

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

На правах рукопису

БАСАНСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.396.6(03)

**ВИМІРЮВАННЯ ЗАЙМАНОЇ ШИРИНИ СМУГИ ЧАСТОТ
ВИПРОМІНЮВАННЯ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ**

Спеціальність: 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор,
Сібрुक Леонід Вікторович

Київ - 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ	
РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПІД ЧАС РАДІОМОНІТОРИНГУ.....	12
1.1. Частотний менеджмент.....	13
1.2. Методи пошуку і виявлення радіовипромінювань.....	15
1.3. Спостереження за радіовипромінюванням.....	17
1.4. Визначення параметрів радіовипромінювання.....	19
1.4.1. Частота випромінювання.....	19
1.4.2. Рівень сигналу.....	21
1.4.3. Вимірювання напруженості поля та щільності потужності.....	21
1.4.4. Вимірювання ширини смуги частот радіовипромінювання.....	24
1.5. Вимоги до обладнання радіомоніторингу.....	33
1.6. Постановка завдання дослідження.....	36
1.7. Висновки.....	39
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ	
ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ СТАНДАРТУ DVB-T2 ТА	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ	
РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ.....	40
2.1. Мережа цифрового телебачення країни.....	40
2.2. Формування інформативних сигналів за стандартом DVB-T2.....	43
2.3. Математичне моделювання спектра випромінювання за стандартом DVB-T2 біля приймальної антени	45
2.4. Вибір режиму роботи вимірювальної апаратури	65
2.5. Висновки.....	68
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЙМАНОЇ ШИРИНИ СМУГИ ЧАСТОТ	
РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ	
СТАНДАРТІВ DVB-T, DVB-T2 ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	70

3.1. Апаратура, яка використовувалася під час експериментальних досліджень	70
3.2. Проведення експериментальних досліджень та обробка результатів вимірювань.....	73
3.3. Визначення ЗШСЧ радіовипромінювання за експериментальними даними.....	86
3.4. Доопрацювання методу $X \text{ дБ}$ для вимірювання ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення.....	89
3.5. Висновки.....	104
РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИМІРЮВАННЯ ЗАЙМАНОЇ ШИРИНИ СМУГИ ЧАСТОТ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ СТАНДАРТІВ DVB-T, DVB-T2 ЗА X-дБ МЕТОДОМ	
4.1. Аналіз результатів статистичної обробки експериментальних даних	106
4.2. Рекомендації щодо внесення змін до методики інструментального оцінювання ЗШСЧ.....	110
4.3. Висновки.....	113
ВИСНОВКИ.....	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118
ДОДАТОК А. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ....	127
ДОДАТОК В. ТЕКСТИ КОМП'ЮТЕРНИХ ПРОГРАМ.....	129

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

- АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
- ДРВ - джерело радіовипромінювання;
- ЗШСЧ - займана ширина смуги частот;
- ЕМО - електромагнітна обстановка;
- ЕМС – електромагнітна сумісність;
- ЕРС - електрорушійна сила;
- КШСЧ - контрольна ширина смуги частот;
- НАУ - Національний авіаційний університет;
- НКРЗІ - Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації;
- НШСЧ – необхідна ширина смуги частот;
- РЕЗ – радіоелектронний засіб;
- РМ – система радіомоніторингу;
- РПД - радіопередавальний пристрій;
- РПП - радіоприймальний пристрій;
- РЧР - радіочастотний ресурс;
- СКВ - середньо квадратичне відхилення;
- СЦП – спектральна щільність потужності;
- УДЦР - Державне підприємство «Український державний центр радіочастот»;
- ШПФ - швидке перетворення Фур'є;
- ВВ - Baseband frame;
- ВСН - Bose-Chaudhuri-Nocquenghem Multiple Error Correction Binary Block Code;
- ВІСМ - Bit Interleaved Coding and Modulation;
- СДМА - Code Division Multiple Access;
- СЕПТ – Conference of European Postal and Telecommunications Operators;
- СОФДМ - Coded Orthogonal Frequency-Division Multiplex;
- ДВВ-Т - Digital Video Broadcasting-Terrestrial;

DVB-T2 - Digital Video Broadcasting — Second Generation Terrestrial;
FHSS - Frequency-Hopping Spread Spectrum;
GTS - Generic Transport Stream;
GSM - Global System for Mobile communications;
IMT-MC – International Mobile Telecommunications – Multicarrier;
ITU – International Telecommunications Union;
LDPC - Low-Density Parity-Check Code;
MPEG-2 - стандарт стиску відео- та аудіоданих;
OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing;
QAM - Quadrature-Amplitude Modulation;
QPSK - Quadrature Phase Shift Keying;
PLP - Physical Layer Pipe;
RBW - Resolution Bandwidth;
SDR - Software Defined Radio;
SPAN - позначає діапазон між початковою та кінцевою частотами;
T-DAB - Digital Audio Broadcasting;
TDMA – Time division multiple access;
VBW - Video Bandwidth.

ВСТУП

Актуальність теми. Радіочастотний ресурс (РЧР) є одним з найбільш цінних національних ресурсів, ефективне та раціональне використання якого сприяє забезпеченню економічного, соціального, інформаційного та культурного розвитку України, державній безпеці, обороноздатності, виконанню міжнародних зобов'язань.

Політика країни щодо використання РЧР регулюється правовими документами, серед яких: Закони України «Про радіочастотний ресурс України» та «Про телекомунікації», План використання радіочастотного ресурсу України, Національна таблиця розподілу смуг радіочастот України. Державна політика в сфері РЧР реалізується через діяльність Державного підприємства «Український державний центр радіочастот» (УДЦР), яке підпорядковується Національній комісії, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації.

В складі УДЦР працює служба радіомоніторингу, на яку покладено завдання проведення радіоконтролю за використанням РЧР та управління системою радіомоніторингу, що включає біля 220 стаціонарних станцій та 120 мобільних станцій. Система радіомоніторингу дозволяє отримати інформацію щодо відповідності параметрів радіовипромінювання радіоелектронних засобів (РЕЗ) дозвільним документам на експлуатацію, реальної зайнятості розподілених смуг радіочастот, реальної електромагнітної обстановки в місцях функціонування РЕЗ та іншу важливу інформацію.

Система радіочастотного моніторингу вдосконалюється відповідно до швидкого розвитку радіотехнологій і зростання числа об'єктів радіоконтролю шляхом розширення частотного діапазону, автоматизації радіоконтролю, покращення точнісних характеристик апаратури та її функціональних можливостей. Процес розвитку системи радіомоніторингу має бути і є в дійсності неперервним. Одним із засобів підвищення ефективності системи є розробка нових та доопрацювання існуючих методів вимірювання параметрів радіовипромінювання.

Значний вклад у дослідження проблем РЧР, радіочастотного моніторингу та електромагнітної сумісності, внесли такі вчені: Биховський М.А., Благодарний В.Г., Виноградов Є.М., Винокуров В.І., Владіміров В.І., Гепко І.А., Іванов В.О., Ільницький Л.Я., Лапін В.А., Логінов М.А., Слободянюк П.В., Ступак В.С., Титаренко В.К. і інші.

Період часу, під час якого виконувалася робота, співпав з розбудовою та імплементацією в країні мережі цифрового телебачення. Мережа покриває телевізійним мовленням 98% території України і включає більше однієї тисячі передавачів. Під час радіоконтролю вимірюються чотири параметри радіовипромінювання. Тому очевидно, що моніторинг випромінювання мережі цифрового телебачення є трудомістким завданням. Дисертаційна робота спрямована на зменшення трудомісткості та пом'якшення вимог до умов, в яких проводиться оцінювання займаної ширини смуги частот (ЗШСЧ) радіовипромінювання цифрового телебачення, а саме: отримання надійних оцінок ЗШСЧ при рівні шумів на 15 дБ вищих за рівні, що визначаються нормативними документами.

Вищенаведене свідчить про актуальність обраної теми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи була запропонована Українським державним центром радіочастот. Тема включалась до плану науково-дослідних робіт УДЦР на 2012 та 2013 роки, але не була профінансована за браком коштів. Фахівці УДЦР провели ряд експериментальних досліджень, результати яких передали Національному авіаційному університету для виконання роботи. УДЦР передбачає практичне впровадження результатів роботи, що затверджено відповідним актом.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розвиток методів вимірювання і алгоритмів оцінювання займаної ширини смуги частот радіовипромінювання цифрового телебачення під час радіоконтролю.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання.

1. Розробка математичної моделі цифрового телебачення стандарту DVB-T2, що дозволяє визначати спектр радіовипромінювання в точці приймання з урахуванням різних параметрів модуляції, кодування, числа несучих та умов поширення радіохвиль.

2. Проведення вимірювання спектрів радіовипромінювання цифрового телебачення в умовах м. Києва в точках, що характеризуються перевищенням опорного рівня спектра над рівнем шумів не менше 30 дБ.

3. Обробка результатів експериментальних досліджень. Надання рекомендацій щодо внесення змін до чинної методики вимірювання ЗШСЧ радіовипромінювання в частині цифрового телебачення та доопрацювання програмного забезпечення станцій радіомоніторингу.

Об'єктом дослідження є вдосконалення системи радіочастотного моніторингу.

Предметом дослідження є методи та алгоритми вимірювання (оцінювання) параметрів радіовипромінювання цифрового телебачення.

Методи дослідження. В дослідженні використані методи вимірювання параметрів радіовипромінювання, цифрової та статистичної обробки інформації, поширення радіохвиль, спектрального аналізу сигналів, математичного моделювання, згладжування та апроксимації експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів визначається наступним.

1. Модифіковано метод X дБ вимірювання займаної ширини смуги частот радіовипромінювання. За модифікованим методом X дБ на першому етапі вимірюється ширина смуги частот спектра на рівні - 10 дБ від опорного рівня, що відповідає ділянці спектра з максимальною крутизною для різних класів радіовипромінювання. Вимірювання ЗШСЧ за шириною смуги частот спектра на рівні - 10 дБ від опорного рівня характеризується похибкою, яка залежить від класу радіовипромінювання та налаштування вимірювальної апаратури. На другому етапі дана похибка компенсується за допомогою поправки.

2. Вперше в роботі проведено оцінювання поправок до ширини спектра радіовипромінювання засобів цифрового телебачення на рівні - 10 дБ від опорного рівня в залежності від роздільної здатності вимірювальної апаратури за проміжною частотою з метою оцінки ЗШСЧ.

3. Обгрунтовано використання фільтра Савицького-Голея із ступенем поліному 3-4 для згладження спектра радіовипромінювання під час визначення опорного рівня за максимальним значенням у випадку зашумленості спектра. Визначена кількість точок у рухомій послідовності в залежності від зашумленості спектра.

4. Розроблена математична модель для визначення ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення за $\beta/2$ та X дБ методами, яку можна також використовувати для дослідження впливу умов поширення радіохвиль на спектр радіовипромінювання та, відповідно, параметри радіовипромінювання.

5. Встановлено зв'язок між шириною смуг частот, що відповідають схилам спектра випромінювання цифрового телебачення за результатами вимірювання, та роздільною здатністю апаратури за проміжною частотою, а також вплив даної залежності на оцінку займаної ширини смуги частот випромінювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному.

1. Запропонований модифікований метод X дБ можна рекомендувати для визначення ЗШСЧ інших класів радіовипромінювання засобів цифрових радіотехнологій.

2. Українському державному центру радіочастот запропоновані рекомендації щодо внесення змін до чинної методики інструментального оцінювання (вимірювання) ЗШСЧ радіовипромінювання та програмного забезпечення станцій радіомоніторингу в частині радіоконтролю параметрів випромінювання цифрового телебачення. Отримано акт впровадження.

3. Проведено дослідження можливості застосування SDR платформи HackRF One разом з комп'ютером у якості альтернативи коштовній

вимірювальній апаратурі під час оцінки параметрів радіовипромінювання, яке дало позитивний результат.

Особистий внесок здобувача. Науковий керівник разом із здобувачем обгрунтували завдання дослідження дисертаційної роботи.

Автор роботи розробив математичну модель для моделювання спектра випромінювання цифрового телебачення в різних каналах поширення радіохвиль та провів математичне моделювання.

Здобувач провів вимірювання радіовипромінювання цифрового телебачення в часовій області в різних місцях м. Києва за допомогою SDR платформи HackRF One.

Наукова ідея використання методу X δB таким чином, щоб отримати максимально можливу точність оцінки параметра, належить науковому керівникові. Автор роботи обгрунтував рівень спектра, на якому проводиться вимірювання, провів обробку отриманих експериментальних даних, знайшов значення поправки для визначення ЗШСЧ випромінювання.

Здобувач розробив рекомендації щодо практичного впровадження результатів дослідження, які передані до УДЦР.

Апробація результатів роботи. Основні результати проведених досліджень доповідалися на 5 науково-технічних конференціях: Другій міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики» (м. Київ, НАУ, 23-24 жовтня 2013 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Проблеми навігації та управління рухом» (м. Київ, НАУ, 18-20 листопада 2013 р.); XI міжнародній науково-технічній конференції «АВІА-2013» (м. Київ, НАУ, 21-23 травня 2013 р.); 15-th International Radar Symposium "Microwave and Radar Week" (16-18 June 2014, Gdansk, Poland); 2014 Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (23-25 September 2014, Kiev, Ukraine).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 9 наукових праць, серед яких: 5 – у фахових наукових виданнях згідно з переліком ВАК України [70, 90, 93, 94, 95]; 4 – доповіді та тези доповідей на

наукових конференціях [71, 91, 92, 96]. Роботи [91, 92, 93, 94] входять до наукометричних баз, в тому числі [91, 92] - до Scopus.

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота включає 144 сторінок друкованого тексту, складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків, викладених на 116 сторінках основного тексту, списку використаних джерел із 96 найменувань і додатків. Дисертаційна робота містить 44 рисунків, 22 таблиці, два додатки на 18 сторінках.

РОЗДІЛ 1

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПІД ЧАС РАДІОМОНІТОРИНГУ

Згідно до Закону України «Радіочастотний ресурс (РЧР) - частина радіочастотного спектра, придатна для передавання та/або приймання електромагнітної енергії радіоелектронними засобами і яку можливо використовувати на території України та за її межами відповідно до законів України та міжнародного права, а також на виділених для України частотно-орбітальних позиціях» [1]. З огляду на величезну кількість радіоелектронних засобів та значимість їх використання для народного господарства країни РЧР є невичерпним природним ресурсом, використання якого повинно бути під неперервним державним контролем.

Функція контролю за використанням РЧР покладена радіомоніторинг. За визначенням «Радіочастотний моніторинг - збирання, оброблення, збереження та аналіз даних про параметри випромінювання радіоелектронних засобів і випромінювальних пристроїв, які діють у відповідних смугах радіочастот» [1]. Також в Законі підкреслюється, що дані радіомоніторингу використовуються для розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо прийняття рішень по підвищенню ефективності використання РЧР. Тому українські фахівці Слободянюк П.В., Благодарний В.Г., Ступак В.С. запропонували більш досконале визначення [2]. За ним радіо моніторинг – комплекс організаційних і технічних заходів щодо збирання, оброблення, аналізу та збереження даних про параметри та характеристики сигналів радіовипромінювання радіоелектронних засобів (РЕЗ), випромінювальних пристроїв та інших джерел радіовипромінювання із метою отримання необхідної інформації для прийняття управлінських рішень у сфері використання РЧР.

Відповідно до міжнародних засад діяльності, що наводяться в Регламенту радіозв'язку [3] служба радіомоніторингу повинна проводити контроль радіовипромінювань на відповідність умовам ліцензії, реалізовувати нагляд за використанням смуг частот та їх завантаженістю, реагувати на випадки появи

завад, виявляти та протидіяти несанкціонованим радіовипромінюванням. Тобто центральне місце серед завдань радіомоніторингу займає вимірювання параметрів та характеристик радіовипромінювань.

У першому розділі роботи з метою обґрунтування напряму дослідження проводиться аналіз методів вимірювання параметрів радіовипромінювання під час радіомоніторингу. За результатами аналізу виділяються актуальні для підвищення ефективності радіомоніторингу наукові завдання, надається інформація про поточний стан справ щодо вказаних завдань та обґрунтовуються напрями їх розв'язку.

1.1 Частотний менеджмент

В технічній літературі застосовуються терміни: управління РЧР, регулювання РЧР та частотний менеджмент. Зміст цих термінів дещо відрізняється [10]. В даній роботі розглядаються питання, що за своїм змістом належать до частотного менеджменту, під яким розуміють «сполучення адміністративних, наукових і технічних процедур, необхідних для ефективної роботи обладнання і служб радіозв'язку без створення радіозавад» [11].

Основні завдання частотного менеджменту представлені на рис. 1.1 [10].

Державне регулювання використання РЧР характеризуються складною ієрархічною структурою, що передбачає комплекс процедур і заходів [10]. На першому верхньому рівні структури відбувається розподіл частотних смуг між радіослужбами, на другому рівні – частотні смуги виділяються для впровадження нових радіотехнологій, на третьому – проводиться ліцензування користувачів РЧР, на четвертому – присвоєння частот РЕЗ, на п'ятому – забезпечення беззавадової експлуатації РЕЗ.

Одне з центральних місць в системі частотного менеджменту займає радіомоніторинг оскільки дані про реальний стан використання РЧР отримуються в результаті проведення радіомоніторингу а також перевірок відповідності експлуатації РЕЗ нормативним документам, розслідування випадків появи радіозавад, проведення натурних випробувань електромагнітної

сумісності, наприклад, для нових радіотехнологій. Останні три джерела інформації не мають достатньої повноти і періодичності для характеристики стану використання РЧР країни.

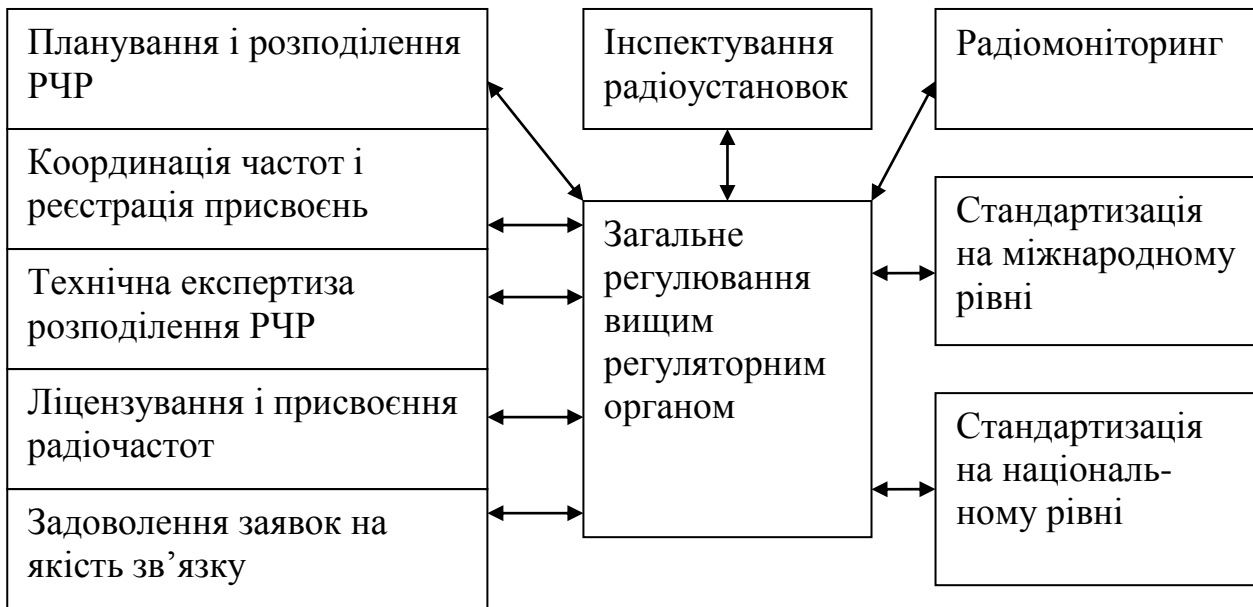


Рис. 1.1. Основні завдання системи частотного менеджменту

Нормативна база радіомоніторингу на міжнародному рівні відображається в документах Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ), Європейської конференції поштів і телеграфу і Європейського інституту стандартів телекомунікацій (ETSI).

Українська нормативна база включає Закони України «Про радіочастотний ресурс України» та «Про телекомунікації» [1,4], нормативні документи «План використання радіочастотного ресурсу України» та «Національна таблиця розподілу смуг радіочастот України», що затверджені постановами Кабінету Міністрів України [5,6], також документи за рішеннями Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації (НКРЗІ) [7-9].

Державне підприємство «Український державний центр радіочастот» (УДЦР) підпорядковано НКРЗІ і має повноваження здійснювати присвоєння радіочастот радіоелектронним засобам (РЕЗ) у смугах радіочастот загального

користування, ведення реєстру присвоєнь радіочастот; готувати висновки щодо можливості та умов видачі ліцензій на користування радіочастотним ресурсом України; здійснювати технічну експертизу на відповідність параметрам електромагнітної сумісності і вимогам державних стандартів РЕЗ, високочастотних пристроїв, об'єктів і споруд зв'язку перед їхнім впровадженням [8].

Характерною ознакою проведення радіомоніторингу є отримання інформації про джерело радіовипромінювання дистанційно за допомогою антени, яка розміщується в електромагнітному полі джерела. До антени підключається вимірювальний приймач або аналізатор спектра. Далі інформація оброблюється в комп'ютері.

Під час радіомоніторингу реалізуються наступні заходи [10,12]:

- пошук і виявлення радіовипромінювань;
- спостереження за випромінюванням;
- селекція радіовипромінювань;
- вимірювання параметрів радіовипромінювання;
- радіопеленгація джерел радіовипромінювання;
- ідентифікація радіовипромінювань та їх джерел;
- знаходження географічних координат джерел радіовипромінювання.

1.2 Методи пошуку і виявлення радіовипромінювань

Пошук виконується в певному частотному діапазоні. Швидкість пошуку можна розділити на повільну, середню та швидку. За повільної швидкості період сканування смуги частот більше періоду сигналу, що відповідає виявленню неперервно працюючих засобів. При цьому нетривалі випромінювання можуть бути пропущені. За середньої швидкості також існує ймовірність пропускання коротких за тривалістю сигналів протягом одного періоду пошуку. Швидкою вважається зміна настроювання приймача у сотні/тисячі МГц на мкс. У цьому випадку покращуються умови виявлення короткотривалих випромінювань. Проте знижується точність визначення

частоти випромінювання, а також роздільна здатність результатів пошуку в частотній області.

Рішення про наявність радіовипромінювання приймається за критерієм перевищення потужності прийнятого сигналу порогу, який визначається потужністю шумів. В науково-технічних джерелах немає інформації про інший критерій виявлення радіовипромінювань.

Під час виявлення радіовипромінювань у процесі радіомоніторингу взагалі існують три альтернативні рішення: очікуване радіовипромінювання прийнято, очікуваного радіовипромінювання немає, прийнято сигнал невідомого джерела радіовипромінювання. На практиці завдання спрощується оскільки служба радіомоніторингу володіє апріорною інформацією: у відповідності до Національної таблиці розподілу смуг радіочастот України [6] відомі радіослужби, які працюють в кожній частотній смузі; а у відповідності до Плану використання радіочастотного ресурсу України [5] – радіотехнології; існує база даних реєстру присвоєнь частот РЕЗ в УДЦР. Тому, як правило, розглядаються перші два альтернативні рішення.

Значення імовірності правильного виявлення та хибної тривоги залежать від ряду факторів, серед яких: якість вимірної апаратури та електромагнітна обстановка (ЕМО) у радіоканалі. За складної ЕМО виявлення радіовипромінювання ускладнюється, оскільки в умовах високої щільності випромінювань та рівня завад важче визначити потужність шумів. Потрібно обрати частину частотної смуги без радіовипромінювань та оцінити щільність потужності шумів. Поріг виявлення обирається на 3-5 дБ вище рівня шумів.

Вірогідність виявлення підвищується якщо рішення приймається за результатами не одного, а декількох сканувань частотної смуги.

1.3 Спостереження за радіовипромінюванням

Зміст спостереження полягає у накопиченні інформації щодо радіовипромінювання шляхом його періодичної ідентифікації та вимірювання параметрів з метою: контролю за використанням РЧР, зайнятості радіоканалу, моніторингу параметрів, виявлення джерел завад, вивчення поширення радіохвиль у конкретних умовах. Узагальнення даної інформації дає змогу оцінювати зайнятість як частотних смуг, так і окремих каналів. Спостереження, в основному, проводиться стаціонарними станціями радіомоніторингу [12].

Дослідження щодо зайнятості частотних смуг і каналів координуються ІТУ. Результати досліджень включені до рекомендацій [13,14] та звіту [15].

Зайнятість частотного каналу дорівнює відношенню часу перевищення сигналом рівня порогу T_0 до часу інтеграції T_I

$$FCO = \frac{T_0}{T_I}.$$

Часом інтеграції називають період часу, протягом якого усереднюються значення зайнятості. Його типові значення визначаються швидкістю зміни зайнятості і складають 5 хв., 15 хв., 1 год., одну добу або весь період спостереження. Під порогом розуміють рівень сигналу (постійний або змінний) на вході приймача, за яким вважають канал вільним або зайнятим.

При постійній періодичності контролю FCO може визначатися відношенням числа вибірок з перевищенням сигналом рівня порогу N_0 до загального числа вибірок за час інтеграції N_I

$$FCO = \frac{N_0}{N_I}.$$

Відношення числа частот N_0 у смузі, які є зайнятими, до загальної кількості частот N з періодичністю дає зайнятість смуги частот (дискретність частот у смузі повинна бути такою щоб відображати розділення каналів)

$$FBO = \frac{N_0}{N}.$$

Поняття ресурсу спектра залежить від радіотехнології і характеризує його використання через розміри зони обслуговування, часові показники, кількість

частотних каналів. Зайнятість ресурсу спектра SRO знаходиться як відношення кількості працюючих каналів до загальної кількості каналів частотної смуги

$$SRO = \frac{N_{och}}{N_{ch}},$$

де: N_{och} - кількість вибірок на центральних частотах будь-якого каналу, в яких рівень сигналу перевищує поріг; N_{ch} - загальна кількість вибірок на центральних частотах каналів протягом часу інтеграції.

Як показано в [15], роздільна здатність вимірювальної апаратури за частотою повинна бути більшою за мінімальне рознесення каналів у смузі. Мінімальні значення відношення сигнал/шум на вході вимірювального обладнання складають: 20 дБ для вузькосмугових аналогових ліній зв'язку, 40 дБ для широкосмугових аналогових ліній зв'язку, 15 дБ для цифрових систем. Потрібно адаптивно обирати підсилення апаратури в залежності від місця вимірювання: рівень шумів в частотних каналах не повинен перевищувати поріг. Можлива як попередня установка рівня порогу, так і динамічна, що залежить від ситуації. Якщо відомі потрібне відношення сигнал/шум та мінімальна корисна напруженість поля, то поріг обирають рівним мінімальній корисній напруженості поля або чутливості приймача плюс відношення сигнал/шум для відповідної служби.

