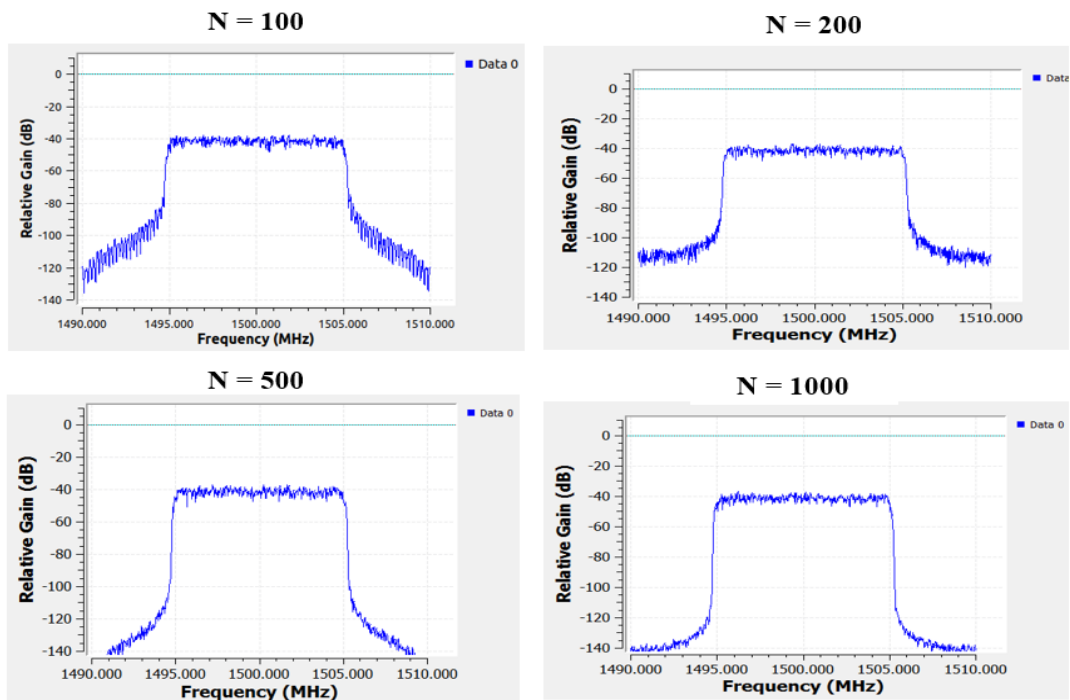


Рис. 3.25 Спектри сформованих сигналів стандарту DVB-S2, отримані за допомогою програми GNU Radio для різних значень кількості відводів формуючого фільтра НЧ для Roll-off = 0.05

З вищенаведених рисунків видно, що зі збільшенням кількості N каналів цифрового формуючого фільтра Найквіста, рівень позасмугового випромінювання зменшується, і спектр стає більш прямокутним. Зазначений факт дозволяє підвищити ефективність використання радіочастотного ресурсу шляхом розміщення впритул зліва і справа спектрів інших радіосигналів.

Висновки до розділу

В результаті даного експериментального дослідження вдалося досягти поставленої мети, а також ряд поставлених завдань. Вдалося сформувати цифровий телевізійний сигнал стандарту DVB-S2 з використанням трансиверу Nuand BladeRF x40 SDR та програмного середовища GNURadio.

Як видно з рис. 3.15 та 3.23 зменшення коефіцієнту скруглення значно впливає на рівень відношення сигнал/шум, а саме падіння відношення сигнал/шум в районі 2,5 – 3 дБ при демодуляції сигналу в побутовому супутниковому приймачі. Тобто, за результатами дослідження стало зрозумілим «яку ціну потрібно заплатити» заради підвищення ефективності використання спектра (що полягає в зменшенні займаної смуги частот при тій же швидкості передачі) в системах супутникового телебачення.

Можливо припустити, що падіння відношення сигнал/шум обумовлено двома причинами:

- спотворенням сигналу в демодуляторі супутникового приймача, що підтримує тільки стандартні значення roll-off = 0,35, 0,25, 0,2 і виконує узгоджену фільтрацію прийнятого сигналу DVB-S2;
- спотворенням сигналу в програмному модуляторі GNURadio.

ВИСНОВОК

В результаті проведеного дослідження, було досягнуто поставленої мети, а саме було обґрунтовано той факт, що дійсно коефіцієнт скруглення спектру має безпосередній вплив на формування пропускної здатності лінії супутникового ТВ мовлення.

Також було вирішено ряд завдань:

1. Було розглянуто основні відомості про стандарти супутникового телевізійного мовлення DVB-S2 та DVB-S2X. А також було розглянуто перспективні технології супутникового ТВ мовлення Novelsat.
2. Було проведено аналітичний розрахунок пропускної здатності лінії супутникового радіомовлення стандарту DVB-S2 та DVB-S2X при застосуванні високопозиційних методів модуляції за допомогою програмного забезпечення NovelSat NS4 Calculator.
3. За допомогою експериментального макету лінії супутникового мовлення було сформовано цифровий телевізійний сигнал стандарту DVB-S2 та було досліджено його параметри, зроблено висновки щодо впливу коефіцієнту скруглення на падіння відношення сигнал/шум в районі 2,5 – 3 дБ при демодуляції сигналу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. The DVB Project official site. Standards: DVB-S2 [Електронний ресурс] URL: <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2>
2. Amplitude Phase Shift Keying Constellation Design and its Applications to Satellite Digital Video Broadcasting [Електронний ресурс] URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/37d6/736c4b4bd545ca73831366e4cdf59b2852ea.pdf>
3. Стандарт DVB-S2 как средство развития новых сервисов на спутниковых сетях связи *Журнал "Broadcasting. Телевидение и радиовещание" #3, 2007*
4. The DVB Project official site. Standards: DVB-S2X [Електронний ресурс] URL: <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>
5. [Електронний ресурс] URL: <https://telesputnik.ru/materials/tekhnika-i-tekhnologii/article/dvb-s2x-teoriya-i-praktika/>
6. [Електронний ресурс] URL: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bo/R-REC-BO.1784-1-201612-I!!PDF-R.pdf
7. Изикаев Д.Р., Манджиев Б.Г. ОСОБЕННОСТИ СТАНДАРТА DVB-S2X // Научное сообщество студентов: МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: сб. ст. по мат. LVIII междунар. студ. науч.-практ. конф. № 23(58). [Електронний ресурс] URL: [https://sibac.info/archive/meghdis/23\(58\).pdf](https://sibac.info/archive/meghdis/23(58).pdf)
8. [Електронний ресурс] URL: <https://novelsat.com/>
9. Скляр Бернад. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е испр.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 200. – 1104 с.
10. [Електронний ресурс] URL: <https://www.newtec.eu/frontend/files/userfiles/files/Whitepaper%20S2%20Extensions%20Rev2.pdf>
11. *NovelSat NS4 Calculator* [Електронний ресурс] URL: <https://novelsat.com/novelsat-ns4-calculator/>

ДОДАТОК

Схема в програмному середовищі GNU Radio