При використанні динамічного визначення порогу потрібна оцінка рівня шумів. За прямим вимірювання рівня шуму визначається вільний частотний канал поблизу каналу виявлення, проводиться вимірювання потужності шумів в моменти часу наближені до оцінки параметрів радіовипромінювання та з однаковою шириною смуги пропускання приймача. Тривалість вимірювання повинна бути меншою за тривалість кадру передачі, а час між повторними вимірюваннями – за середню тривалість передачі.

Кількість вибірок для оцінки зайнятості залежить від рівня відносної точності оцінки (вважається, що 1000 є достатнім [12]), рівня вірогідності, виду сигналів, кількості переходів РЕЗ від режиму випромінювання до неробочого стану.

Зайнятість смуги частот часто представляють спектрограмою, в якій рівень зайнятості відображається кольором. Додаткову інформацію надає графік, на якому на осі ординат позначені відсотки зайнятості частот протягом часу спостереження, а на осі абсцис – частоти смуги.

1.4 Визначення параметрів радіовипромінювання

Вимірювання параметрів радіовипромінювання є найбільш науко- і трудомістким процесом. Аналіз методів вимірювання особливо в частині їх застосування для сучасних радіотехнологій може надати інформацію щодо шляхів вдосконалення радіоконтролю.

1.4.1 Частота випромінювання

Під частотою випромінювання найбільш часто розуміють несучу частоту, для окремих сигналів – частоту опорного коливання або середню частоту спектра. За допомогою частотоміра вимірюють аналогові сигнали, а з аналізатором спектра можна визначати як частоту несучої, піднесучої, так і середню частоту спектра (сигнали OFDM, COFDM, FHSS). Більшу точність та швидкодію вимірювання частоти цифрових сигналів дає метод вимірювання миттєвої частоти.

За даним методом вхідне гармонічне коливання порівну поділяється на два канали, в одному з яких сигнал затримуються на інтервал τ . Сигнали каналів перемножуються [12]

$$U(t) = U_0^2 \cos(\omega_0) \cos[\omega_0(t - \tau)] = \frac{U_0^2}{2} \{\cos(\omega_0\tau) + \cos[2 \cdot \omega_0 \cdot (t - \tau)]\}, \quad (1.1)$$

де: U_0 - амплітуда напруги каналів; ω_0 - частота вхідного коливання.

Другий доданок в (1.1) відфільтровується, а перший – використовується для визначення миттєвої частоти:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \arccos \frac{2U(t)}{U_0^2 H(f_0)},$$

де: $H(f_0)$ - коефіцієнт передачі фільтра низьких частот на частоті f_0 .

За іншим методом визначення миттєвої частоти цифрового сигналу під час кожного вимірювання визначається фаза у квадратурних каналах I і Q

$$\varphi = \arctg\left(\frac{I}{Q}\right).$$

За інтервал спостереження τ миттєва фаза φ змінюється. Миттєва частота знаходиться із використанням значень фази на інтервалі τ

$$f = \frac{\varphi(t) - \varphi(t - \tau)}{2\pi\tau}.$$

Тривалість вибірки, яка використовується для усереднення миттєвих значень частоти, залежить від радіотехнології. Часто приймається значення тривалості в 1 с.

Частота радіовипромінювання вимірюється також із застосуванням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Частота визначається за спектральною складовою із максимальним рівнем або шляхом усереднення спектру. Для використання ШПФ має бути відповідність між кількістю відліків сигналу N як функції часу з роздільною здатністю Δf за частотою

$$N \geq \frac{f_{\max}}{\Delta f}, \quad (1.2)$$

де: f_{\max} - максимальна частота спектра сигналу.

Точність вимірювання частоти може досягати значень $\pm 10^{-8} \dots \pm 10^{-11}$. Із зменшенням смуги частот, що аналізується, і збільшенням тривалості вибірки, зменшується частота відліків за часом (*ZOOM FFT*). При цьому умови вимірювання покращуються.

Потрібно зазначити, що точність вимірювання залежить від частотного діапазону, призначення РЕЗ і регламентується Rec. ITU-R SM.337-4. Так в сантиметровому діапазоні хвиль точність вимірювання має бути $\pm 10^{-8}$.

1.4.2. Рівень сигналу

Рівень сигналу визначається на вході радіоприймального пристрою і представляється в одиницях напруженості поля або щільності потужності. Вірогідність результатів вимірювання залежить від ряду факторів, одним з головних є вибір типу детектора.

Піковий рівень сигналу характеризує не тільки його максимальне значення, але і вплив інтерференції. Вимірюється піковим детектором, або іншим детектором в режимі утримання максимального значення.

Середньоквадратичний рівень сигналу характеризує середню енергію неперервного сигналу. Використовується для визначення зони дії РЕЗ, ЕМС з іншими засобами і оцінюється на основі вибірок, отриманих за допомогою детектора середнього значення.

Середній рівень імпульсу вимірюють для тих же цілей, що і середньоквадратичний рівень сигналу, але для TDMA сигналів. Тривалість вибірки є меншою за тривалість імпульсу. Початок вимірювань потрібно синхронізувати з сигналом, що не завжди можна реалізувати за допомогою аналізаторів спектра і вимірювальних приймачів.

Ширина смуги частот вимірювального засобу обирається меншою за ширину спектра сигналу. Сучасні вимірювальні радіоприймачі включають піковий детектор, середньоквадратичний детектор, детектор середнього значення та квазіпіковий детектор. Вірогідність результатів при застосуванні аналізатора спектра залежить від правильного вибору роздільної здатності за частотою (*RBW*) та режиму роботи приладу.

1.4.3. Вимірювання напруженості поля та щільності потужності

Взагалі мета вимірювання напруженості поля та щільності потужності може бути різною. Під час радіомоніторингу – перевірка відповідності результатів встановленим нормативним показникам, що зазначені в ліцензії на експлуатацію.

Вимірювання напруженості поля передбачає використання відомої формули з теорії приймальних антен

$$E = \frac{EPC}{l_\delta}, \quad (1.3)$$

де : EPC – електрорушійна сила, що збуджується в антені; l_δ - діюча довжина лінійної антени.

Еквівалентна схема приймальної антени включає джерело EPC , вхідний опір антени $Z_a = R_a + X_a$ та опір навантаження $Z_n = R_n + X_n$. За узгодженості вхідного опору антени з опором навантаження за реактивністю $X_a = -X_n$, напруга на навантаженні (напруга на вході радіоприймача)

$$U_n = EPC \frac{R_n}{R_a + R_n}. \quad (1.4)$$

Тоді (1.3) записується у вигляді

$$E = \frac{U_n}{l_\delta} \cdot \frac{R_a + R_n}{R_n}.$$

Для визначення напруженості поля з урахуванням втрат у фідері і вхідної напруги приймача $U_{\text{вх}}$ використовується антенний фактор

$$K_a = \frac{E}{U_{\text{вх}}}.$$

Часто напруженість поля виражають у логарифмічному масштабі, наприклад, $\text{дБ}(\text{мкВ}/\text{м})$.

На частотах вище 1 ГГц рівень електромагнітного поля прийнято представляти в одиницях щільності потужності. Для апертурних антен щільність потужності (вектор Пойнтінга Π) зв'язана з максимальною потужністю у навантаженні антени через діючу площу антени S_δ

$$P_{\text{макс}} = \frac{\Pi}{S_\delta}.$$

Для однорідної плоскої електромагнітної хвилі в тропосфері напруженість поля зв'язана з щільністю потужності через хвильовий опір середовища W

$$\Pi = \frac{E^2}{2W}.$$

Напруженість поля (густина потужності) може вимірюватись на основі оцінки сигналу у часовій області, приведенного до входу приймача, або на основі

спектра. Перший метод реалізується в станціях радіомоніторингу, оскільки є більш простим і має більшу швидкодію. Другий метод можна використати за допомогою аналізаторів спектра, в якому вимірюється канална потужність [12]:

$$P_{кан} = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \Delta f,$$

де : S_i - щільність потужності i -ої складової спектра сигналу [Вт/Гц]; n – кількість відліків у спектрі; Δf - роздільна здатність спектра.

В логарифмічному масштабі

$$P_{кан} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^n 10^{S_i/10}}{n+1} \right).$$

Використуються наступні рекомендації з вибору режиму роботи аналізатора спектра [17]: ширина смуги частот ($Span$), що розглядається, має суттєво (до двох разів) перевищувати ширину спектра сигналу; значення розділення за частотою RBW складає 3...5 % від $Span$; ширина смуги за відео частотою VBW (після детектора обвідної) не менше ніж в три рази більша за RBW .

Методи вимірювання напруженості поля під час радіоконтролю представлені в Рес. ITU-R SM.338-7 [18]. Похибка вимірювання повинна бути в межах $\pm 2\text{дБ}$ для смуги $9\text{кГц}...30\text{МГц}$ і $\pm 3\text{дБ}$ для $30\text{МГц}...3\text{ГГц}$. Даються рекомендації щодо розміщення антен, точності визначення коефіцієнта підсилення антени, калібровки вимірювальних приймачів, тощо.

Калібровка антени та фідерної системи під час вимірювань, як правило, не проводиться, оскільки використовуються параметри, що отримані на етапі виробництва та зазначені в документації на апаратуру станції радіомоніторингу. Потрібно зазначити, що антенні параметри залежать від частоти. Тому для отримання максимальної точності бажано визначити коефіцієнти підсилення антени або значення антенного фактору на відповідних частотах.

Допуск на похибки, що наведені в [18], передбачає сприятливі умови, а саме: відсутність зовнішніх завад та інтерференції хвиль, в тому числі при багатошляховому поширенні, застосування апаратури з низьким рівнем власних шумів. Цьому сприяє використання спрямованих антен. Взагалі сприятливі умови радіоконтролю характерні для стаціонарних станцій радіомоніторингу.

Методика вимірювання напруженості поля [19], розроблена в УДЦР, деталізує процес радіоконтролю. В частині вимог до обладнання зазначається: отримання вимірів пропорційних середньоквадратичному значенню напруженості поля радіочастотного сигналу; динамічний діапазон не менше 60 дБ; можливість збереження отриманих даних та їх оброблення в комп'ютері.

Потрібно вибрати антену, що відповідає діапазону частот і умовам вимірювання, визначити необхідність її калібрування, знайти оптимальне значення затухання атенюатора у складі радіоприймача.

1.4.4. Вимірювання ширини смуги частот радіовипромінювання

Поняття ширини смуги частот радіовипромінювання деталізується в нормативних документах. У відповідності до них розрізняють необхідну ширину смуги частот (НШСЧ), займану ширину смуги частот (ЗШСЧ), ширину смуги частот радіовипромінювання на рівні X дБ, контрольну ширину смуги частот, ширину основної смуги та присвоєну смугу частот.

Згідно з ДСТУ 3254-95 [20] НШСЧ – мінімальна смуга радіочастот певного класу радіовипромінювання, необхідна для передавання повідомлень із заданою якістю. Визначення з Регламенту радіозв'язку [3] включає також швидкість передачі. НШСЧ – ширина смуги частот для певного класу випромінювання, яка достатня для забезпечення передавання інформації зі швидкістю та якістю, потрібними для заданих умов.

ЗШСЧ радіовипромінювання – ширина смуги частот радіовипромінювання, за межами якої випромінюється не більше ніж задана частина β від загальної

потужності сигналу РЕЗ [21]. Якщо Рекомендація ITU-R не містить додаткової інформації для певного класу випромінювання, то поза верхньою і нижньою межею смуги знаходиться по $\frac{\beta}{2} = 0,5\%$ від загальної потужності випромінювання РЕЗ. За Регламентом радіозв'язку ЗШСЧ – ширина смуги частот радіовипромінювання, за межами якої потужність випромінювання складає задану частину від загальної потужності випромінювання. Тобто визначення практично співпадають. Візуально ЗШСЧ представлена на графіку залежності спектральної щільності потужності від частоти, рис. 1.2.

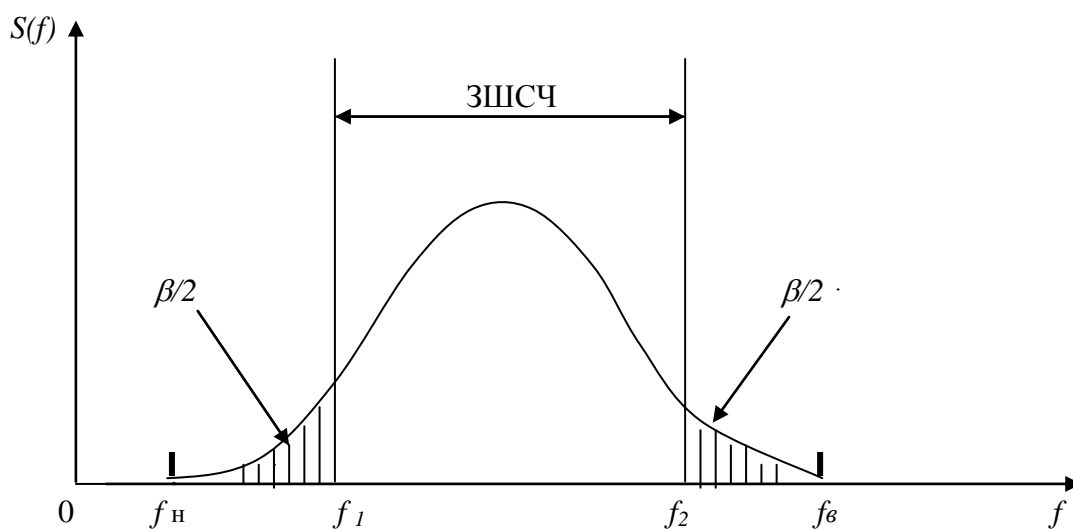


Рис. 1.2. Займана ширина смуги частот радіовипромінювання.

Ширина смуги частот радіовипромінювання на рівні X дБ – ширина смуги частот, за межами якої будь-який спектральний складник має послаблення на X дБ і більше відносно рівня випромінювання, прийнятого за 0 дБ [20].

Контрольна смуга радіочастот – смуга частот, за верхньою та нижньою межами якої будь-яка спектральна складова має послаблення на 30 дБ і більше відносно рівня випромінювання, прийнятого за 0 дБ [20].

Ширина основної смуги є перекладом відомого англomовного терміна Baseband bandwidth. Це – ширина смуги частот, займана одним сигналом або декількома ущільненими сигналами, які повинні передаватися по лінії або радіопередавальній системі [17].

Присвоєна смуга частот – смуга частот, в якій дозволено випромінювання станції [3].

Під позасмуговим спектром розуміють частину густини потужності, яка знаходиться поза НШСЧ і є результатом процесу моделювання за виключенням побічних випромінювань [21].

РЧР буде використовуватися оптимальним чином за умови рівності займаної ширини смуги частот необхідній ширині смуги частот відповідного класу радіовипромінювання [21,22]. Якісне функціонування радіолінії передбачає відповідність між радіовипромінюванням та характеристиками радіоприймального пристрою. Тому НШСЧ характеризує весь тракт передавання модульованого сигналу [12]. Визначення необхідної ширини смуги частот для класів випромінювання містяться у Rec. ITU-R SM.1138 [22] і у національних документах, наприклад [23,24]. Значення НШСЧ визначаються за формулами або, у випадку сучасних цифрових радіотехнологій, надаються їх значення та відповідні частотні маски.

У відповідності до Rec. ITU-R SM.443-4 на практиці застосовуються два основних методи вимірювання ширини смуги частот випромінювання: $\beta/2$ -метод і метод X дБ. На рис. 1.3 зліва розглядаються випадки відповідності спектра випромінювання нормативному значенню НШСЧ за $\beta/2$ -методом, а у лівій частині – за методом X дБ.

При більшій за оптимальну ширині спектра можуть виникнути проблеми з електромагнітною сумісністю з іншими РЕЗ. Якщо займана ширина смуги частот є меншою за необхідну, то у відповідності до визначення НШСЧ відбувається втрата якості під час передавання, що може призвести до спотворень, зниженні швидкості передавання.

Практика УДЦР [2] свідчить, що ЗШСЧ більша за НШСЧ, що пояснюється нестабільністю характеристик радіопередавача, неоптимальністю вибору параметрів передавання. Також потрібно зазначити, що на практиці використовуються безпосередні методи вимірювання ($\beta/2$ і X дБ) ЗШСЧ. Так

відбувається тому що непрямі методи більш складні і не характеризуються універсальністю по відношенню до класів радіовипромінювання.

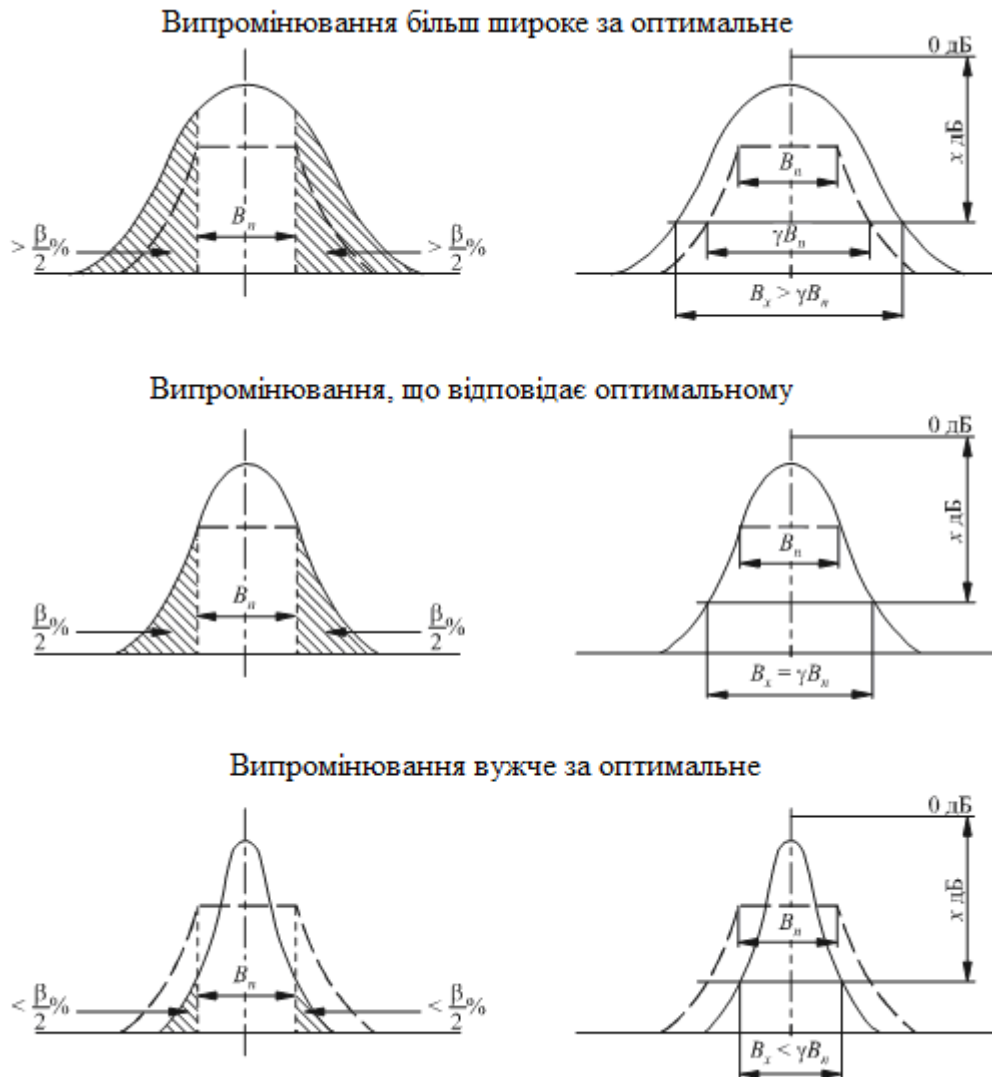


Рис. 1.3. Відповідність спектра випромінювання нормативному значенню НШСЧ. Позначення: B_n - необхідна ширина смуги частот; B_x - ширина смуги частот на рівні X дБ; x - значення рівня вимірювання, дБ; γ - коефіцієнт зв'язку між шириною смуги частот на рівні X дБ і НШСЧ, який визначається рівнем X дБ і кривою позасмугової потужності.

В Rec. ITU-R SM.443-4 характеризуються умови застосування і точність $\beta/2$ -методу. Точність визначення ЗШСЧ підвищується при формі спектра з крутими схилами і за меншого значення роздільної здатності RBW . Інтервал вимірювання не повинен бути дуже широким з метою виключення потужності

шумів, але він має враховувати спектральні складові нижче 25 дБ. З метою отримання точності оцінки ЗШСЧ менше 10% рекомендується використовувати мінімальне відношення потужностей у сусідніх каналах або мінімальну різницю пікового рівня і рівня крайніх частот у 30 дБ, рис. 1.4. Внаслідок флуктуацій сигналу для отримання усередненого значення ЗШСЧ кількість вимірів має бути не менше за 400.

Формалізація процесу вимірювання за $\beta/2$ -методом представлена системою рівнянь [2,25]:

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{\infty} S(f) \cdot df &= P; \\ \int_0^{f_1} S(f) \cdot df &= P \cdot 0,5\beta; \\ \int_{f_2}^{\infty} S(f) \cdot df &= P \cdot 0,5\beta. \end{aligned} \right\} , \quad (1.5)$$

де: P – потужність сигналу, що зосереджена у спектрі; f_1, f_2 - відповідно нижня та верхня гранична частота займаної частотної смуги.



Рис. 1.4. Різниця між піковим рівнем спектра сигналу і рівнем крайніх частот.

Під час практичного використання $\beta/2$ -методу використовується ітераційна процедура визначення границь спектра, за якою спочатку обирається початкова ширина смуги частот. Надалі обрана смуга поступово звужується до настання моменту суттєвого зменшення значення ЗШСЧ.

Рекомендується користуватися спрямованою приймальною антеною, яка розміщується у дальньому полі випромінювання передавальної антени та в умовах прямої видимості між антенами.

За методом X дБ визначається опорний рівень 0 дБ, за який, як правило, обирається спектральна складова з найбільшим рівнем. Від опорного рівня відраховується обраний рівень X дБ, рис. 1.5. Для досягнення точності вимірювання в межах 10% різниця між опорним рівнем та рівнем шумів повинна складати не менше $X+5$ дБ.

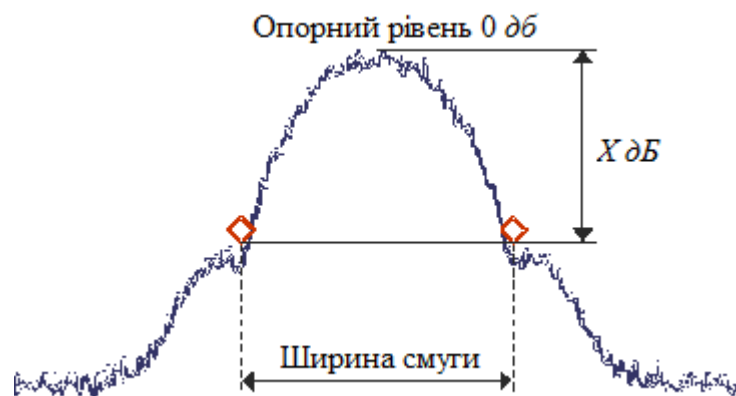


Рис. 1.5. Вимірювання ЗШСЧ за методом 0 дБ.

У деяких випадках методом X дБ можна виміряти ЗШСЧ навіть у присутності завад, наприклад у випадку двох завад 1 і 2 на рис. 1.6 [21].

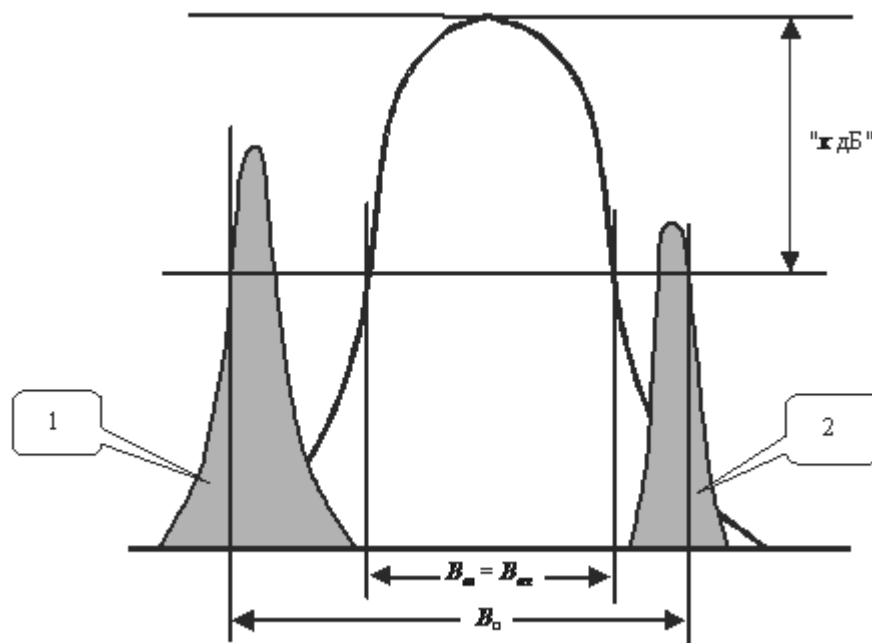


Рис. 1.6. Вимірювання ЗШСЧ за методом X дБ у присутності двох завад.

Оцінку ЗШСЧ можна отримати на основі вимірювання половини займаної смуги за наявності завади 3, рис. 1.7.

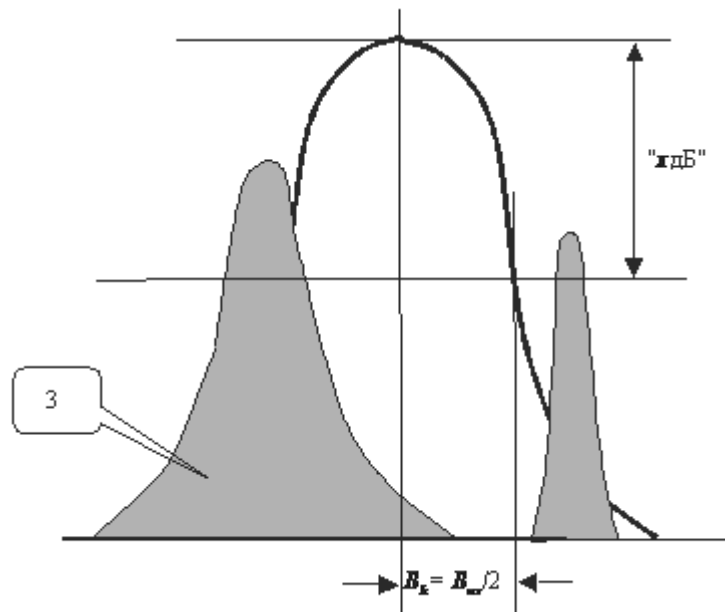


Рис. 1.7. Вимірювання ЗШСЧ за методом $X \text{ дБ}$ за правою частиною спектра.

Точність застосування методу залежить від визначення опорного рівня. Універсального методу встановлення опорного нульового рівня не існує. Як зазначено вище, для значного числа класів аналогових та цифрових сигналів обирається спектральна складова з максимальною щільністю потужності. Даний підхід не спрацьовує у випадку частотно-модульованих сигналів, у яких спостерігається часова зміна рівня несучої відповідно до модуляції. Загальний випадок: визначення опорного рівня за рівнем немодульованого сигналу несучої. Рекомендації щодо визначення опорного рівня класів випромінювання наводяться у ГОСТ 30318-95 [25].

В роботі [26] розглядається метод заміщення для поширених класів випромінювання, за яким у процесі випромінювання аналізатором спектра можна визначити рівень немодульованої несучої складової спектра. Далі на аналізатор спектра від генератора подається гармонійний сигнал того ж рівня, що і немодульованої несучої. Аналізатор спектра калібрується за максимальною спектральною складовою. Умовами використання методу заміщення є відсутність завмирань, незмінність налаштувань аналізатора спектра та похибка

приладу не більше 2 дБ. Під час планового радіоконтролю метод заміщення не використовується.

Вимірювання за рівнем X дБ реалізується за допомогою методів спектрального аналізу [11]. Метод послідовного аналізу передбачає використання одиночного фільтра з вузькою смугою пропускання, яку можна зміщувати вздовж частотної осі автоматично або в ручному режимі. На кожній частоті настройки фільтра в обраній частотній смузі можливе пряме вимірювання ширини смуги частот радіовипромінювання. Послідовний метод застосовується в аналізаторі спектра. Точність результатів залежить від форми спектра сигналу. Наприклад, вимірювання ЗШСЧ за методом X дБ сигналу із значною кількістю спектральних складових низького рівня характеризується значними похибками.

За паралельним методом вимірювання частотна смуга поділяється на ряд частин. Кількість частин дорівнює кількості вузькосмугових фільтрів. Паралельний метод характеризується більшою швидкістю і більшою апаратною складністю у порівнянні з послідовним, а також дозволяє ефективно вимірювати ЗШСЧ неперіодичних сигналів.

Серед інших методів реалізації вимірювання ширини смуги частот радіовипромінювання на рівні X дБ, що застосовуються в апаратурі радіоконтролю, потрібно відзначити використання швидкого перетворення Фур'є.

В країнах СНД поширена практика вимірювання контрольної ширини смуги частот за методом X дБ на рівні – 30 дБ. Вибір даного рівня пояснюється тим, що для багатьох класів радіовипромінювання різниця значень НШСЧ і КШСЧ складає (10 – 20)% [2,21].

За Rec. ITU-R SM.443-4 існують два підходи порівняння ЗШСЧ за методом X дБ і необхідною шириною смуги частот. За першим – вимірюють ЗШСЧ на рівні – 26 дБ, а потім застосовують коефіцієнт перетворення. За другим – вимірюють ЗШСЧ на рівнях X дБ, які відповідають НШСЧ окремо для кожного класу випромінювання. Таблиці відповідності ширини смуги частот класів

випромінювання включені до нормативних документів [21, 23, 24]. Причому Норми 19-13 (РФ) включають дані щодо цифрових радіотехнологій.

Крім наведеного вище ітераційного методу вимірювання ЗШСЧ з визначенням відношення потужностей ($\beta/2$ - метод) у роботі [27] розглядається методика, за якою обирається достатньо широка частотна смуга, проводиться вимірювання загальної потужності спектра сигналу, потужності в області нижніх частот від початку частотної смуги до рівня 0,5% від загальної потужності, аналогічно 0,5% потужності в області верхніх частот. Для отримання задовільної точності вимірювання, на наш погляд, рівень сигналу повинен перевищувати рівень шумів на 25...30 дБ, а не зазначені 15 дБ. Доцільно також виключити із загальної частотної смуги ділянки, в яких різниця рівня спектральної щільності потужності сигналу і рівня шумів менше 6 дБ [27].

Перетворення сигналу з часової у частотну область найчастіше реалізується за допомогою швидкого перетворення Фур'є [28,29]. За ШПФ число відліків сигнальної вибірки N у часовій області повинно бути кратним ступені два та обиратися за формулою:

$$N = \frac{F_{дискр}}{\Delta f} \geq \frac{2f_{c\max}}{\Delta f},$$

де $F_{дискр}$ - частота відліків вибірки у часовій області; Δf - дискретність спектра; $f_{c\max}$ - максимальна частота спектра сигналу при перенесенні його до нульової частоти.

Тобто для досягнення бажаної роздільної здатності за частотою, яка необхідна для визначення ЗШСЧ за $\beta/2$ - методом, потрібно забезпечити достатню тривалість сигнальної вибірки.

Спектральні складові сигналу за ШПФ визначається за формулою:

$$G(m_{\Delta}f) = \sum_{n=0}^{N-1} U(n_{\Delta}t) e^{-j2\pi mn/N}, \quad (1.6)$$

де: $G(m_{\Delta}f)$ - значення щільності потужності на частоті $m_{\Delta}f$; m - номер спектральної складової; n - номер відліку в часовій області; $U(n_{\Delta}t)$ - значення вибірки сигналу в момент часу $n_{\Delta}t$.

1.5. Вимоги до обладнання радіомоніторингу

Міністерство зв'язку і інформатизації Російської Федерації в 2001 р. затвердило галузевий документ із загальними вимогами до обладнання радіомоніторингу [47]. Перелік завдань та режимів апаратури радіомоніторингу розміщено в табл. 1.1, а також вимоги до вимірювальних приймачів, табл. 1.2 та табл. 1.3.

Таблиця 1.1

Перелік завдань та режими роботи обладнання радіомоніторингу

№ п/п	Найменування завдань та режимів роботи	Категорія обладнання		
		А	Б	В
1	2	3	4	5
1	Контроль завантаження (зайнятості) радіочастотного спектра та визначення ступеня використання смуг частот:			
1.1	послідовний перегляд зайнятості смуг (списку) частот	Обов'язкове	Обов'язкове	Обов'язкове
1.2	можливість одночасного виконання вимірювань параметрів радіовипромінювань та запису сигналів	Обов'язкове	Обов'язкове	-
1.3	панорамний (широкосмуговий) перегляд зайнятості смуги частот	Обов'язкове	-	-
2	Контроль та вимірювання параметрів радіовипромінювання:			
2.1	частоти	Обов'язкове	Обов'язкове	Обов'язкове
2.2	рівня	Обов'язкове	Обов'язкове	Обов'язкове
2.3	напруженості поля	Обов'язкове	Обов'язкове	-
2.4	ширини смуги частот за методом X-дБ	Обов'язкове	Обов'язкове	-
2.5	ширини смуги частот за методом β %	Обов'язкове	За одним методом	-
2.6	параметрів модуляції	Обов'язкове	Обов'язкове	-
3	Розпізнавання радіосигналів, пошук та ідентифікація джерел радіовипромінювань (у тому числі радіозавад):			
3.1	прослуховування сигналів	Обов'язкове	Обов'язкове	Обов'язкове

Продовження Таблиці 1.1

1	2	3	4	5
3.2	спостереження спектра сигналів на аналізаторі спектра	Обов'язкове	Обов'язкове	Обов'язкове
3.3	автоматичний аналіз сигналів, що приймаються (декодування сигналів та інші методи обробки)	Обов'язкове	Обов'язкове	-
3.4	визначення напрямку на джерело радіовипромінювання (у тому числі радіозавади)	Обов'язкове	Обов'язкове	
3.5	визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання окремою станцією	Обов'язкове	-	-
3.6	порівняння параметрів виявлених джерел радіовипромінювань з параметрами РЕЗ, які зберігаються у базі даних	Обов'язкове	Обов'язкове	-
3.7	розпізнавання побічних випромінювань	Обов'язкове	Обов'язкове	-
Режими управління				
1	Локальне управління оператором	Обов'язкове	Обов'язкове	
2	Дистанційне управління або робота у мережі	Обов'язкове	Обов'язкове	-

Таблиця 1.2

Вимоги до вимірювальних приймачів

Параметри	Категорія обладнання			
	А1		А2	
	До 30 МГц	Вище 30 МГц	До 30 МГц	Вище 30 МГц
1	2	3	4	5
Дискретність настроювання за частотою, Гц, не більше	1	10	10	1000
Нестабільність частоти опорного генератора, $(G) \times 10^{-7}$, не більше за добу	1		10	
Час настроювання синтезатора, мс, не більше	-	0,3	-	20
Смуга пропускання, кГц	До 16	До 900	До 9	До 300
Чутливість, мкВ, не менше *	1 (в режимах АМ та ЧМ)			
Заглушення радіозавади ПЧ, дБ, не менше	100	90	80	80
Заглушення сигналів дзеркальної частоти, дБ, не менше	100	90	80	80
Точка перетину 2-го порядку, дБм, не менше	70	40	40	30
Точка перетину 3-го порядку, дБм, не менше	40	17	20	10
Коефіцієнт шуму, дБ, не ,більше	14	8	14 (вище 50 кГц)	
Фазовий шум гетеродина, мінус дБ/Гц, не більше	120	120	100	100
Дистанційне управління, протокол	RS232C			
Діапазон дії АРП, дБ, не менше	140	120	80	120
Детектування, види модуляції, не менше	АМ, ЧМ, ФМ, ВБИ/НБИ, ЧТ			
Детектори, які використовуються, функція	Лінійно усереднена, квазіпікова, пікова, логарифмічна, середньоквадратична			

Продовження Таблиці 1.2

1	2	3	4	5
Антенний вхід: вхідний опір, КСХ	50; 2,5		50; 3	
Макимально припустима напруга на вході, В, не менше	5	3	5	3
Вхід/вихід опорного генератора, МГц	10			
Вихід сигналу ПЧ, вид	Цифровий і аналоговий		Аналоговий	
Вибірковість від 60 дБ до 6 дБ, відношення смуг частот, не більше	2:1		Від 2:1 до 8:1	
Нерівномірність АЧХ у смузі частот пропускання, \pm дБ, не більше	0,5		1	
Режим вимірювань при частотній модуляції: SINAD \geq 20 дБ; $\Delta F = 10$ кГц; AF = 1 кГц Режим вимірювань при амплітудній модуляції: SINAD \geq 10 дБ; коефіцієнт АМ = 50%; AF = 1 кГц				

Таблиця 1.3

Вимоги до вимірювальних приймачів

№ п/п	Параметри	Категорія обладнання	
		Б	В
1	Дискретність настроювання за частотою, кГц, не більше	0,1 до 30 МГц 1,0 вище 30 МГц	1,0 до 30 МГц 5,0 вище 30 МГц
2	Нестабільність частоти опорного генератора (G) $\times 10^{-6}$, не більше за добу	5	50
3	Смуга перепускання, ряд значень, кГц	До 150	До 120
4	Заглушення завади ПЧ, дБ, не менше	50	-
5	Заглушення сигналів дзеркальної частоти, дБ, не менше	50	-
6	Чутливість, мкВ, не менше	3 (в режимах АМ та ЧМ)	10 (в режимах АМ та ЧМ)
7	Дистанційне управління, протокол	RS232C	-
8	Антенний вхід: вхідний опір, КСХ	50; 2,5	50; 3
9	Макимально припустима напруга на вході, В, не менше	3	3
10	Вихід сигналу ПЧ, вид	аналоговий	аналоговий
Режим вимірювань при ЧМ: SINAD \geq 20 дБ; $\Delta F = 10$ кГц; AF = 1 кГц Режим вимірювань при АМ: SINAD \geq 10 дБ; коефіцієнт АМ = 50%; AF = 1 кГц			

Аналіз функцій апаратури радіомоніторингу показує, що обладнання категорій А і Б повинно забезпечувати контроль всіх параметрів та характеристик радіовипромінювання, в тому числі вимірювання частоти, рівня, напруженості поля, ЗШСЧ (обом методами для категорії А) та параметрів модуляції.

Вимірювальні приймачі категорії А1 повинні мати параметри на рівні кращих зразків даної апаратури. Потрібно зазначити, що вимоги до смуги

пропускання є застарілими, оскільки не відповідають ЗШСЧ ряду сучасних цифрових радіотехнологій.

1.6. Постановка завдання дослідження

Аналіз нормативних та науково-технічних джерел свідчить про те, що в країні створена і успішно функціонує потужна і розгалужена система радіомоніторингу, основним завданням якої є забезпечення ефективного використання радіочастотного ресурсу.

В УДЦР, що безпосередньо організує та проводить радіомоніторинг, чинними є методика вимірювання напруженості електромагнітного поля [19], методика вимірювання девіації частоти РЕЗ радіомовної служби [31], методика вимірювання частоти [32], методика вимірювання ЗШСЧ [33], методика визначення зайнятості радіочастотних каналів [34].

Відповідно до методик, що затверджені в травні 2010 р., вітчизняна система радіомоніторингу використовує наступне обладнання [35-40]:

- багатофункціональну станцію радіоконтролю РМ-2500Р;
- компактну моніторингову систему (КМС) UMS100 при роботі в режимі автономного функціонування;
- КМС UMS100 при роботі у дистанційному режимі управління;
- автоматизовані комплекси АИК-С, АИК-СП;
- стаціонарну станцію радіоконтролю FMS1-UA;
- мобільну станцію радіоконтролю MMS1-UA;
- мобільну станцію радіоконтролю РМ-1300М-2РЗ.

Вказана апаратура в сукупності може реалізувати методи вимірювання параметрів під час радіомоніторингу, що зазначені в підрозділі 1.3. Тобто існують як методи, що апробовані на міжнародному рівні, так і сучасна апаратура вітчизняного і закордонного виробництва. Також аналіз розвитку системи радіомоніторингу свідчить про неперервне вдосконалення системи.

Розглянемо питання, що пов'язані з вимірюванням ЗШСЧ. У відповідності до Res. ITU-R SM.443-4 при використанні $\beta/2$ -методу різниця між опорним

рівнем і рівнем шумів повинна складати 30 дБ. Також за ГОСТ 30318-95 контрольна ширина смуги випромінювання вимірюється на рівні - 30 дБ від опорного рівня. Крім цього різниця рівня ЗШСЧ і рівня шумів повинна дорівнювати 5 дБ. Тобто потрібно щоб опорний рівень був більшим за рівень шумів на 35 дБ.

Експериментальні дослідження спектрів радіовипромінювання засобів цифрових радіотехнологій, результати яких надані фахівцями УДЦР а також вимірювання, проведені автором, показують, що рівень шумів - 30 дБ в умовах Києва є досяжним тільки за певних умов. Наприклад, вимірювання сигналів цифрового телебачення за допомогою антени, що встановлена на даху 3-го корпусу Національного авіаційного університету дозволяє отримати різницю в 25-28 дБ, а на 16-ому поверсі 8-го корпусу – навіть менше. Різницю в 30 дБ отримано під час вимірювання в окремих точках на відстані близько 2 км від передавачів. Всього у січні 2013 р. відбувалося вимірювання сигналів стандартів DVB-T та DVB-T2 на восьми частотах. На частотах 514 МГц та 554 МГц не на всіх схилах спектра спостерігається різниця в 30 дБ.

За результатами експериментальних досліджень в умовах мегаполісу (м. Київ) очевидно, що достовірну оцінку ЗШСЧ радіовипромінювань засобів цифрових радіотехнологій можна отримати в процесі вимірювання в межах прямої видимості від передавальної антени до точки приймання на близьких відстанях. Даним умовам відповідає використання мобільних станцій радіомоніторингу.

Потрібно зазначити, що спектр OFDM і COFDM сигналів, які використовуються в радіотехнологіях IEEE 802.11a,g,n, IEEE 802.16a,d,e, DVB-T та DVB-T2 [45-53] має круті схили. Також подібний за формою спектр мають сигнали за стандартами cdma2000 1×EV-DO (TIA-856 Revision 0,A,B,C) [54]. Як буде показано нижче, енергія сигналу, в основному, зосереджена в його центральній частині під лінією, яка близька до опорного рівня. Тому границі ЗШСЧ за $\beta/2$ - методом будуть відповідати рівням спектра значно більшим за - 30 дБ. Нормативні документи не мають даних про ЗШСЧ вказаних та більшості

інших сучасних радіотехнологій. За умови обґрунтування рівня X дБ, відповідного ЗШСЧ, з'являється можливість спрощення процедури визначення ЗШСЧ під час радіомоніторингу.

За першим варіантом ЗШСЧ вимірюється за методом X дБ на рівні, який відповідає ширині частотної смуги за методом відношення потужностей. За другим варіантом в залежності від умов вимірювання обирається рівень X дБ, який вище рівня шумів на ≥ 5 дБ, визначається ширина смуги частот радіовипромінювання на обраному рівні. Далі за аналітичною залежністю розраховується значення ЗШСЧ. Суттєвою перевагою даних підходів є скасування обмеження на різницю в 30 дБ, що дозволяє проводити радіоконтроль на значно більших відстанях, в умовах дії завад та більшого рівня шуму. Відпадає потреба обов'язкового використання мобільних станцій радіомоніторингу.

Серед радіотехнологій, які впроваджуються або вже впроваджені в Україні, за значимістю та кількістю засобів, що підлягають радіоконтролю, на наш погляд, на перше місце слід поставити цифрове телебачення стандарту DVB-T2.

Завданням дослідження є створення методики вимірювання займаної ширини смуги частот радіовипромінювання цифрового телебачення, яка б дозволяла б проводити радіоконтроль в умовах рівня шумів до - 15 дБ від опорного рівня, та надання рекомендацій щодо практичного використання результатів в УДЦР.

До основних завдань дисертаційної роботи належать наступні.

1. Розробка математичної моделі цифрового телебачення стандарту DVB-T2, що дозволяє: визначати спектр радіовипромінювання з урахуванням різних параметрів модуляції, кодування, числа несучих та умов поширення радіохвиль; ЗШСЧ за обома методами.

2. Проведення вимірювання спектрів радіовипромінювання цифрового телебачення в умовах м. Києва в точках, що характеризуються перевищенням опорного рівня спектра над рівнем шумів не менше 30 дБ.

3. Обробка результатів експериментальних досліджень з метою досягнення завдання дослідження. Надання рекомендацій щодо внесення змін до чинної методики вимірювання ЗШСЧ радіовипромінювання в частині цифрового телебачення та доопрацювання програмного забезпечення станцій радіомоніторингу.

1.7. Висновки

За результатами проведених у першому розділі роботи досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Аналіз нормативних та науково-технічних джерел свідчить про те, що в Україні створена і успішно функціонує потужна і розгалужена система радіомоніторингу, основним завданням якої є забезпечення ефективного використання радіочастотного ресурсу.

2. Існує протиріччя між необхідністю забезпечити різницю між опорним рівнем спектра та рівнем шумів не менше 30 дБ під час вимірювання займаної ширини смуги частот радіовипромінювання цифрового телебачення та результатами вимірювань в умовах великого мегаполісу, яким є м. Київ. Це призводить до пошуку місць радіоконтролю в межах 2 км від передавачів та використання мобільних станцій радіомоніторингу. Натомість існують передумови для спрощення процедури радіоконтролю якщо користуватися методом $X \text{ дБ}$ і проводити вимірювання на рівнях вище -15 дБ , що відповідає умовам контролю в багатьох місцях на відстанях значно більших за 2 км .

3. Потрібно провести дослідження щодо правомірності використання підходів до розв'язку завдання дослідження: математичного моделювання функціонування засобів цифрового телебачення із визначенням спектра сигналу на вході радіоприймального пристрою та проведенням вимірювання спектрів радіовипромінювання за електромагнітним полем з подальшою обробкою результатів вимірювання.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ СТАНДАРТУ DVB-T2 ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1. Мережа цифрового телебачення країни

Міжнародні та національні нормативні документи [17, 21-24, 56-58] не містять даних про рівень X дБ, на якому потрібно вимірювати займану ширину смуги частот радіовипромінювання за сучасними цифровими радіотехнологіями (стандарти IEEE 802.11a(b,n), IEEE 802.15, IEEE 802.16, CDMA 2000 1xEV-DO, GSM, DVD-T, DVB-T2, T-DAB).

Кожна з названих радіотехнологій потребує визначення рівня X дБ. Проте дана проблема має розв'язуватися поступово. В першому розділі роботи з огляду на актуальність мережі цифрового телебачення для радіоконтролю саме вона обрана для дослідження. 8 грудня 2011 р. Національна рада з питань телебачення і радіомовлення дала компанії «Зеонбуд» ліцензію на побудову мережі цифрового телебачення, що включає чотири мультиплекси. 16 березня 2012 р. компанії також надано право обирати радіотехнологію. Компанія «Зеонбуд» обрала міжнародний стандарт цифрового телебачення DVB-T2.

Мережа включає чотири мультиплекси (514 МГц, 554 МГц, 698 МГц та 538 МГц). На кожному з перших трьох мультиплексів випромінюються сигнали 8 програм із загальноукраїнським покриттям. Половина з 8 програм останнього п'ятого мультиплексу є регіональними та місцевими. На рис. 2.1 представлена схема національного центру телевізійного мовлення, що складається з комутаційного вузла, центру формування мультиплексів та передавального комплексу. На відміну від Києва у регіональні центри національні канали передаються через супутникові канали, а місцеві програми - за допомогою радіорелейних ліній та оптоволоконних ліній зв'язку, рис. 2.2. Представлена на рис. 2.1, рис. 2.2 мережа не є одночастотною.

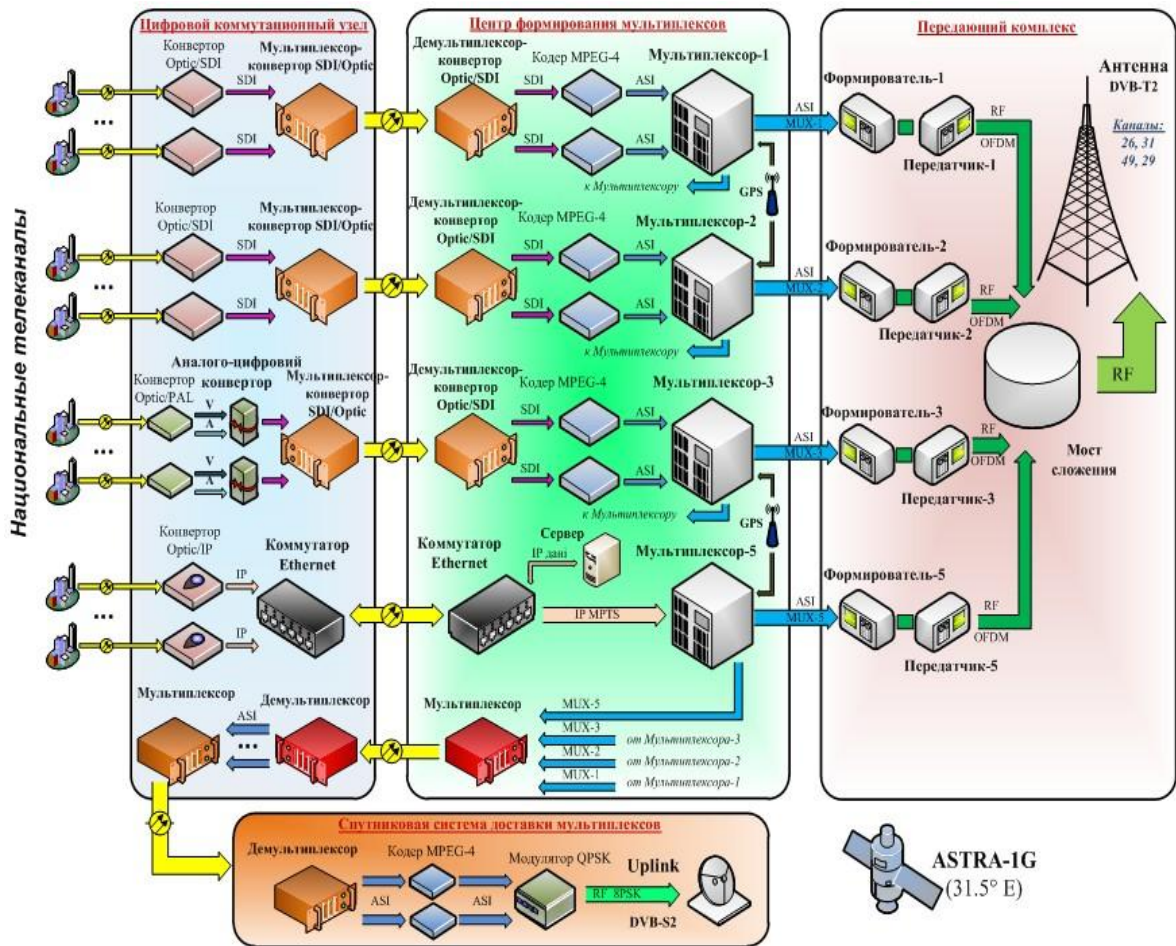


Рис. 2.1. Функціональна схема національного центру телевізійного мовлення.

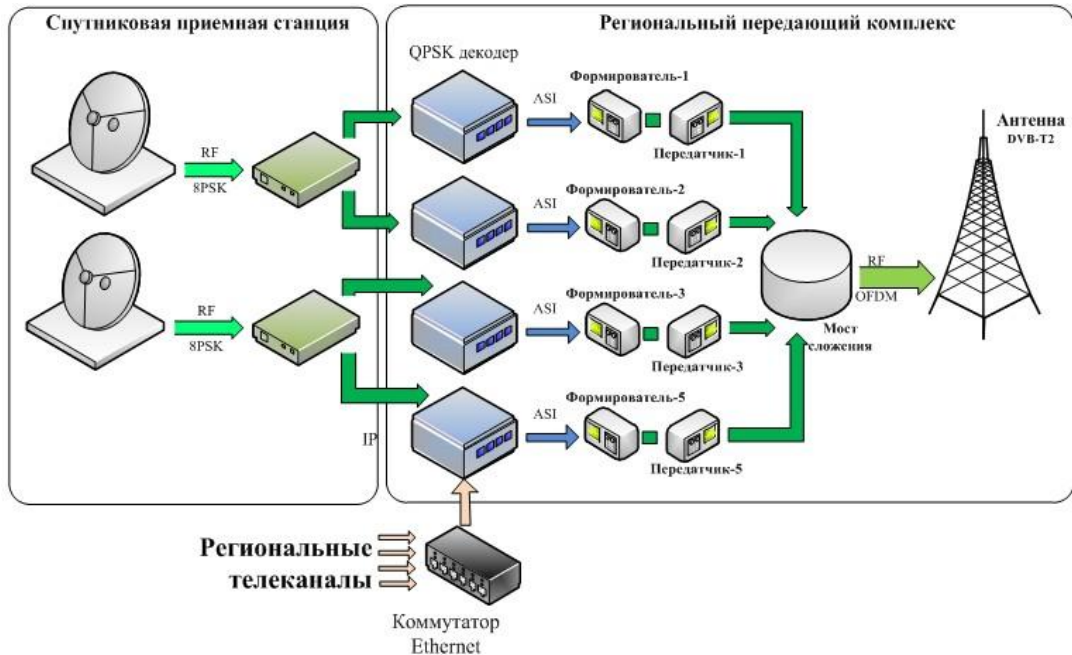


Рис. 2.2. Функціональна схема регіонального центру телевізійного мовлення.

Використовуються передавачі потужністю від 50 Вт до 2 кВт. Більшість передавачів має потужність 500 Вт і 1 кВт. Передавачі малої потужності використовуються переважно в місцях, в яких не забезпечується покриття мовленням від потужного передавача. Схема місцевого центру аналогічна схемі на рис. 2.2.

За планом «Женева-2006» Україна повинна припинити аналогове телевізійне мовлення до середини літа 2015 р. Покриття території цифровим телебаченням забезпечує 32 програмами 95% від загальної кількості населення України (рис. 2.3) [59]. Передавачі розміщені в 166 населених пунктах. Середній радіус зони дії знаходиться в діапазоні від 20 км до 110 км. Крім того тимчасово продовжується мовлення в стандарті DVD-T на частотах 634 МГц, 650 МГц, 714 МГц, 818 МГц.



Рис. 2.3. Карта покриття ефірним цифровим мовленням стандарту DVB-T2

Відповідно до частотних присвоєнь від телевізійного мовлення повністю звільнюється третій діапазон 170 МГц – 230 МГц, зменшується щільність присвоєнь у четвертому та п'ятому діапазонах 470 МГц – 862 МГц.

УДЦР потрібно забезпечити контроль параметрів радіовипромінювання в усіх 166 містах. На жаль у відкритих джерелах не наводиться інформація про загальну кількість передавачів мережі. За першим наближенням можна прийняти, що в середньому в зоні дії потужного радіопередавача функціонує ще один меншої потужності. Тоді для всієї мережі під час радіомоніторингу на чотирьох частотах потрібно провести вимірювання параметрів $2 \times 4 \times 166 = 1328$ випромінювань.

Очевидно, що серед цифрових радіотехнологій зменшення трудомісткості радіоконтролю в першу чергу потребує цифрове телебачення. З інших радіотехнологій з огляду на масовість застосування і площу покриття треба відзначити мобільний зв'язок стандартів CDMA 2000 1x та GSM.

2.2. Формування інформативних сигналів за стандартом DVB-T2

Стандарт DVB-T2 [61-63] у порівнянні зі стандартом DVB-T забезпечує приблизно на 50% більшу швидкість передачі та кращу захищеність від багатопроменевих завад. Канал фізичного рівня підрозділяється на логічні об'єкти, які позначаються аббревіатурою PLP. Через один PLP передається один логічний потік. Існує можливість передачі одного PLP або одночасно – декількох PLP. У одному радіочастотному каналі різні PLP можуть мати відмінні характеристики каналного кодування та модуляції.

Структурна схема системи за стандартом DVB-T2 (рис. 2.4) включає п'ять підсистем [3]. У підсистемі SS1 з вхідного сигналу формується транспортний потік MPEG-2 або транспортний потік загального призначення GTS, в якому використовується змінна довжина пакета. Крім транспортного можуть передаватися будь-які інші цифрові потоки. Дані, що передаються, пакетуються у ВВ-кадри (Baseband frame) в режимі «А» з одним PLP, або в режимі «В» з декількома каналами PLP. Заголовок ВВ-кадру містить інформацію про його зміст.

Підсистема SS2 під назвою BICM (Bit Interleaved Coding and Modulation) виконує операції каналного перемежовування бітів, кодування та модуляції.

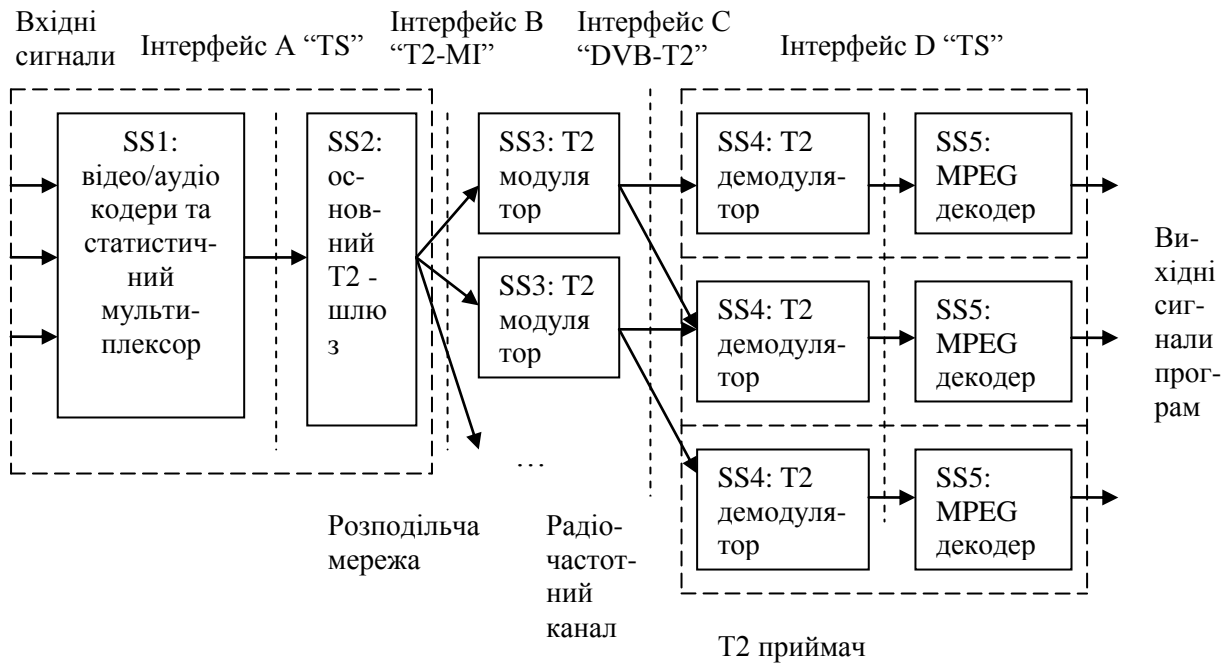


Рис. 2.4. Структурна схема системи за стандартом DVB-T2 у випадку вхідного транспортного потоку

Пряма корекція помилок за допомогою завадозахищеного коду з низькою щільністю перевірок на парність LDPC (внутрішнє кодування) забезпечує збільшення відношення сигнал/шум на 3 дБ у порівнянні зі згортковим кодуванням на основі кода Ріда-Соломона за рівних умов. Далі реалізується зовнішнє кодування за кодом BCH (Bose-Chaudhuri-Nocquenghem multiple error correction binary block code) і отримується FEC-кадр, потім послідовно виконується перемешування бітів, демультимплексування бітів у чарунки відповідно до обраного модуляційного сузір'я, розподілення чарунок у модуляційні символи за кодом Грея, обертання сигнального сузір'я із попередньою циклічною затримкою квадратурної складової кожного модуляційного символу, перемешування чарунок, часове перемешування. Тобто перемешування відбувається не тільки в межах одного модуляційного символу, а і в межах одного суперкадра, який включає T2-кадри з даними та FEF-кадри (future extension frames - для майбутнього розширення функціональних можливостей всієї системи), які включаються пізніше. Послідовність передачі інформації всередині суперкадра порушується з причини часового перемешування. На виході підсистеми формується T2-MI

потік, що характеризує транспортний рівень та включає дані, час передачі T2-кадрів. T2-MI потік підводиться до одного або більше модуляторів.

У підсистемі SS3 відбувається формування масивів чарунок кожного PLP і пілотних сигналів L1, що відповідають COFDM символам, проводиться частотне перемежування, призначення якого полягає у відображенні чарунок даних одного COFDM символу відповідним несучим символом. Функцією модуля генерування є використання вмісту чарунок як коефіцієнтів у частотній області для зворотнього швидкого перетворення Фур'є, розміщення пілотних частот з метою підвищення захищеності від завад у каналі поширення, зменшення відношення пікової потужності до середньої потужності, встановлення захисного інтервалу від впливу багатопроменевості, встановлення P1-символу, основним призначенням якого є виявлення T2-сигналу, цифро-аналогове перетворення.

Підсистема SS4 призначена для приймання радіочастотного сигналу від одного або декількох передавачів телевізійної мережі і виділення, у випадку приймача загального користування, транспортного потоку одного PLP. Підсистема SS5 приймає транспортний потік і перетворює його на вхідний відео або аудіо сигнал системи.

2.3. Математичне моделювання спектра випромінювання за стандартом DVB-T2 біля приймальної антени

Навіть поверхневе знайомство з системою цифрового телебачення за стандартом DVB-T2 свідчить про її складність. Розробка моделюючих комп'ютерних програм проводилася на високому науково-технічному рівні з метою опрацювання як окремих блоків, так і всієї системи в цілому. Спочатку роботи проводилися іспанськими фірмами SIDSA та AICIA. Потім до них у рамках проекту B21C [64, 65] долучилися інші учасники, в тому числі BBC, Pace, Panasonic, Sony. Всього 36 організацій з країн ЄС. У рамках DVB консорціуму була створена загальна моделююча платформа (Common

Simulation Platform – CSP). На рис. 2.5 представлені блоки фізичного рівня, які використовувалися під час моделювання.

Блок ВІСМ включає LDPC кодувач, мережувач бітів, пристрій управління пам'яттю для формування комплексного сузір'я. Мережувач чарунок переставляє сформовані модуляційні символи у кожному FEC-кадру, а мережувач у часі – тільки через ціле число FEC-кадрів. В останніх блоках відбувається вставка пілотних сигналів, трансформація сигналу в часову площину та вставка захисного інтервалу.

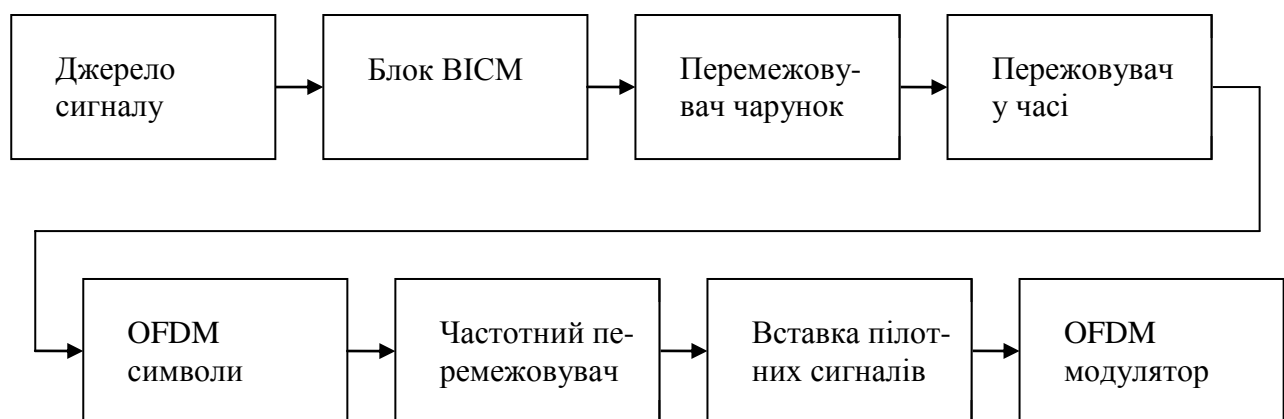


Рис.2.5. Блок-схема математичної моделі фізичного рівня формування сигналів випромінювання за стандартом DVB-T2.

CSP відповідає стандарту ETSI EN 302 755 [63] та зареєстрована у мережі SourceForge.net, що дозволяє її вільне використання. Платформа у середовищі MATLAB включає математичні моделі передавача, радіоканалу, приймача та їх складових, засоби для встановлення користувачем окремих складових частин моделі у обрану конфігурацію для моделювання, засоби для визначення залежних параметрів всієї телевізійної системи, внутрішнього або зовнішнього кодування. Для одного PLP вхідні та вихідні дані представляються вектором чи матрицею, а у випадку паралельних ланцюгів сигналів для декількох PLP формуються додаткові вихідні матриці, що включають додаткову службову інформацію. Математичні моделі CSP мають інтерфейсну функцію, яка визначає конфігурацію моделі за обраними параметрами системи DVB-T2. Формування сигналів у передавальній частині CSP проводиться у межах одного

T2 кадру, блоки платформи не пам'ятають інші T2 кадри. Структурна схема платформи CSP представлена на рис. 2.6.

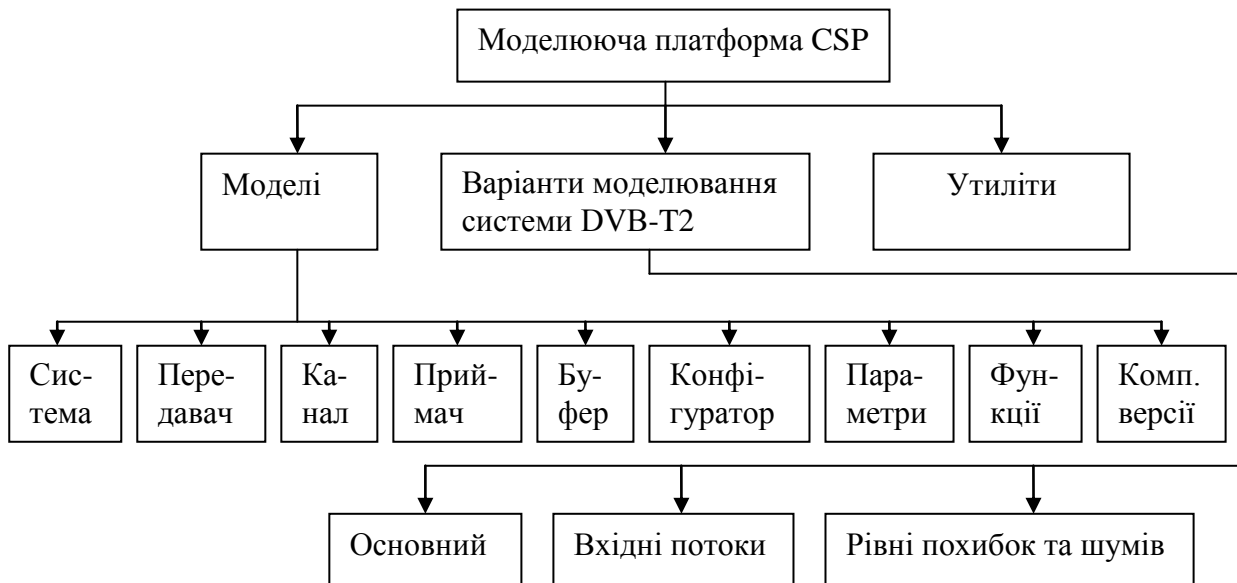


Рис. 2.6. Структурна схема моделюючої платформи CSP.

Схема включає три каталоги верхнього рівня. У каталозі «Моделі» розміщена вся низка програм від входу до виходу системи. Це: модуль «Система», який ініціалізує модулі «Передавач», «Канал» та «Приймач»; модуль «Буфер» передає собою буфер приймача; модуль «Конфігуратор» містить функції для установки складу ланцюга блоків системи, в тому числі основні незалежні параметри режиму DVB-T2; модуль «Параметри» включає функції для визначення залежних параметрів за стандартом DVB-T2, наприклад, розмір ШПФ, кількість активних несучих і т.п.; у модулі «Функції» зосереджені підпрограми загального користування різними модулями; модуль «Компільовані версії» включає компільовані файли функцій, що використовують тех функцію MATLAB.

За допомогою каталогу «Варіанти моделювання системи DVB-T2» можна обирати один із 8 варіантів моделювання для різних застосувань системи. Наприклад, визначення графіків залежності BER від відношення c/w для певних

параметрів системи та умов поширення радіохвиль, моделювання із генерацією точок контролю, тощо.

Каталог «Утиліти» містить оригінали файлів, що розроблені різними організаціями і використовуються в платформі CSP.

Для розв'язку завдання дослідження потрібно застосувати математичні моделі передавача та каналу поширення радіохвиль платформи CSP, а також доповнити їх модулями визначення спектра та ЗШСЧ випромінювання.

Платформа CSP містить математичні моделі трьох каналів поширення: з адитивним білим шумом (AWGN), рівень якого задається відношенням c/w ; райсівського каналу; релеєвського каналу. Моделі каналів обрані у відповідності до офіційного посібника з впровадження системи DVB-T2 [61].

Модель райсівського каналу, яка характеризує фіксоване приймання антеною на даху будинку, включає 21 промінь. Вихідний сигнал визначається за формулою:

$$y(t) = \frac{\rho_0 x(t) + \sum_{i=1}^n \rho_i e^{-j\theta_i} x(t - \tau_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^n \rho_i^2}},$$

де $x(t)$ - вхідний сигнал; ρ_0 і ρ_i - відповідно загасання прямого та i -го променів (табл. 2.1); $n=20$; θ_i і τ_i - відповідно зсув за фазою та часова затримка i -го променя відповідно прямого променя (табл. 2.1).

Модель релеєвського каналу характеризується відсутністю прямого променя та відображає в тому числі умови мобільного приймання в межах чи поза межами будівлі. Модель не враховує ефект Доплера і визначається виразом:

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i e^{-j\theta_i} x(t - \tau_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^n \rho_i^2}},$$

де ρ_i, θ_i і τ_i - наведені в табл. 2.1.

Також платформа включає модель поширення телевізійних сигналів у релеевських каналах з меншими та більшими відстанями за даними [66], табл. 2.2.

Таблиця 2.1

Параметри райсівського та релеевського (без прямого променя) каналів

Номер променя	Амплітуда променя	Затримка, мкс	Фаза, рад.
1	0.057662	1.003019	4.855121
2	0.176809	5.422091	3.419109
3	0.407163	0.518650	5.864470
4	0.303585	2.751772	2.215894
5	0.258782	0.602895	3.758058
6	0.061831	1.016585	5.430202
7	0.150340	0.143556	3.952093
8	0.051534	0.153832	1.093586
9	0.185074	3.324866	5.775198
10	0.400967	1.935570	0.154459
11	0.295723	0.429948	5.928383
12	0.350825	3.228872	3.053023
13	0.262909	0.848831	0.628578
14	0.225894	0.073883	2.128544
15	0.170996	0.203952	1.099463
16	0.149723	0.194207	3.462951
17	0.240140	0.924450	3.664773
18	0.116587	1.381320	2.833799
19	0.221155	0.640512	3.334290
20	0.259730	1.368671	0.393889

Таблиця 2.2

Параметри релеевських каналів

Номер променя	Канал з меншими затримками		Канал з більшими затримками	
	Послаблення, дБ	Затримка, мкс	Послаблення, дБ	Затримка, мкс
1	2.8	0	0	0
2	0	0.05	9	5
3	3.8	0.4	22	14
4	0.1	1.45	25	35
5	2.6	2.3	27	54
6	1.3	2.8	28	75

Оскільки платформа CSP працює у середовищі MATLAB [67-69] логічно застосувати даний продукт для визначення спектра сигналу. У випадку різних типів сигналів, що характерно для радіомоніторингу, спектральна щільність потужності (СЩП) за вибіркою у часовій площині знаходиться за допомогою непараметричних методів. В MATLAB є реалізація таких непараметричних методів як періодограма та метод Уелча.

За N відліками однієї реалізації випадкового сигналу періодограма визначається за формулою [68]:

$$\hat{W}(\omega) = \frac{1}{f_s} \frac{\left| \sum_{k=0}^{N-1} x(k)g(k)e^{j\omega kT} \right|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |g(k)|^2},$$

де $\hat{W}(\omega)$ - оцінка СЩП; $x(k)$ - k -ий відлік часової реалізації сигналу; f_s, T - відповідно частота та період дискретизації; $g(k)$ - віконна вагова функція, яка застосовується для усереднення результатів.

У періодограми спостерігається флуктуація оцінки із зростанням числа відліків, що практично означає розширення лінії графіку спектра і невизначеність результатів за числом відліків більше 1000.

Метод Уелча розроблено на основі метода Бартлетта, за яким вибірка відліків сигналу поділяється на множини, що не перекриваються. Для кожної множини відліків обчислюється періодограма з усередненням. За методом Уелча перетин множин є непустою множиною, тобто кількість множин зростає. Далі обчислюються періодограми для кожної множини, які усереднюються по всьому ансамблю множин.

Використовуючи моделюючу платформу CSP в частині передавача з параметрами: шириною частотної смуги $BW=8$ МГц; частотою $f=729.833$ МГц; 64-QAM; кодовою швидкістю $5/6$ та обраним каналом зв'язку, знаходимо спектр сигналу на вході приймача за методом Уелча. На рис. 2.7 представлено спектр телевізійного сигналу на виході каналу з адитивним білим шумом з відношенням $c/u=20$ дБ. Під час моделювання у інших каналах також

використовується 20 дБ перевищення сигналу над шумом, яке є типовим на для багатьох районів м. Києва. На рис. 2.8 – рис. 2.9 представлено спектри сигналу відповідно в райсівському та релеєвському каналах за даними табл. 2.1. Спектри сигналів у релеєвських каналах за даними табл. 2 представлені на рис. 2.10.

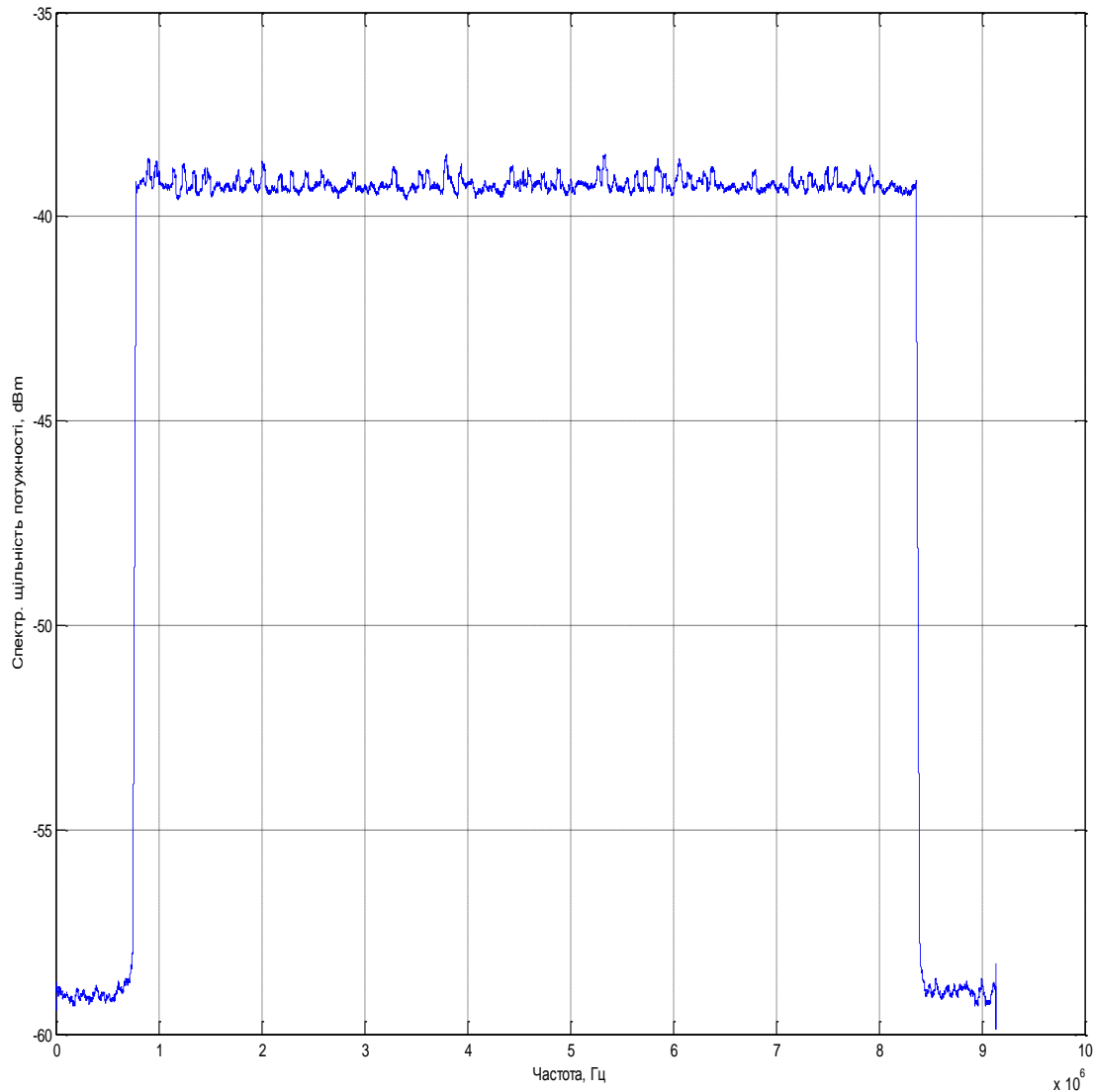


Рис. 2.7. Спектр сигналу в AWGN каналі.

В AWGN каналі форма спектра практично не залежить від відношення c/w . Для райсівського та релеєвського каналів дана залежність більша, але, в основному форма спектра залежить від амплітуди і фази багатошляхових променів.

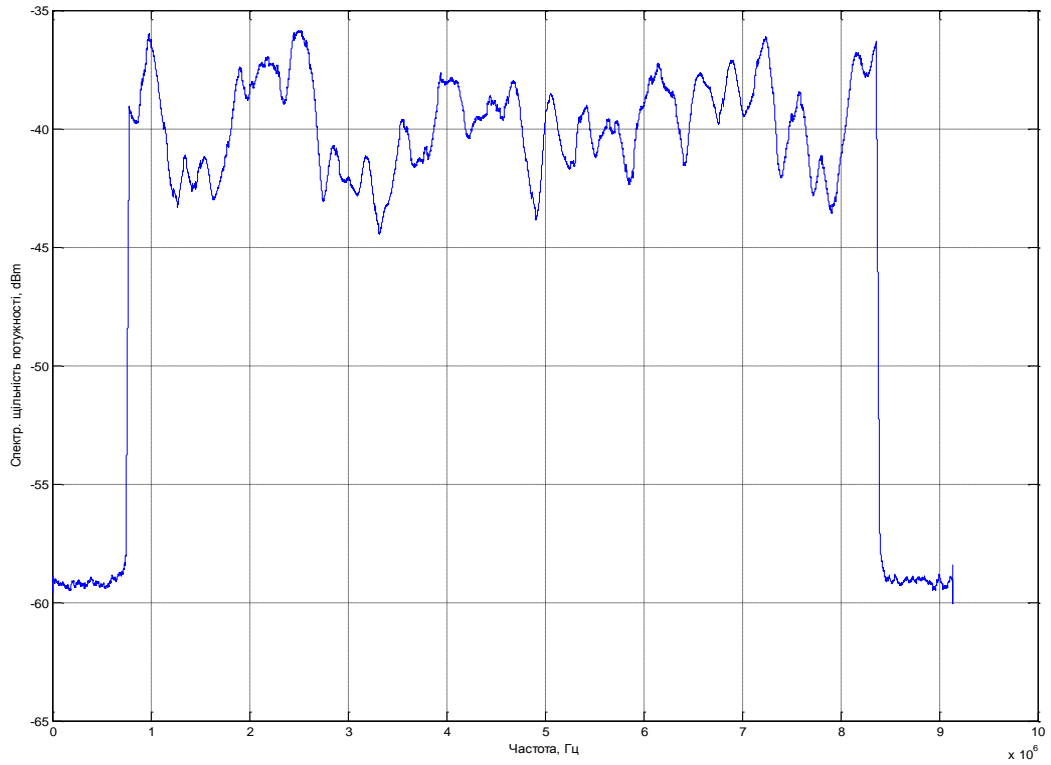


Рис. 2.8. Спектр сигналу в райсівському каналі за даними табл. 2.1.

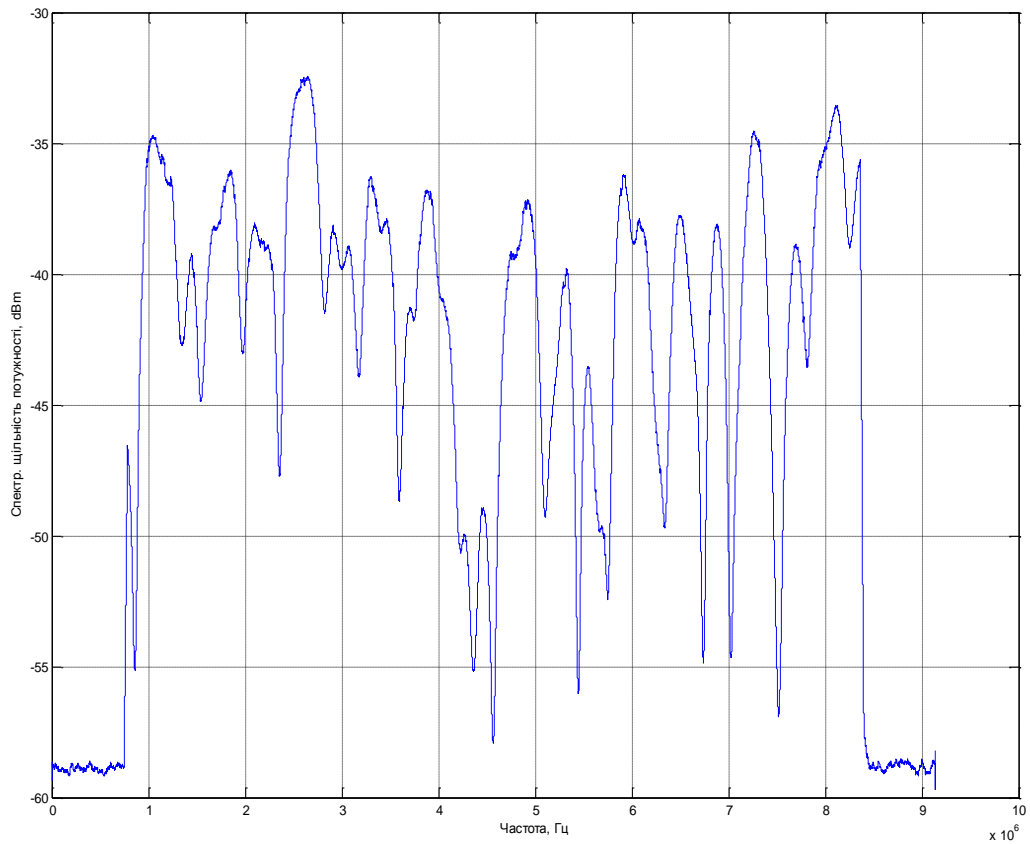


Рис. 2.9. Спектр сигналу в релеєвському каналі за даними табл. 2.1.

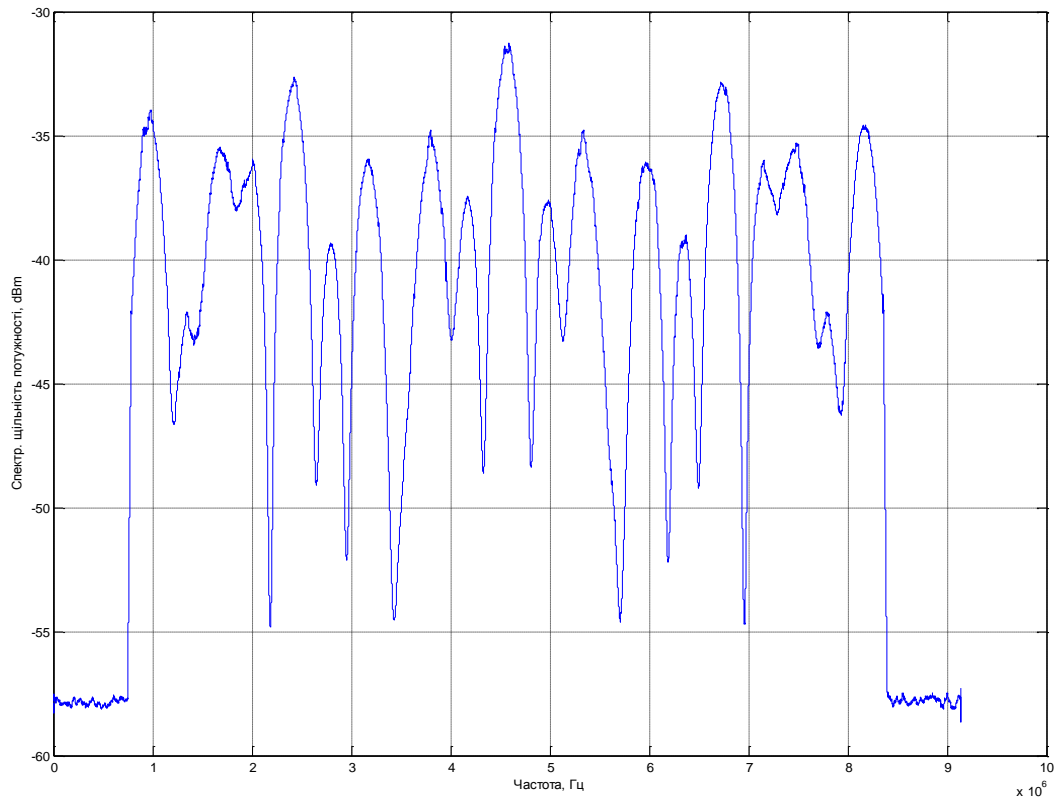


Рис. 2.10. Спектри сигналів у релеєвських каналах з меншими затримками (табл. 2.2).

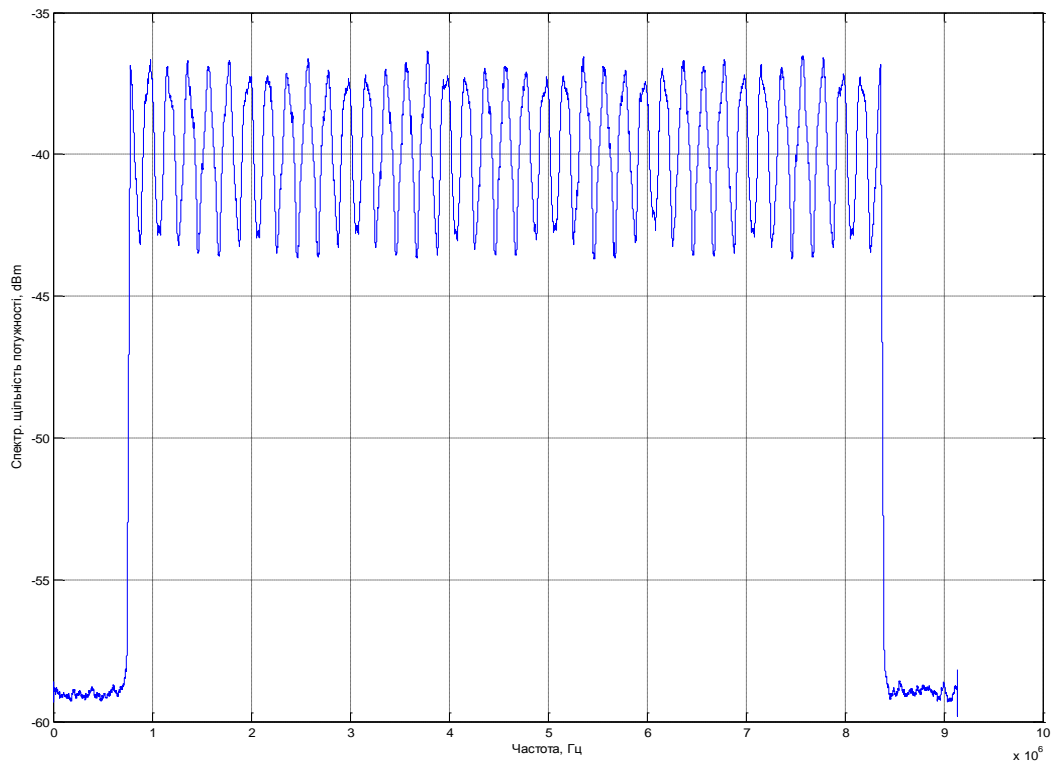


Рис. 2.11. Спектри сигналів у релеєвських каналах з більшими затримками (табл. 2.2).

Оцінка результатів математичного моделювання [70, 71, 90] проводиться на основі порівняння зі спектрами за нормативними даними та результатами вимірювань спектрів фахівцями УДЦР в січні 2013 р. Для цього було доопрацьовано програмне забезпечення обробки результатів вимірювань, а саме: дані надаються не тільки у вигляді графіка, але і таблиці відліків частота-СЩП.

На рис. 2.12 представлено нормативні спектри [61, 63] за стандартом DVB-T2, які за характеристикою [61] є ідеалізованими оскільки не враховують вплив нелінійних ефектів у підсилювачах потужності передавачів, фільтрацію у передавальному тракті, спектральні маски, що застосовуються, та частотний діапазон.

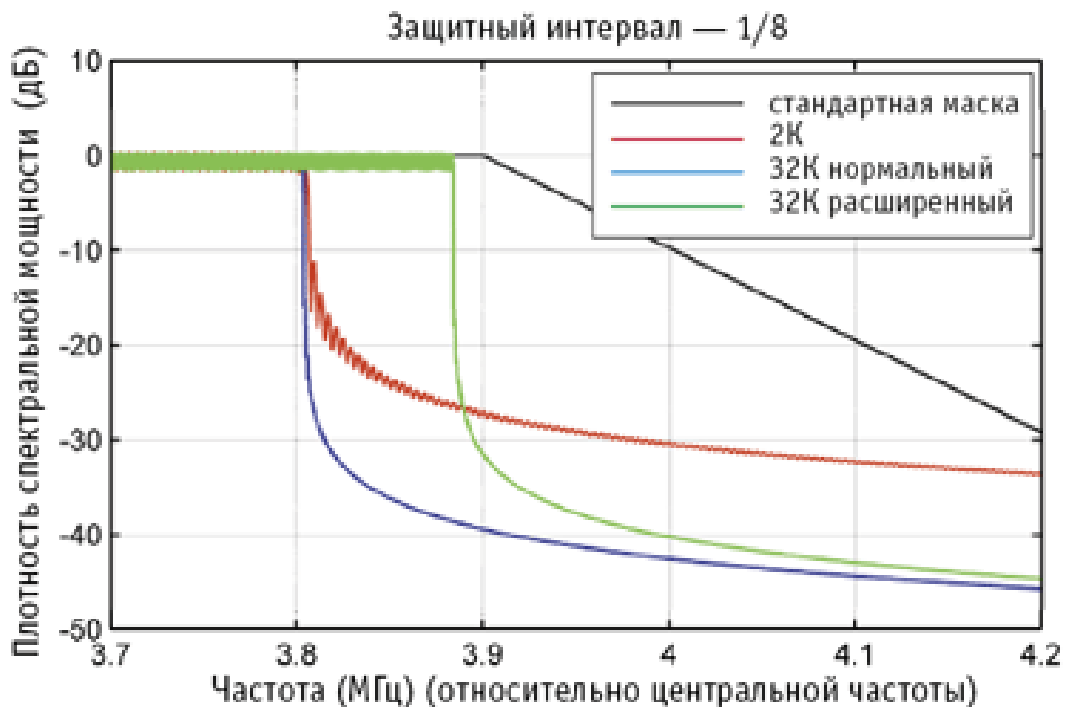


Рис. 2.12. Нормативні спектри випромінювання за стандартом DVB-T2.

Аналіз графіків на рис. 2.07 – рис. 2.11 свідчить про якісне співпадання результатів математичного моделювання з Рекомендацією MCE-R SM.1875 [72] в частині впливу каналів поширення радіохвиль на форму спектра. Проте аналіз науково-технічних джерел та результатів вимірювань [73-75] не дає прикладів такого значного спотворення форми спектра. За наближеної до ідеальної форми

центральної частини спектра, рівень, що відповідає ЗШЧС визначається схилами спектра.

В табл. 2.3 включені значення ширини схилів нормативного спектра (рис. 2.12) на рівнях -20 дБ та -30 дБ від опорного рівня.

Таблиця 2.3

Ширина схилів нормативного спектра

Рівень від опорного, дБ	Ширина схилів спектра, кГц		
	Режим 2 к	Режим 32 к	Режим 32 к розширений
-20	20,7	2	2
-30	185	10,5	10,5

Ширину схилів спектрів за даними моделювання можна знайти в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Ширина схилів спектрів за даними моделювання на рівні -20 дБ від опорного

AWGN канал		Райсівський канал (табл. 2.1), кГц		Релеєвський канал (табл. 2.1), кГц		Релеєвський канал з меншими затримками, кГц		Релеєвський канал з більшими затримками, кГц	
Лівий схил	Правий схил	Лівий схил	Правий схил	Лівий схил	Правий схил	Лівий схил	Правий схил	Лівий схил	Правий схил
2,6	8	8,3	8,3	28,2	8,5	14,3	17,8	7,6	8,3

В табл. 2.4 форма спектра, яка наближена до отриманої експериментально, спостерігається на виході AWGN каналу, райсівського каналу та релеєвського каналу з більшими затримками. Ширина схилів спектра для режиму 8 к на рівні -20 дБ наближено дорівнює 8 кГц, що відповідає ширині схилів нормативного спектра з табл. 2.3.

Відповідь про придатність результатів математичного моделювання для розв'язку завдання дослідження може дати аналіз спектрів випромінювання, отриманих експериментально. На рис. 2.13 – рис. 2.20 представлені спектри,

виміряні аналізатором спектра Rohde&Schwarz U3772 Advantest на відстанях не більше 2 км від телевізійної башти на вул. Мельникова в Києві.

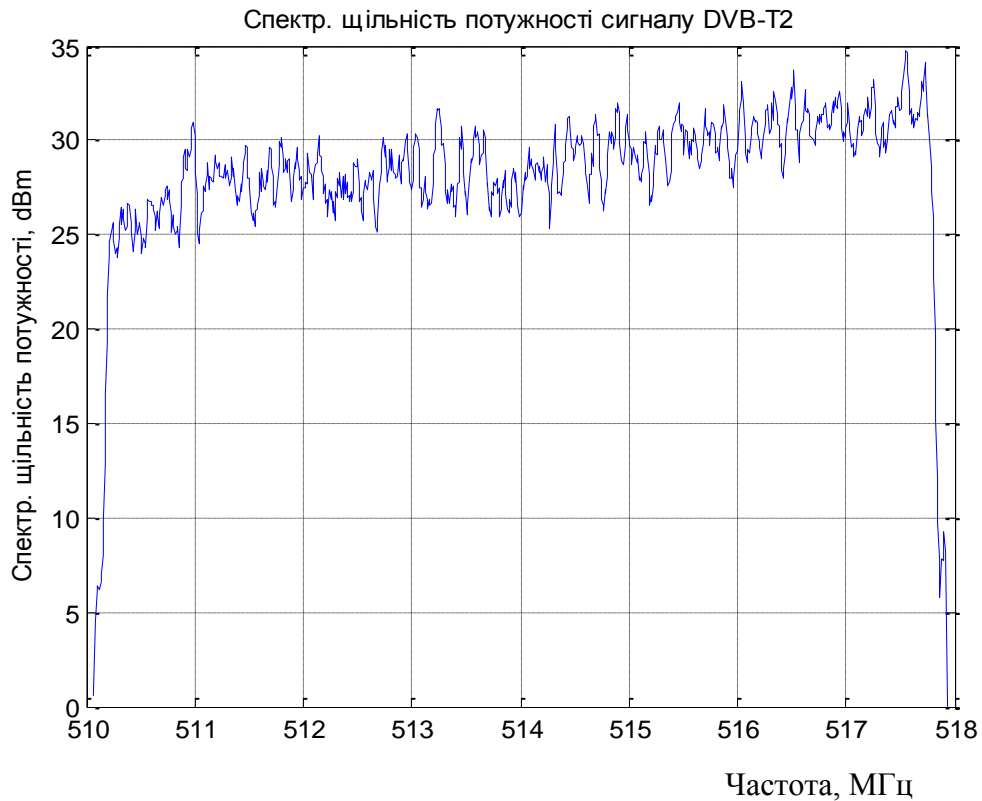


Рис. 2.13. Спектр радіовипромінювання на середній частоті 514 МГц.

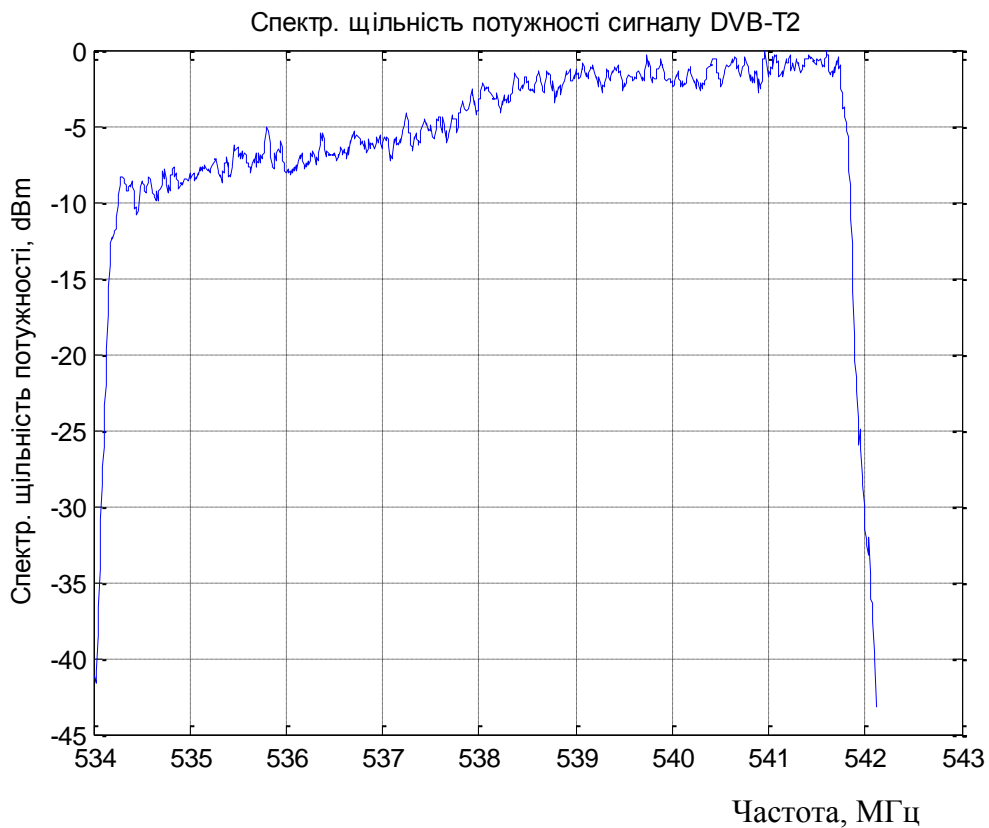


Рис. 2.14. Спектр радіовипромінювання на середній частоті 538 МГц.

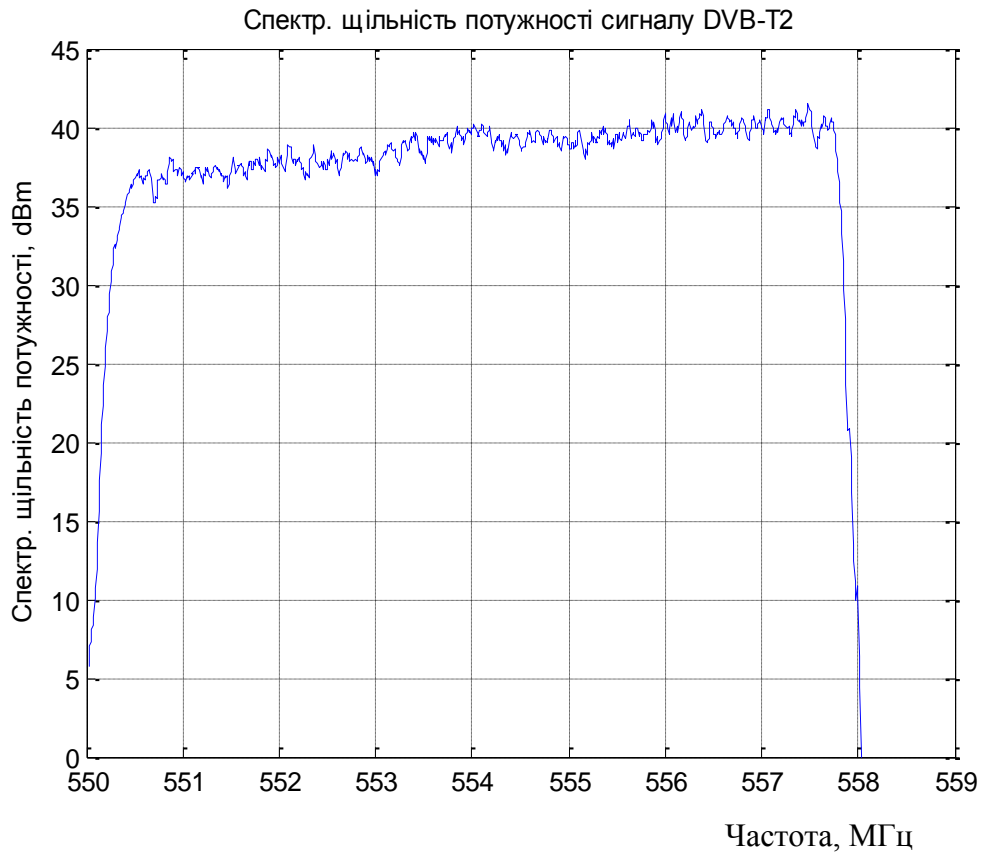


Рис. 2.15. Спектр радіовипромінювання на середній частоті 554 МГц.

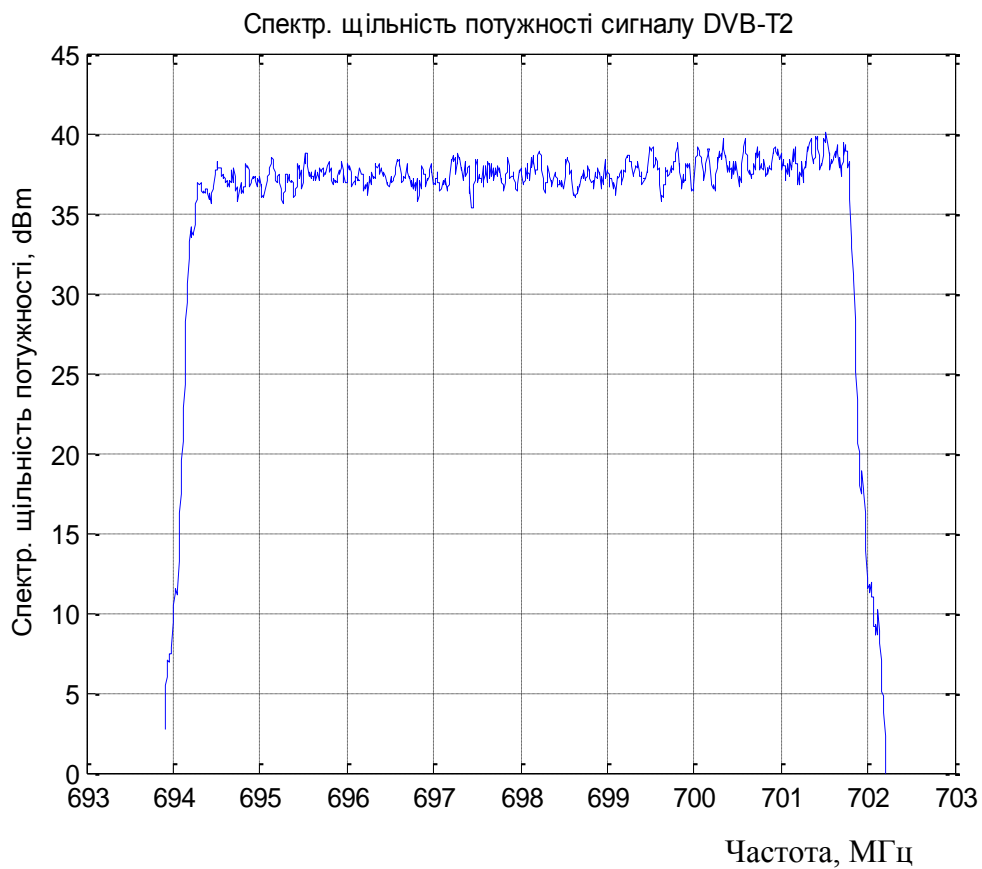


Рис. 2.16. Спектр радіовипромінювання на середній частоті 698 МГц.

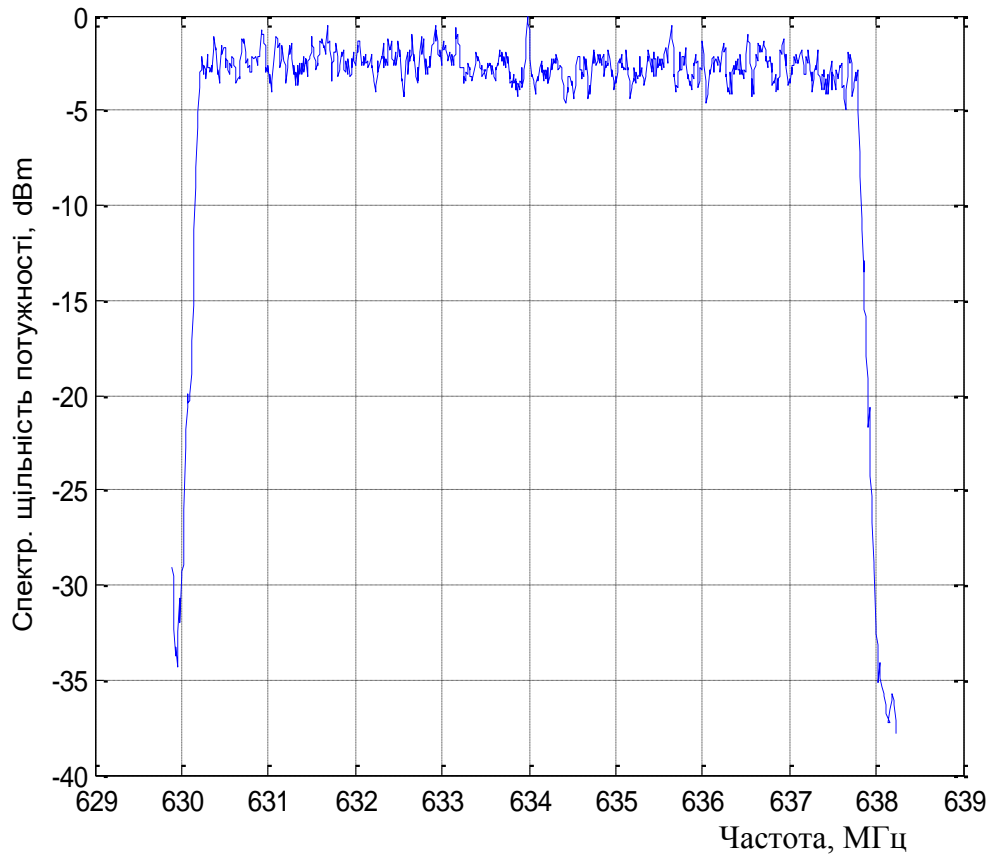


Рис. 2.16. Спектр радіовипромінювання DVB-T на середній частоті 634 МГц.

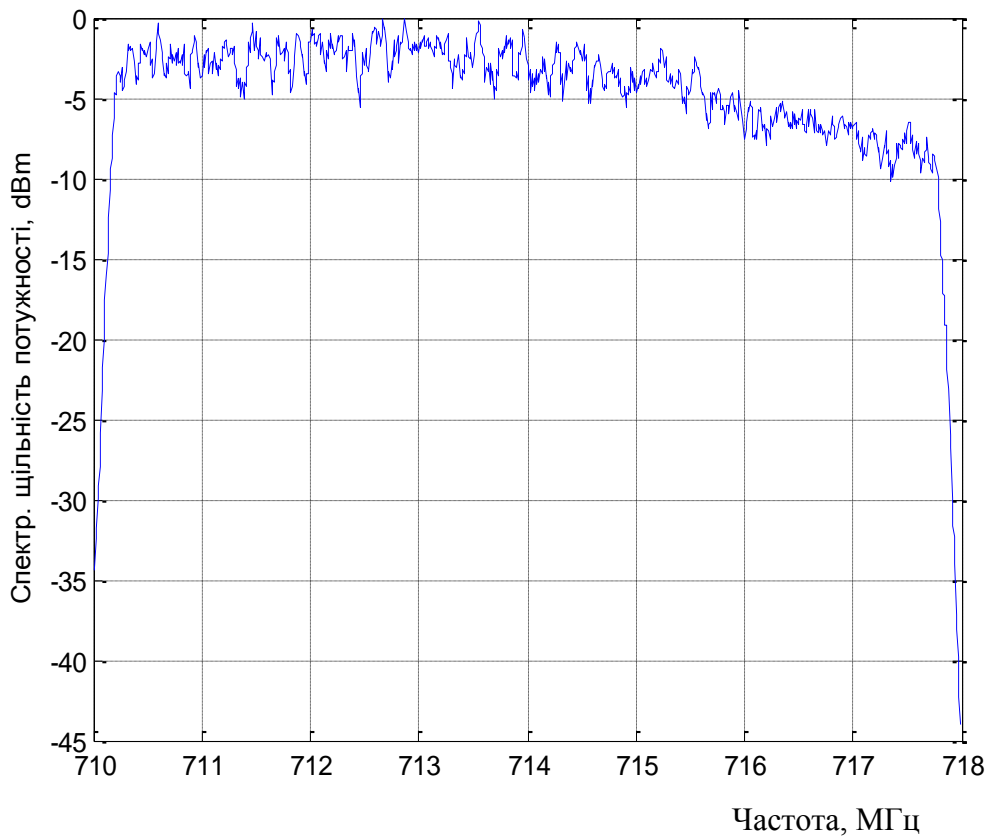


Рис. 2.16. Спектр радіовипромінювання DVB-T на середній частоті 714 МГц.

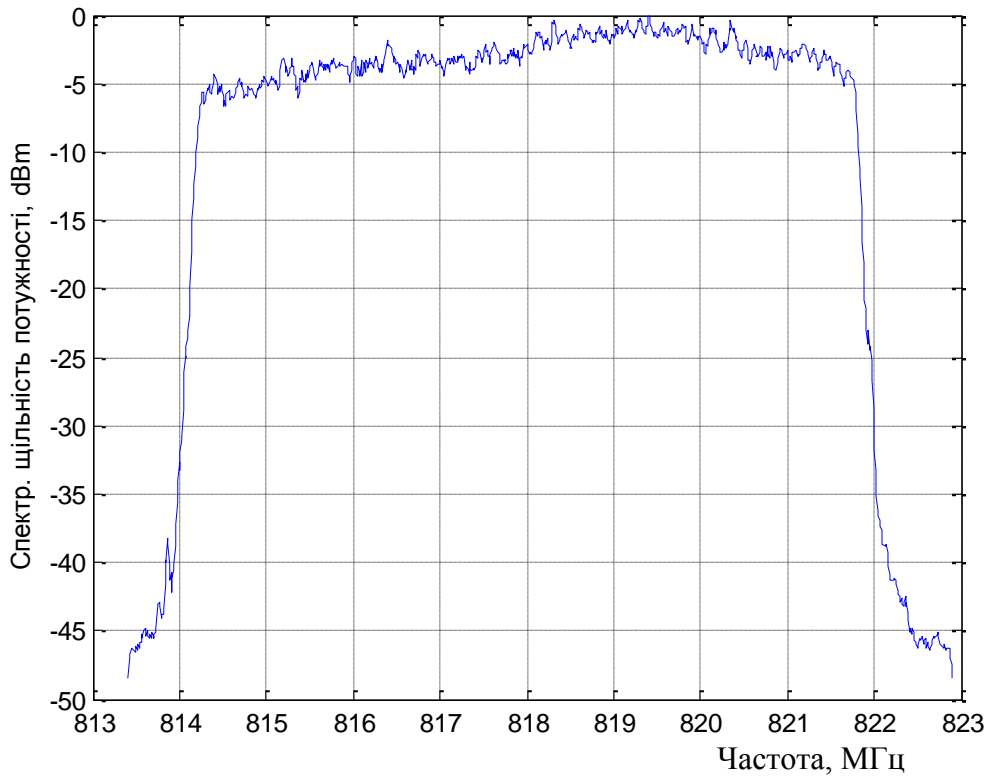


Рис. 2.16. Спектр радіовипромінювання DVB-T на середній частоті 818 МГц.

В табл. 2.5 розміщені дані про ширину схилів спектрів радіовипромінювання на основі таблиць результатів вимірювань фахівцями УДЦР.

Таблиця 2.5

Ширина схилів спектрів за результатами вимірювання

№	Система	Частота, МГц	Схил	Ширина схилу на рівні -20 дБ, кГц	Ширина схилу на рівні -30 дБ, кГц
1	2	3	4	5	6
1	DVB-T2	514	лівий	55	185
			правий	83	144
2	DVB-T2	554	лівий	114	168
			правий	140	192
3	DVB-T2	538	лівий	195	222
			правий	240	270
4	DVB-T2	698	лівий	80	180
			правий	150	180

Продовження таблиці 2.5

1	2	3	4	5	6
5	DVB-T	634	лівий	160	250
			правий	130	202
6	DVB-T	650	лівий	110	-
			правий	165	195
7	DVB-T	714	лівий	85	150
			правий	100	170
8	DVB-T	818	лівий	190	270
			правий	130	245
9	DVB-T2	Всі частоти	лівий	111	188,75
			правий	160,75	196,5
10	DVB-T	Всі частоти	лівий	136,25	223,3
			правий	131,25	203
11	DVB-T DVB-T2	Всі частоти	лівий і правий	134,8	202,9

З таблиць 2.3 -2.5 слідує, що ширина схилів за даними математичного моделювання за сприятливих умов поширення радіохвиль близька до ширини схилів нормативних спектрів, а результати вимірювань приблизно на один порядок більші. Зазначимо, що в Києві передавачі працюють в режимі 8 к та 32 к.

Проведені подальші експериментальні дослідження в листопаді 2013 р. із використанням аналізатора спектра Rohde&Schwarz U3772 Advantest свідчать, що ширина схилів спектрів залежить від параметрів: смуги частот за проміжною частотою *RBW* та смуги відеочастот *VBW*. Останні параметри обираються у відповідності до ширини смуги частот огляду *SPAN*. Дані табл. 2.5 отримані для *SPAN*=10 МГц, кількість відліків спектра дорівнює 1000 з кроком $\Delta f = 10$ кГц. Зменшення величин *RBW* та *VBW* призводить до зростання тривалості вимірювань.

В табл. 2.6 включені дані про вимірювання спектрів випромінювання для зменшеної ширини смуг *RBW* та *VBW* без зміни положення точки приймання.

Таблиця 2.6

Ширина схилів спектрів для зменшених значень смуг *RBW* та *VBW*.

№	Система	Частота, МГц	Схил	Крок відліку, кГц	Ширина схилу на рівні -20 дБ, кГц	Ширина схилу на рівні -30 дБ, кГц
1	2	3	4	5	6	7
1	DVB-T2	514	лівий	3	3,3	27
2	DVB-T2	554	лівий	3	23	-
			правий		14	114
3	DVB-T2	538	лівий	3	14	85
			правий		11,2	110
4	DVB-T2	698	лівий	3	11,5	67,7
			правий		9	85
5	DVB-T	634	лівий	3	18	133
			правий		25	246
6	DVB-T	650	лівий	3	23	71
			правий		27,5	94
7	DVB-T	818	лівий	1,1	12,5	265
				3	18	265
			правий	3	30	187
8	DVB-T2	Всі частоти	лівий	3	12,95	59,9
			правий		11,4	103
9	DVB-T	Всі частоти	лівий	3	19,7	156,3
			правий		27,5	175,7

Як слідує із даних табл. 2.6 зменшення в 4 рази ширини смуг пропускання за проміжною та відео частотою аналізатора спектра наблизило результати вимірювання у сприятливих умовах (на відстанях не більше 2 км від передавача) ширини схилів до результатів математичного моделювання та нормативних даних. Також потрібно відмітити, що із зменшенням смуг *RBW* та *VBW* стала помітною більша ширина схилів для стандарту DVB-T, що

пояснюється використанням режиму δk у порівнянні з $32 k$ за стандартом DVB-T2.

Аналогічні результати дало використання аналізатора спектра Rohde&Schwarz FSH8, який був люб'язно наданий київським представництвом R&S. На рис. 2.17 представлено лівий схил спектра радіовипромінювання на центральній частоті 818 МГц. Вимірювання проводились в районі пл. Л.Толстого м. Києва при $RBW = VBW = 10$ кГц і $SPAN = 890$ кГц. Різниця положень міток складає 14,8 кГц, а між рівнями -100 дБ та -122 дБ різниця - 32,6 кГц.

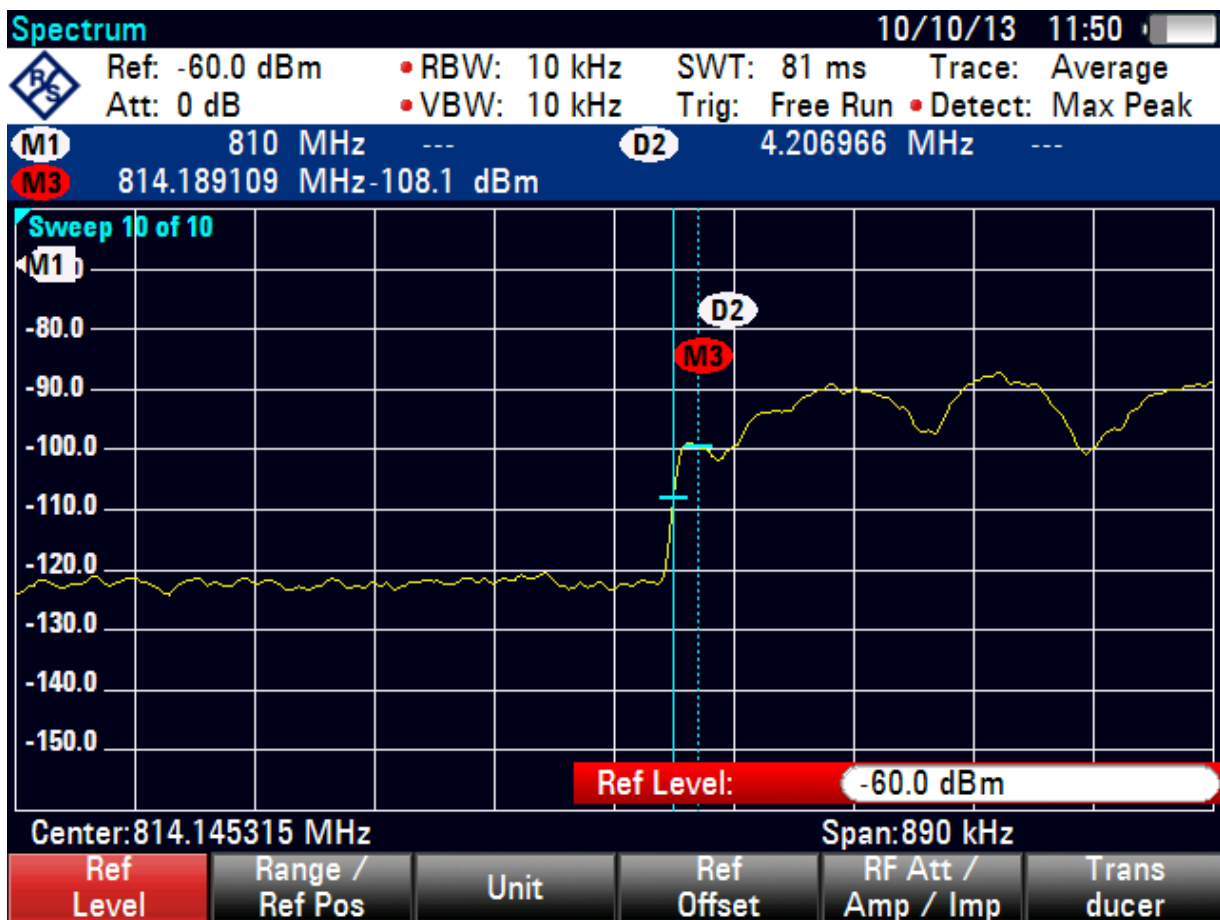


Рис. 2.17. Лівий схил спектра радіовипромінювання з центральною частотою 818 МГц з $RBW = VBW = 10$ кГц.

Зміна значення ширини смуги за проміжною частотою в 10 разів $RBW = 1$ кГц призводить до подальшого зменшення ширини лівого схилу спектра радіовипромінювання (рис. 2.18). Ширина лівого схилу на рівні - 20 дБ від опорного рівня дорівнює 6,8 кГц.



Рис. 2.18. Лівий схил спектра радіовипромінювання з центральною частотою 818 МГц з $RBW = 1$ кГц та $VBW = 10$ кГц.

Аналогічні результати отримані і для радіовипромінювання за стандартом DVB-T2 на частоті 698 МГц у результаті проведення серії вимірювань. При послідовному зменшенні ширини смуг RBW та VBW значення ширини схилу спектра наближається до значення із нормативного спектра. Приклади цього представлені на рис. 2.19 та рис. 2.20. Ширина лівого схилу на рівні -20 дБ дорівнює приблизно 3 кГц (рис. 2.19). Подальше зменшення ширини смуг до $RBW = 30$ Гц та $VBW = 100$ Гц дозволяє отримати практично нормативні значення ширини схилу для режиму 32 к:

з графіку на рис. 2.20 на рівні -20 дБ ширина схилу – 2,5 кГц, нормативне значення з табл. 2.3 – 2 кГц;

з графіку на рис. 2.20 на рівні $-27,3$ дБ ширина схилу – 10 кГц, нормативне значення з табл. 2.3 на рівні -30 дБ дорівнює 10,5 кГц.



Рис. 2.19. Лівий схил спектра радіовипромінювання з центральною частотою 698 МГц з $RBW = 100$ Гц та $VBW = 300$ Гц.



Рис. 2.20. Лівий схил спектра радіовипромінювання з центральною частотою 698 МГц з $RBW = 30$ Гц та $VBW = 100$ Гц.

2.4. Вибір режиму роботи вимірювальної апаратури

Як видно із результатів експериментальних досліджень спектрів сигналів ефірного цифрового телебачення, наведених у підрозділі 2.3, у випадку вибору малих значень ширини смуг пропускання *RBW* та *VBW* аналізаторів спектра отримані спектри наближені до нормативних за відповідними параметрами стандарту DVB-T2.

Потрібно визначити наскільки вказані параметри апаратури відповідають умовам практичного застосування. Для цього коротко розглянемо аналізатори спектра [76].

Дискретний сигнал найчастіше представляють у вигляді дискретних відліків і записують за допомогою зміщеної у часі дельта-функції δ [29]

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k \delta(t - k). \quad (2.1)$$

Спектр сигналу за перетворенням Фур'є з урахуванням спектра дельта-функції, рівного одиниці, та впливу затримки записується

$$\dot{S}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k e^{-i\omega k}. \quad (2.2)$$

Спектр (2.2) є періодичним, а його розмірність співпадає з розмірністю відліків. У випадку коли відліки x_k є періодичними значеннями аналогового сигналу $s(kT)$, формула (2.1) приймає вигляд

$$s_{\delta}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(kT) \delta(t - k) = s(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT). \quad (2.3)$$

Сума в (2.3) може бути представлена комплексним рядом Фур'є. Тоді отримуємо

$$s_{\delta}(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(t) e^{i\omega_n t}. \quad (2.4)$$

У спектральному представленні сигналу (2.4) вплив фазового множника відображається зсувом за частотою на ω_n

$$\dot{S}(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{S}\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right),$$

а сам спектр є нескінченною сумою копій спектрів початкового аналогового сигналу. Частота дискретизації $\omega_0 = 2\pi/T$ визначає частотну смугу між центральними частотами сусідніх копій спектра. Використання фільтра нижніх частот із границею смуги пропускання, що дорівнює $\omega_0/2$, дозволяє виділити спектр первісного сигналу.

Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) періодичного сигналу

$$\dot{X}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \exp(-i \frac{2\pi nk}{N}), \quad (2.5)$$

де N – кількість відліків у періоді сигналу,

визначає дискретні відліки спектральної функції (2.2) дискретного сигналу на частотах $\omega_n = \omega_0 n/N$ [29]

$$\dot{X}(n) = \dot{S}(\frac{2\pi n}{NT}) = \dot{S}(\omega_0 \frac{n}{N}).$$

Під час радіомоніторингу необхідно оцінити спектр сигналу на підставі вибірки його дискретних відліків. У загальному випадку вхідний сигнал аналізатора спектра (вимірювального приймача) є випадковим процесом.

Швидке перетворення Фур'є (ШПФ) характеризується значно меншим обсягом обчислень і такою ж точністю, як ДПФ.

У випадку, коли значення початкових та кінцевих відліків сигналу значно відрізняються, при періодичному подовженню сигналу за ДПФ на стиках сегментів виникають стрибки, що призводить до негативного явища розтікання спектра.

Методом боротьби з розтіканням спектра, який використовують на практиці, є застосування невід'ємних вагових функцій (вікон) $\nu(k)$ із схилами на кінцях сегмента. Тоді (2.5) записується у вигляді

$$\dot{X}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \nu(k) \exp(-i \frac{2\pi nk}{N}). \quad (2.6)$$

Ефективність застосування вікон залежить від їх типу. Наприклад, послаблення рівня бокових пелюсток спектра становить – 13 дБ для

прямокутного вікна, - 43 дБ для вікна Хеммінга та - 92 дБ для вікна Блекмана-Харріса.

Вираз (2.6) призначений для знаходження спектра детермінованих сигналів. Для стаціонарного дискретного випадкового процесу застосовується усереднення спектру потужності за ансамблем реалізацій

$$W(\omega) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2n+1} \left| \sum_{k=-n}^n x(k) e^{-i\omega k T} \right|^2.$$

Структурна схема сучасних аналізаторів спектра включає послідовно з'єднані вхідний атенюатор, фільтр низьких частот, перетворювач частоти у складі змішувача і гетеродина, смуговий фільтр та підсилювач проміжної частоти, блок підключаємих смугових фільтрів, які визначають смугу пропускання приладу, аналого-цифровий перетворювач та процесор. Процесор зв'язаний з пристроями пам'яті, відображення результатів та управління роботою гетеродина.

Принциповим недоліком аналізаторів спектра є високі часові витрати на отримання спектра за малих значень ширини частотних смуг *RBW* та *VBW* [76]. Найкращі та найбільш вартісні аналізатори спектра, в тому числі реального часу, є продуктами виробництва Agilent Technologies (наприклад, серій E440, 856*EC), R&S (серій FSU, FSP, FSVR), Tectronix (серій 3000, 6000). Найбільшою швидкістю характеризуються аналізатори спектра реального часу (RSA). Прилади Tectronix забезпечують обробку до 48000 кадрів (спектрів) в секунду.

Проведемо оцінку часу на отримання спектрів за допомогою аналізаторів спектра RSA, тобто з найвищою швидкістю, для різних значень ширини смуги пропускання за проміжною частотою *RBW*, близької до максимальної швидкості обробки у $\nu=40000$ кадрів/с та шириною смуги *SPAN* =10 МГц, а також для гетеродинних та векторних аналізаторів спектра з швидкістю в $\nu=50$ кадрів/с. Результати оцінки поміщені в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Результати оцінки часу на побудову спектра ефірного цифрового телебачення аналізатором спектра реального часу

<i>RBW</i> , Гц	10	100	1000	10000	100000
Час, с ($\nu=40000$ кадрів/с)	25	2,5	0,25	0,025	0,0025
Час, с ($\nu=50$ кадрів/с)	20000	2000	200	20	2

Як видно з даних табл. 2.7, якщо орієнтуватися на аналізатори спектра середнього цінового діапазону, яка за усередненою оцінкою може становити \$50000, то вибір $RBW \leq 1$ кГц під час радіоконтролю параметрів цифрового телебачення стандарту DVB-T2 є неприйнятним з причини низької швидкодії.

2.5. Висновки

За результатами проведених у другому розділі роботи досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Мережа ефірного мовлення цифрового телебачення включає апаратуру, що встановлюється в 166 містах країни. Загальна кількість передавачів в мережі перевищує число міст. Потрібно проводити плановий радіоконтроль параметрів радіовипромінювання з усіх джерел. Тому очевидно, що розробка та впровадження методик, спрямованих на зменшення трудомісткості радіоконтролю засобів цифрового телебачення є актуальним.

2. Аналіз науково-технічних джерел щодо математичних моделей та програмних засобів моделювання процесу функціонування цифрового телебачення стандарту DVB-T2 свідчить, що найбільш досконалою є

моделююча платформа CSP, розроблена рядом провідних організацій європейських країн.

3. Результати математичного моделювання спектрів радіовипромінювання на виході радіоканалу за допомогою доопрацьованої платформи CSP співпадають зі спектрами, що надаються нормативними документами на систему цифрового телебачення стандарту DVB-T2, та є відмінними від результатів вимірювання штатними засобами УДЦР в частині крутизни схилів спектрів.

4. Пошук причин невідповідності результатів моделювання та вимірювання спектрів сигналів цифрового телебачення показав, що за вибору малих значень ширини смуг пропускання аналізаторів спектра за проміжною частотою та у відеотракті отримані спектри в частині схилів наближаються до нормативних кривих. Проте вимірювання параметрів радіовипромінювання за таких режимів неприйнятно для практики з причини низької швидкодії.

5. Для визначення рівня на спектрі радіовипромінювання цифрового телебачення, який з припустимою похибкою відповідає ЗШСЧ, та обґрунтування застосування результатів досліджень під час радіомоніторингу необхідно провести експериментальні вимірювання та обробити отримані результати.

РОЗДІЛ 3
ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЙМАНОЇ ШИРИНИ СМУГИ ЧАСТОТ
РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ
СТАНДАРТІВ DVB-T, DVB-T2 ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Апаратура, що використовувалася під час експериментальних досліджень

Інформація щодо вимог до вимірювання ЗШСЧ радіовипромінювання і, зокрема цифрового телебачення, подавалася в першому та другому розділах роботи. Особливістю контролю даного параметру за $\beta/2$ - методом є вимога до умов вимірювання щодо рівня шумів у - 30 дБ відповідно до рівня спектра сигналу, прийнятого за опорний. Як свідчить досвід вимірювання у Києві такі умови можна забезпечити тільки в окремих точках на близькій відстані від передавачів.

Вимірювання проводились фахівцями УДЦР у січні та листопаді 2013 р. За допомогою мобільного комплексу апаратури проводився пошук місць поблизу передавачів системи цифрового телебачення з мінімальним рівнем шумів. Використовувався аналізатор спектра Rohde&Schwarz U3772 Advantest, який має наступні параметри [77]:

- точність вимірювання за амплітудою $\pm 0,3\text{дБ}$;
- динамічний діапазон від $+30\text{дБМ}$ до -139дБМ ;
- частотний діапазон від 9 кГц до 43 ГГц;
- вхідний опір 50 Ом;
- роздільна здатність за проміжною частотою (*RBW*) від 100 Гц до 3 МГц;
- ширина смуги за відео частотою (*VBW*) від 10 Гц до 3 МГц.

Програмне забезпечення мобільного комплексу було доопрацьовано для можливості отримання таблиць у Microsoft Excel, які включають колонку частот та відповідних значень спектральної щільності потужності (СЩП).

Також використовувався аналізатор спектра Rohde&Schwarz FSH8, який був наданий київським представництвом R&S. За допомогою даного приладу вивчалася можливість застосування SDR платформи HackRF One [78] з наступними параметрами:

- частотний діапазон від 10 МГц до 6 ГГц;
- частота дискретизації до $20 \cdot 10^6$ відліків в секунду;
- I/Q демодулятор з двоканальним 8 бітним АЦП;
- програмно керований коефіцієнт підсилення трактів передавача та

приймача, а також ширини смуги частот відео фільтра.

У київському представництві R&S одночасно проводилися вимірювання спектрів радіовипромінювання системи цифрового телебачення аналізатором спектра Rohde&Schwarz FSH8 та платформи HackRF One (рис. 3.1.), який під'єднувався до комп'ютера. Якісні результати в частині середньої частини та схилів спектрів були однаковими. Кількісні виміри було важко отримати, оскільки прилади оснащені різними антенами.

Тому проведені вимірювання рівня вихідних сигналів генератора сигналів R&S SMJ Vector Signal Generator [79] (рис. 3.2) за допомогою аналізатора спектра Rohde&Schwarz FSH8 та платформи HackRF One у частотному діапазоні до 1000 МГц.

Максимальна похибка вимірювання рівня вихідних сигналів генератора не перевищує 1,5 дБ. Середнє значення похибки дорівнює 0,98 дБ. Відповідно до європейського стандарту [80] максимальне значення невизначеності під час вимірювання позасмугового випромінювання на частотах до 2,2 ГГц складає $\pm 2,5$ дБ при довірчому рівні 95%. Зміст терміну невизначеності можна отримати, наприклад, з [81]. Невизначеність під час вимірювання трактується як сумнів у результатах і кількісно виражається інтервалом та довірчим рівнем. Тобто, це – інтервальне довірче оцінювання параметру за нормальним законом розподілення.

Похибку вимірювання SDR платформи HackRF One у 1-1,5 дБ можна вважати прийнятною.

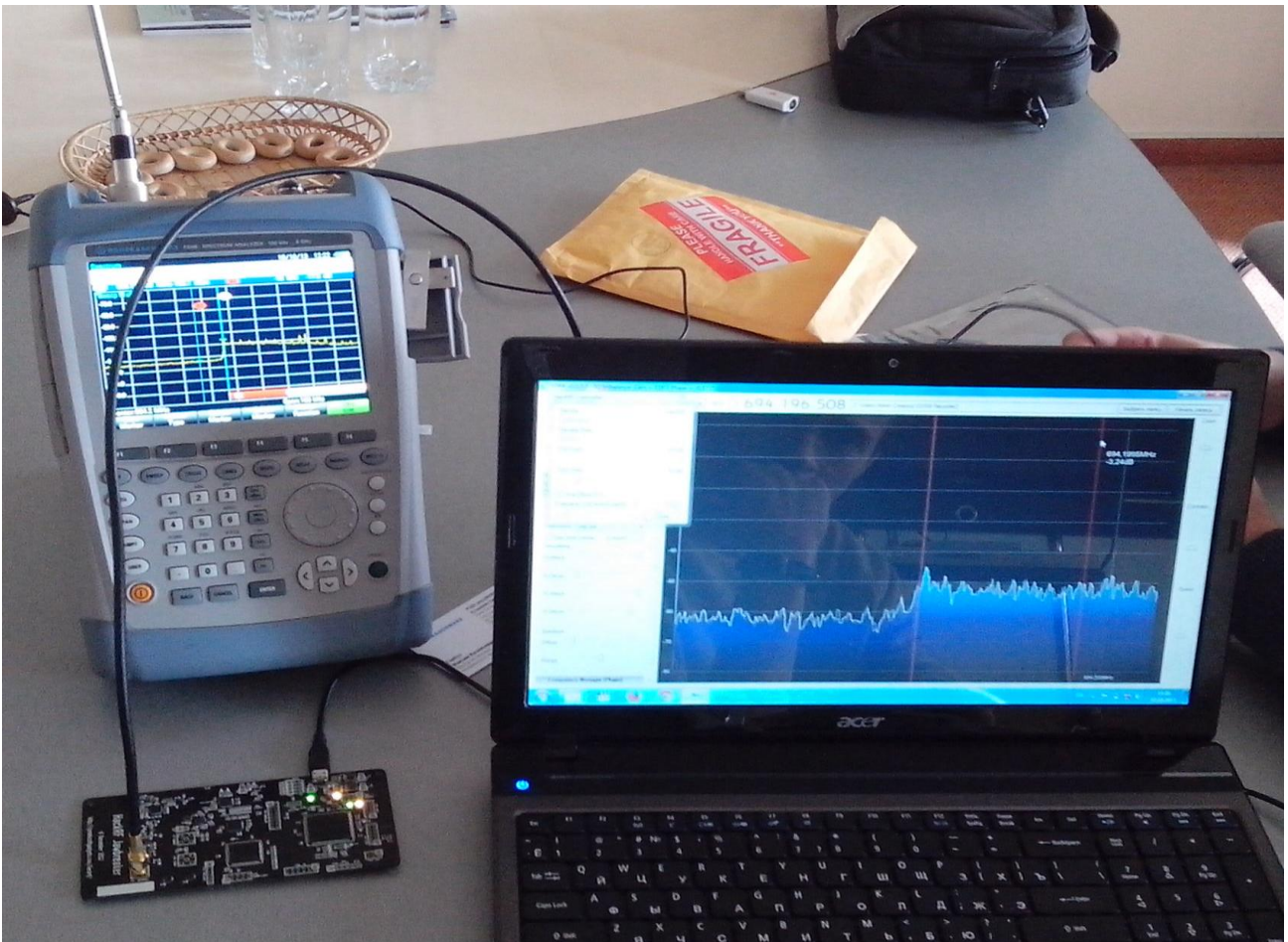


Рис. 3.1. Визначення якісних характеристик SDR платформи HackRF One

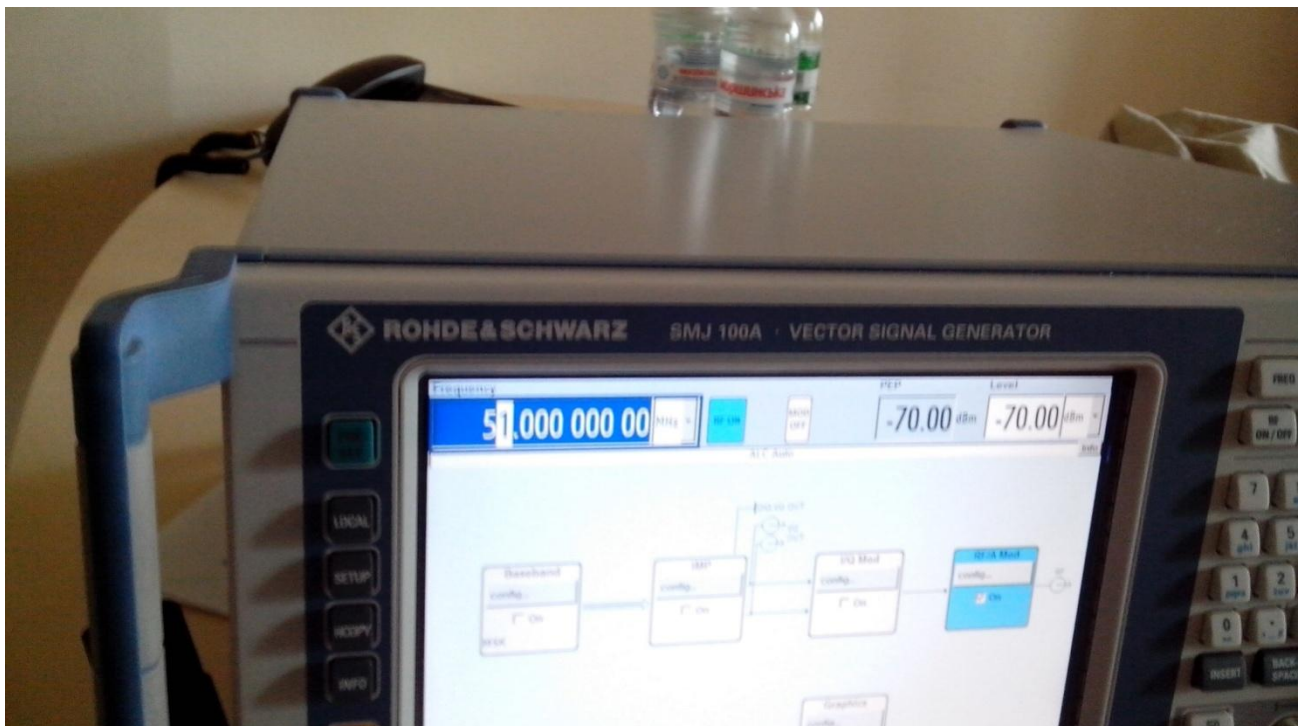


Рис. 3.2. Визначення точнісних характеристик SDR платформи HackRF One за допомогою генератора R&S SMJ Vector Signal Generator

3.2. Проведення експериментальних досліджень

У розділі 2 зазначалося, що результати експериментальних досліджень суттєво залежать як від місця вимірювання, так і режиму апаратури.

Дослідження спектрів радіовипромінювання цифрового телебачення [91], результати якого надані УДЦР, отримані для значень ширини смуги пропускання за проміжною частотою $RBW=10$ кГц та $RBW=3$ кГц. Під час вимірювання параметр $SPAN = 10$ МГц. Для кожного значення роздільної здатності і різних частот отримано по 16 реалізацій спектрів. Застосовувалися також інші значення $SPAN$ з метою дослідження схилів.

SDR платформа HackRF One використовувалася з кількістю точок у вибірці 32768, що відповідає роздільній здатності 305 Гц. Вимірювання, що проводилися на відстанях приблизно 4-5 км від вул. Мельникова, біля якої розташована телевежа в Києві, характеризуються рівнем шумів у діапазоні -20 дБ... -26 дБ від рівня, що прийнятий за опорний. Такі дані не є прийнятними. Тому подальша обробка результатів вимірювання проводилася для наближених до передавача місць, у яких рівень шумів знаходиться у діапазоні -26 дБ... -34 дБ від рівня, що прийнятий за опорний. На рис. 3.3 номером 1 позначене місце розташування телевежі, інші номери показують точки вимірювання спектрів радіовипромінювання.

Потрібно зазначити, що експериментальні дослідження, проведені фахівцями УДЦР, також здійснювалися в тому ж районі.

Для кожної точки на рис. 3.3 вимірювання проводилися протягом декілька днів з метою подальшого усереднення. Вибірка даних на кожній частоті включає усереднені по 10 реалізаціям спектри для кожного місця приймання [92, 96].

Приклад спектра радіовипромінювання цифрового телебачення на частоті 554 МГц, отриманого у точці № 11 за допомогою платформи HackRF One, представлено на рис. 3.4, а фрагменти цього спектра на рис. 3.5 - рис. 3.7. На інших частотах та для інших точок обробка даних від HackRF One

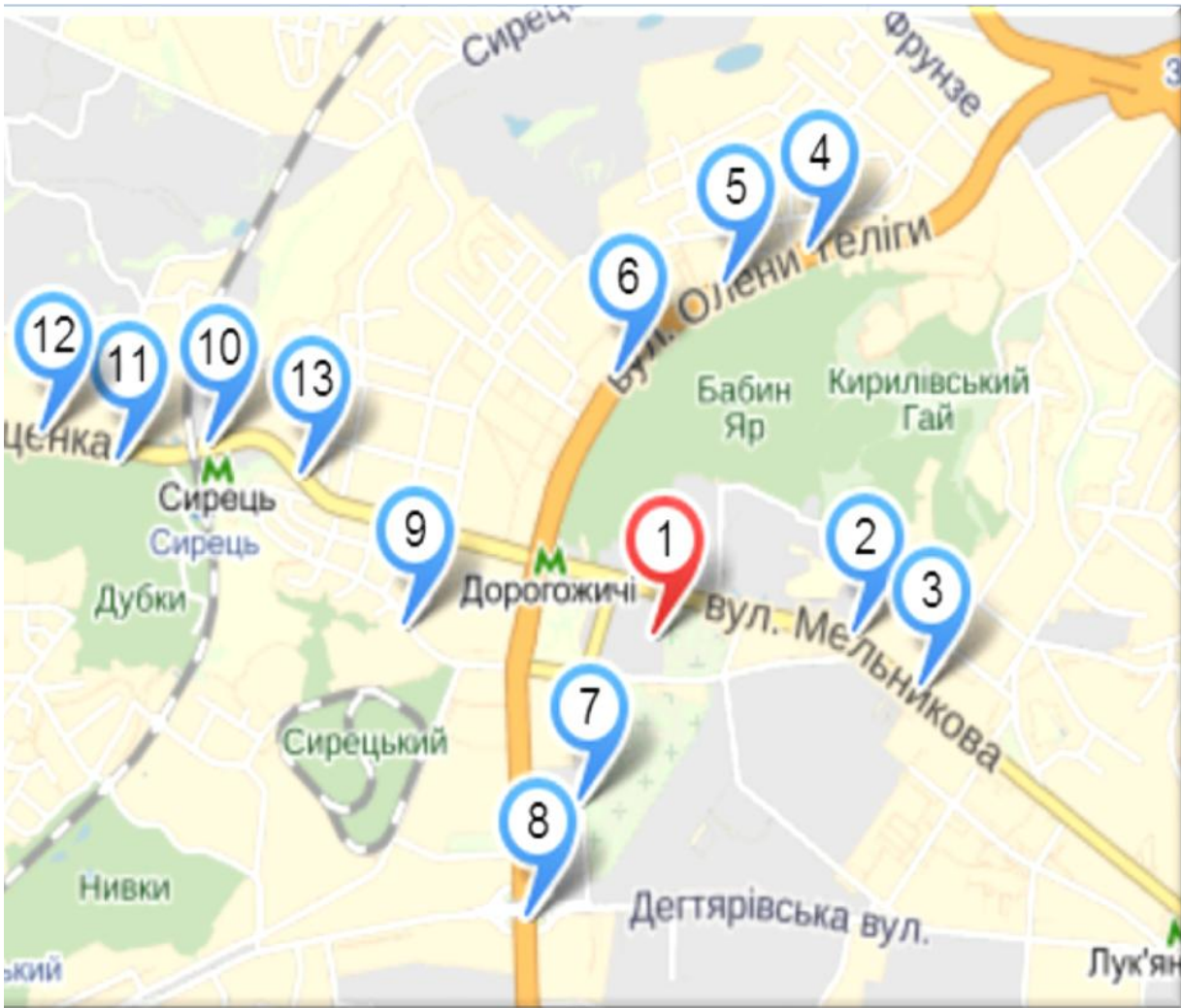


Рис. 3.3. Місця вимірювання радіовипромінювання цифрового телебачення за допомогою SDR платформи HackRF One.

дає зашумлені спектри. Це пояснюється великим обсягом вибірки: 32768 точок. Як видно з рисунків потрібна подальша обробка спектрів з метою визначення рівня, що приймається за опорний, та зменшення похибок з причини впливу прилеглих завод.

Середовище MATLAB пропонує ряд засобів для згладжування вибірки, серед яких метод рухомого усереднення, фільтр Савицького-Голея, локальні регресії з вагами і робастністю та без них.

За методом рухомого усереднення обирається кількість точок вибірки, яка приймає участь у визначенні значення середньої точки. За замовчуванням кількість точок дорівнює 5. При цьому фільтровані значення в точках визначаються за формулами

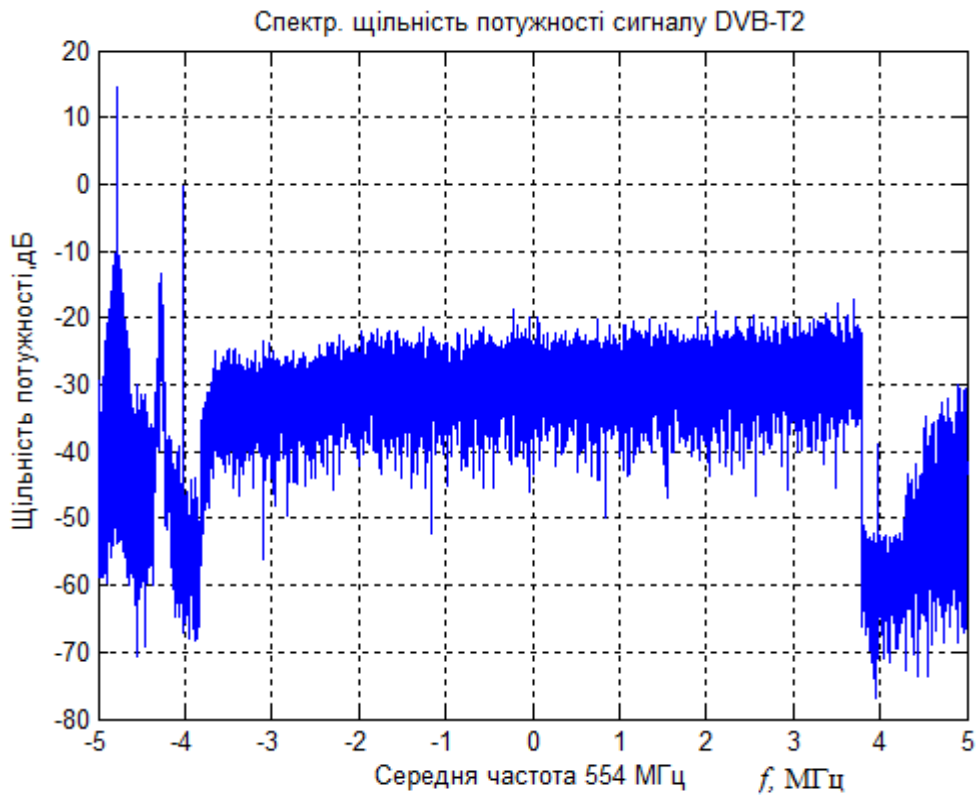


Рис. 3.4. Спектр радіовипромінювання на частоті 554 МГц, отриманий за допомогою SDR платформи HackRF One.

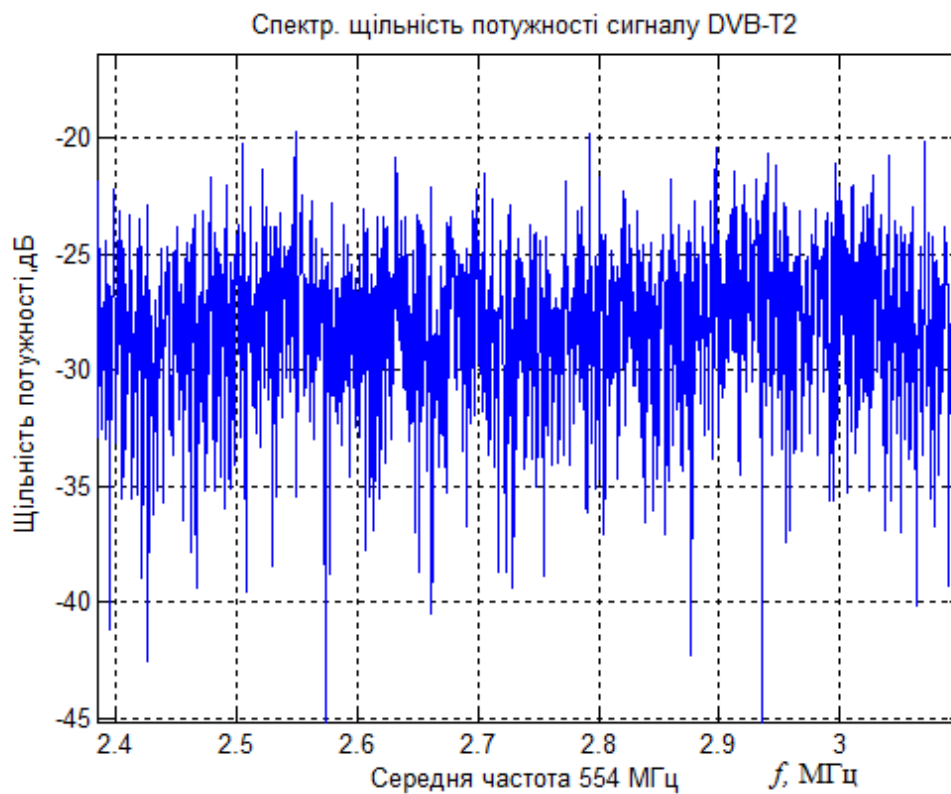


Рис. 3.5. Фрагмент середньої частини спектра на рис. 3.4.

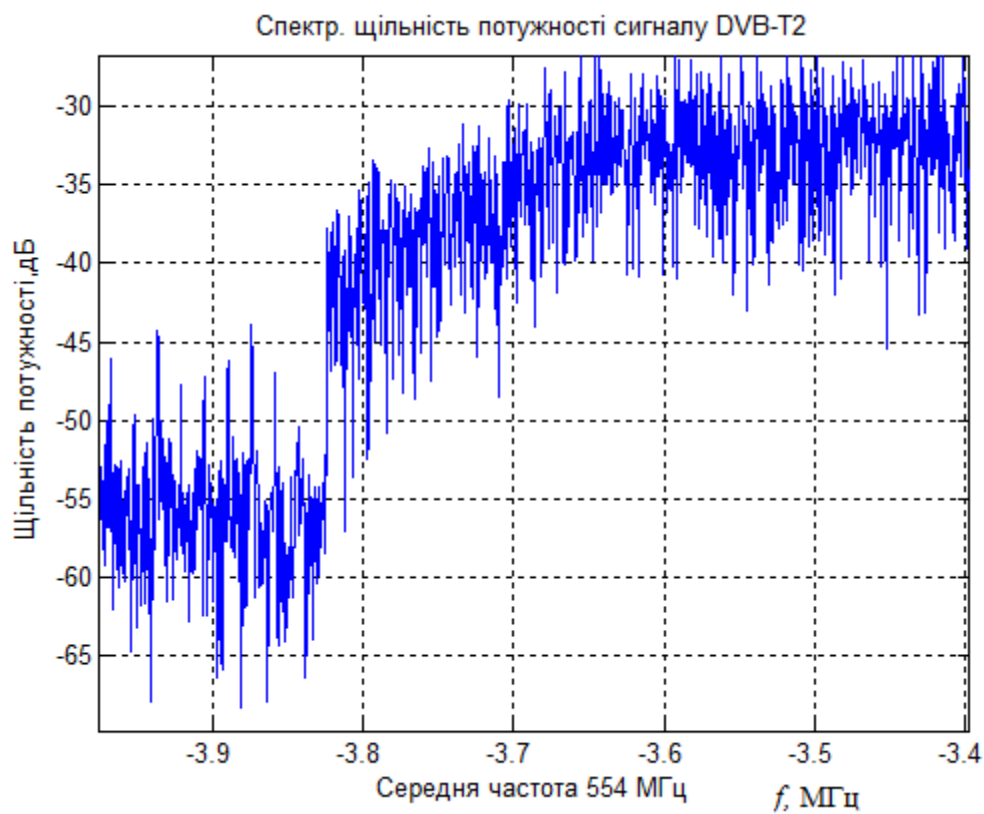


Рис. 3.6. Фрагмент лівого схилу спектра на рис. 3.4.

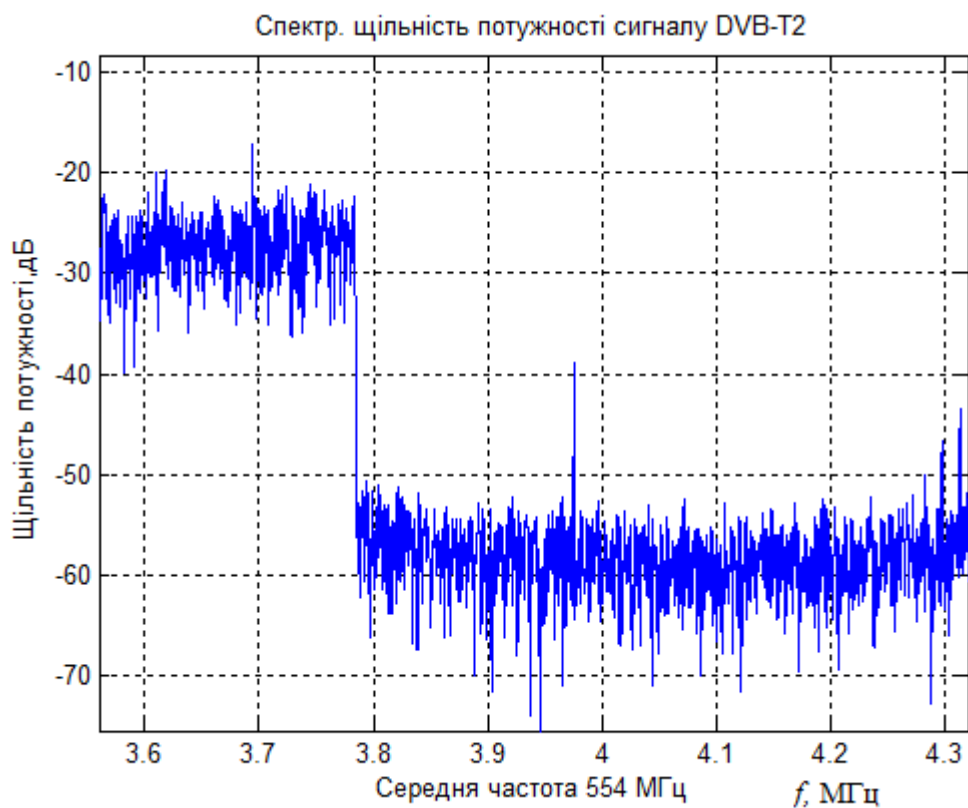


Рис. 3.7. Фрагмент правого схилу спектра на рис. 3.4.

$$ys(1) = y(1);$$

$$ys(2) = (y(1)+y(2)+y(3))/3;$$

$$ys(3) = (y(1)+y(2)+y(3)+y(4)+y(5))/5;$$

$$ys(4) = (y(2)+y(3)+y(4)+y(5)+y(6))/5,$$

де $y(i)$ - не згладжене значення у точці номер i .

З причини значного обсягу таблиці відліків спектра (32768) згладжування за методом рухомого усереднення не дає бажаного результату. На рис. 3.8 та рис.3.9 представлений спектр на частоті 544 МГц (рис. 3.4) для кількості точок усереднення 51 і 101 відповідно.

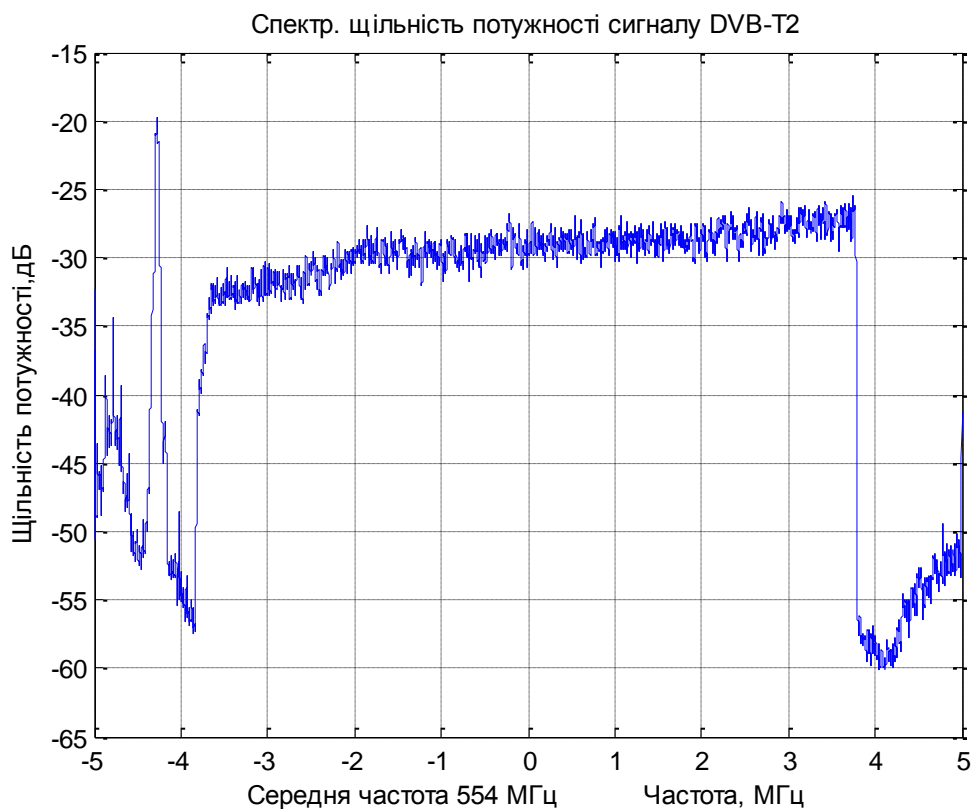


Рис. 3.8. Спектр радіовипромінювання на частоті 544 МГц, отриманий за допомогою платформи HackRF One та згладжений за методом рухомого усереднення в 51 точок.

ЗШСЧ радіовипромінювання визначається за алгоритмом, в якому спочатку знаходяться границі спектра. За відсутності завад, як показує досвід, за

границі спектра можна прийняти частоти ± 4 МГц від середньої частоти. При цьому границі спектра знаходяться на рівні не менше за -30 дБ від рівня, що прийнятий за опорний. Проте нерідко зустрічаються випадки дії прилеглих завод. Тому границі спектра лежать у діапазоні значень $\pm(3,9-3,99)$ МГц.

Далі з кожної сторони спектра визначається частота і відповідний їй рівень спектра, за межами яких знаходиться 0,5% потужності радіовипромінювання. Для спектра без згладжування ЗШСЧ = 7,4017 МГц. Для 51 точок усереднення зміни ЗШСЧ не є значними: 0,07% при ЗШСЧ = 7,3965 МГц.

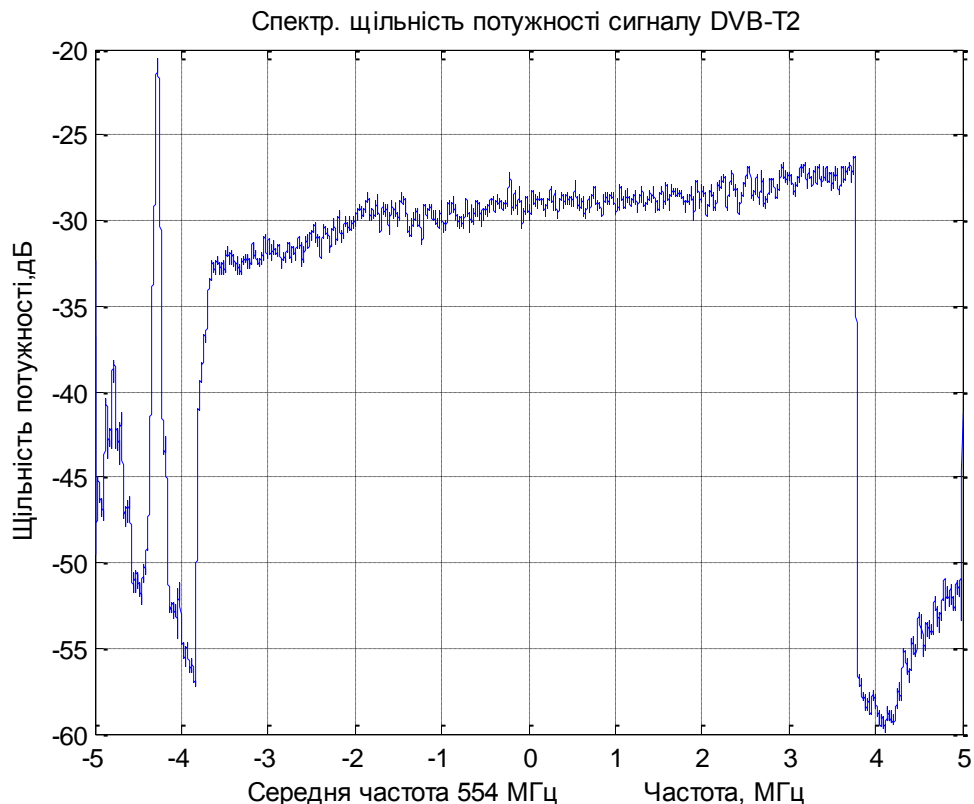


Рис. 3.9. Спектр радіовипромінювання на частоті 554 МГц, отриманий за допомогою платформи HackRF One та згладжений за методом рухомого усереднення в 101 точок.

Для усереднення в 101 точок ЗШСЧ = 7,3914 МГц.

Локальні регресії з вагами були запропоновані В. Клівлендом [82] та в MATLAB представлені алгоритмами LOWESS і LOESS. LOWESS є лінійно-локального моделлю згладжування з вагою [83], що визначається за формулою

$$w_i = \left(1 - \left|\frac{x - x_i}{d(x)}\right|^3\right)^3, \quad (3.1)$$

де: x - значення в точці, яка згладжується; x_i - значення в i -ій точці з набору точок локальної регресії; $d(x)$ - відстань від точки x до найбільш віддаленої точки набору.

З (3.1) слідує, що найбільшу вагу має найвіддаленіша точка набору. У алгоритмі LOWESS проводиться пошук параметрів a і β локально-лінійної моделі $y = \alpha + \beta x + \varepsilon$, а в алгоритмі LOESS використовується локально-квадратична модель.

За наявності викидів у вибірці похибка згладжування зростає. Тому використовуються робастні алгоритми LOWESS і LOESS, що дозволяють компенсувати вплив невеликого числа викидів за допомогою робастної ваги, яка обчислюється після знаходження параметрів локальної регресії. Робастна вага знаходиться за виразом:

$$w_i = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{r_i}{6MAD}\right)^2\right]^2, & |r_i| < 6MAD; \\ 0, & |r_i| \geq 6MAD, \end{cases}$$

де: r_i - різниця між первинним і згладженим значенням викиду; MAD - модуль медіани різниці між первинним і згладженим значенням викиду.

Якщо різниця r_i є малою у порівнянні з $6MAD$, то вага близька до одиниці, а в іншому випадку дорівнює або наближається до нуля.

На рис. 3.10 представлено спектр на частоті 544 МГц з усередненням по 201 точці за алгоритмом LOWESS.

Згладжування спектрів можна також проводити за допомогою фільтра Савицького-Голея [84], за яким кожній послідовності з $2m + 1$ точок відповідає за методом найменших квадратів поліном $l < 2m + 1$ ступеня. Похідну порядку $p < l$ послідовності в середній точці знаходять використовуючи поліном. Рухому поліноміальну апроксимацію отримують згорткою вхідних даних з цифровим фільтром розміром $2m+1$. Умовою отримання коефіцієнтів згортки є непарність послідовності відліків.

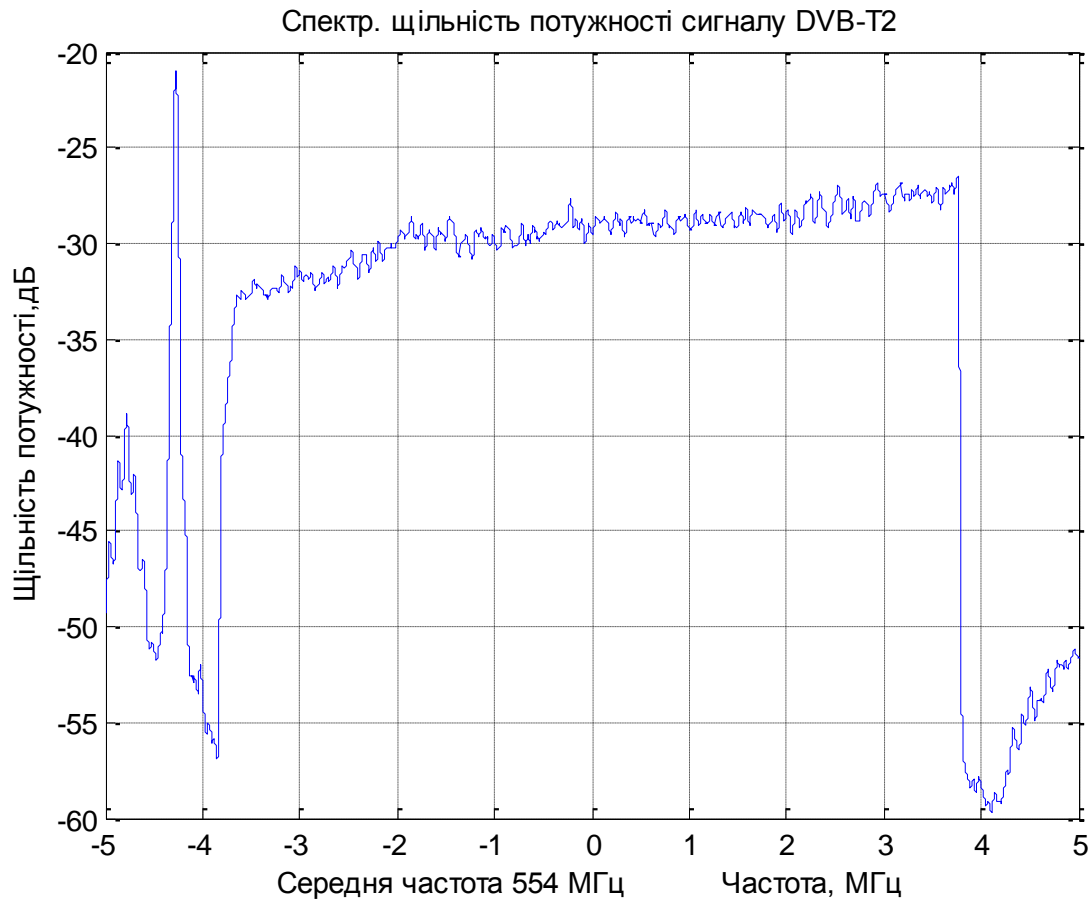


Рис. 3.10. Спектр радіовипромінювання на частоті 554 МГц, отриманий за допомогою SDR платформи HackRF One, з усередненням за алгоритмом LOWESS і набором 201 точок.

Для всіх методів згладжування форма спектра залежить від кількості точок у локальній послідовності і має вигляд як на рис. 3.8 - рис. 3.10. Важливішим є те, що змінюється займана ширина смуги частот радіовипромінювання. Для інших частот та інших місць розміщення приймальної антени спостерігаються аналогічні процеси. Тому наводити додаткові приклади є недоцільним.

В табл. 3.1 зосереджені дані про ЗШСЧ на основі спектра на частоті 554 МГц, отриманого за допомогою платформи HackRF One, з усередненням за різними методами і використання локальних рухомих послідовностей з 51, 101 та 201 точками.

Таблиця 3.1

ЗШСЧ спектра (32768 відліків) на частоті 554 МГц, отриманого за допомогою платформи HackRF One, з усередненням за різними методами

№	Алгоритм згладжування	Кількість точок у рухомій послідовності	ЗШСЧ, МГц
1	2	3	4
1	Рухомого усереднення	1	7,4017
		51	7,3962
		101	7,3911
		201	7,3764
2	LOWESS	1	7,4017
		51	7,3981
		101	7,3944
		201	7,3868
3	LOESS	1	7,4017
		51	7,4002
		101	7,4002
		201	7,3984
4	Робастний LOWESS	1	7,4017
		51	7,3959
		101	7,3795
		201	7,3795
5	Робастний LOESS	1	7,4017
		51	7,3978
		101	7,3969
		201	7,3950
6	Фільтр Савицького-Голея. Ступінь полінома - 2	1	7,4017
		51	7,4002
		101	7,3996
		201	7,3969

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
7	Фільтр Савицького-Голя. Ступінь полінома - 3	1	7,4017
		51	7,4002
		101	7,3996
		201	7,3969
8	Фільтр Савицького-Голя. Ступінь полінома - 4	1	7,4017
		51	7,4005
		101	7,4014
		201	7,4008
9	Фільтр Савицького-Голя. Ступінь полінома - 5	1	7,4017
		51	7,4005
		101	7,4014
		201	7,4008

Очевидно, що ЗШСЧ після згладжування повинна залишатися максимально близькою до значення ЗШСЧ первинного спектра, а викиди спектра бути згладженими. Даному критерію відповідає застосування фільтра Савицького-Голя і ступінню полінома 3-4 , а також алгоритм LOESS з локально-квадратичною моделлю.

Продовжимо розгляд прикладу спектра на рис. 3.4 в частині визначення рівня, прийнятого за опорний. У Рекомендації ITU-R SM.1541 [56] наголошується, що даний рівень можна знайти двома шляхами: визначити максимальний рівень потужності або середнє значення "полиці" спектра. Форма спектра сигналу цифрового телебачення DVB-T2 відповідає обом методам визначення опорного рівня. Приклад на рис. 3.4 є цікавим з точки зору нахилу "полиці" спектра. Результати визначення рівня, прийнятого за опорний, розміщені в табл. 3.2. Також в табл. 3.2 є дані іншого прикладу: для середньої частоти 634 МГц при вимірюванні платформою HackRF One. Спектр даного радіовипромінювання на рис. 3.11 має більш рівну "полицю".

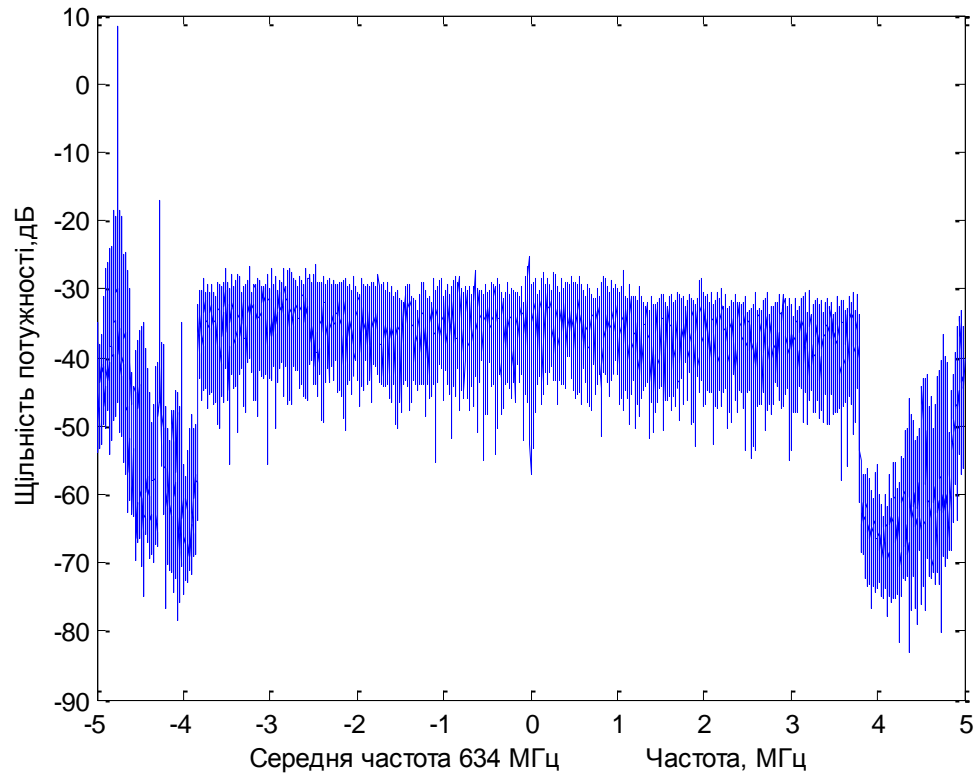


Рис. 3.11. Спектр радіовипромінювання на частоті 634 МГц, отриманий за допомогою SDR платформи HackRF One.

Таблиця 3.2

Визначення рівня спектра, прийнятого за опорний для даних SDR платформи HackRF One (32768 відліків)

№	Частота, МГц	Алгоритм згладжування	Кількість точок у рухомій послідовності	Рівень спектра, прийнятий за опорний	
				За максимальним значенням, дБ	За середнім значенням, дБ
1	2	3	4	5	6
1	554	LOESS	51	-24.811	-29,576
			101	-25.7629	-29,576
			201	-26.532	-29,575
			301	-26.787	-29,575
		Фільтр Савицького-Голя (ФСГ). Ступінь полінома - 3	51	-25.032	-29.576
			101	-25.758	-29.576
			201	-26.505	-29.575
			301	-26.778	-29.575

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6
	554	ФСГ. Ступінь полінома - 4	51	-24.051	-29.576
			101	-25.491	-29.576
			201	-26.236	-29.575
			301	-26.581	-29.575
		ФСГ. Ступінь полінома - 5	51	-24.051	-29.576
			101	-25.491	-29.576
			201	-26.236	-29.575
			301	-26.581	-29.575
2	634	LOESS	51	-31,797	-35,774
			101	-32,614	-35,774
			201	-33,273	-35,774
			301	-33,477	-35,774
		ФСГ. Ступінь полінома - 3	51	-31.911	-35,774
			101	-32.654	-35,774
			201	-33.199	-35,774
			301	-33.216	-35,774
		ФСГ. Ступінь полінома - 4	51	-31,284	-35,774
			101	-32,347	-35,774
			201	-33,118	-35,775
			301	-33,331	-35,774
		ФСГ. Ступінь полінома - 5	51	-31.284	-35,774
			101	-32.347	-35,774
			201	-33.118	-35,775
			301	-33,331	-35,774

З таблиці 3.2 слідує, що значення рівня, прийнятого за опорний, при його знаходженні за максимумом спектра залежить як від методу згладжування, так і від кількості точок у рухомій послідовності. Кращі результати отримані для

згладжування фільтром Савицького-Голея із ступенем полінома 4-5. При цьому для спектра з центральною частотою 544 МГц різниця значень для кількості точок 51 і 301 складає 1,5 дБ, а для частоти 634 МГц - 1,1 дБ.

Значення опорного рівня, що визначене за середнім значенням, не залежить від методу згладжування і кількості точок. Обидва методи можна застосовувати для обґрунтування рівня X дБ, що відповідає ЗШСЧ радіовипромінювання. Під час практичного контролю параметрів радіовипромінювання використання максимального значення є більш зручним. Для загальної кількості відліків спектра 32768 можна рекомендувати кількість точок у рухомій послідовності у 201 одиниць.

Постає питання про доцільність згладжування даних від аналізатора спектра. В табл. 3.3 наведені результати згладжування для тих же частот і умов вимірювання, але отримані за використання аналізатора спектра R&S U3772 Advantest при кількості відліків спектра 1001 і роздільній здатності за проміжною частотою $RBW=10$ кГц.

Таблиця 3.3

Визначення рівня спектра, прийнятого за опорний для даних аналізатора спектра R&S U3772 Advantest (1001 відліків)

№	Частота, МГц	Алгоритм згладжування	Кількість точок у рухомій послідовності	Рівень спектра, прийнятий за опорний	
				За максимальним значенням, дБ	За середнім значенням, дБ
1	2	3	4	5	6
1	554 554	Без згладжування	-	43,844	38,946
		LOESS	5	43,844	38,946
			11	41,9456	38,945
		ФСГ. Ступінь полінома - 3	5	42,754	38,945
			11	41,702	38,945
		ФСГ. Ступінь полінома - 4	5	43,844	38,946
			11	42,144	38,945

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6
2	634	Без згладжування	-	44,523	39,727
		LOESS	5	44,523	39,727
			11	43,111	39,726
		ФСГ. Ступінь полінома - 3	5	43,686	39,725
			11	42,245	39,727
		ФСГ. Ступінь полінома - 4	5	44,523	39,727
			11	43,379	39,726

Спектр радіовипромінювання від аналізатора спектра з кількістю 1001 відліків є менш зашумленим. Доцільно використовувати згладжування з невеликою кількістю точок у рухомій послідовності. Зміна рівня, що прийнятий за опорний, є аналогічною до даних SDR платформи HackRF One.

3.3. Визначення ЗШСЧ радіовипромінювання за експериментальними даними

У розділі 2 показано, що результати визначення ЗШСЧ радіовипромінювання залежать від режиму роботи засобів вимірювання. Тому, доцільно виробити рекомендації щодо вимірювання ЗШСЧ, які б включали можливість оцінок даного параметра при різних рівнях роздільної здатності, а саме: 10 кГц, 3 кГц та 305 Гц.

Алгоритм, що використовується для визначення ЗШСЧ радіовипромінювання, базується на рекомендаціях нормативних документів, наведених у першому розділі роботи. Спочатку визначається ширина спектра радіовипромінювання цифрового телебачення. Аналіз експериментально отриманих спектрів свідчить, що вони повно вкладаються в інтервал $\pm(3,9-3,99)$ МГц навіть за наявності інших випромінювань у безпосередній близькості.

Далі частотний інтервал поступово звужується до досягнення з границь, за межами кожної з яких залишається 0,5% загальної потужності спектра.

Проте безпосередньо даний алгоритм не можна використовувати для визначення рівня X дБ, який відповідає ЗШСЧ. По-перше рівні на схилах спектра, які відповідають 0,5% потужності є різними. По-друге у випадку нахилу "полиці" спектра значення рівня з одного боку може вийти, за межі схилу на "полицю", що ускладнює вимірювання. Результати на основі даних вимірювання за допомогою платформи HackRF ($SPAN=10$ МГц, кількість точок 32768) One для місць розміщення приймальної антени на рис. 3.3 та без згладжування поміщені в табл.3.4 [93]. Досить значні значення рівнів спектра на границях смуги пояснюються використанням не згладжених спектрів та максимумів спектра як рівня, що прийнятий за опорний.

Таблиця 3.4

Результати визначення ЗШСЧ та відповідних рівнів спектра в місцях навколо телевежі м. Києва за допомогою платформи HackRF без згладжування

№	Частота, МГц	ЗШСЧ, МГц	Рівень спектра на лівому схилі, дБ	Рівень спектра на правому схилі, дБ
1	2	3	4	5
Для точки № 13 на рис.3.3				
1	514	7,521	-11,81	-11,55
2	538	7,485	-13,07	-11,52
3	554	7,402	-7,22	-12,58
4	634	7,516	-10,91	-10,81
5	698	7,492	-11,35	-11,24
6	818	7,436	-10,86	-8,47
	Середні значення	7,475	-10,87	-11,03
Для точки № 2 на рис.3.3				
7	514	7,501	-12,94	-12,09
8	538	7,408	-9,16	-12,73
9	554	7,419	-5,45	-10,07
10	634	7,475	-9,52	-10,52
11	698	7,516	-7,70	-8,22
12	818	7,525	-12,18	-11,89
	Середні значення	7,474	-10,87	-11,03
Для точки № 6 на рис.3.3				
13	514	7,510	-10,46	-9,84
14	538	7,497	-9,59	-11,68
15	554	7,394	-5,79	-11,31

Продовження табл. 3.4

1	2	3	4	5
16	634	7,513	-11,18	-11,04
17	650	7,519	-9,38	-9,09
18	698	7,507	-11,55	-13,45
19	818	7,534	-13,96	-12,78
	Середні значення	7,497	-10,27	-11,31
Для точки № 5 на рис.3.3				
20	514	7,513	-8,46	-8,64
21	538	7,484	-9,97	-9,84
22	554	7,390	-6,44	-10,54
23	634	7,488	-11,57	-12,20
24	650	7,541	-8,79	-7,62
25	698	7,455	-9,23	-11,66
26	818	7,532	-11,28	-11,53
	Середні значення	7,486	-9,39	-10,29
Для точки № 11 на рис.3.3				
27	514	7,541	-6,76	-10,14
28	538	7,502	-11,17	-10,49
29	634	7,503	-10,24	-10,90
30	650	7,450	-6,14	-7,04
31	698	7,516	-9,43	-11,00
32	818	7,521	-12,38	-11,88
	Середні значення	7,506	-9,35	-10,24
Для точки № 8 на рис.3.3				
33	514	7,456	-11,74	-8,11
34	538	7,444	-9,32	-8,52
35	554	7,419	-9,77	-14,31
36	634	7,497	-8,68	-8,46
37	650	7,538	-10,30	-10,81
38	698	7,523	-10,73	-10,52
39	818	7,535	-10,65	-10,89
	Середні значення	7,487	-10,17	-10,23

Як показано вище, отриманий спектр доцільно згладжувати. Для даного випадку кращі результати можна отримати із застосуванням фільтра Савицького-Голея із ступенем полінома 4 та кількістю точок 201. Розрахунки показали, що для спектрів з табл. 3.4 значення граничних рівнів у колонках 4 і 5

зменшуються до одиниць δB , а в окремих випадках до десятих δB . Обробка даних вимірювань аналізатором спектра R&S SMJ Vector Signal Generator з $RBW=10$ кГц та $RBW=3$ кГц дає аналогічні результати. При цьому точність проведення контролю параметрів радіовипромінювання за рівнем X δB зменшується з причини низької крутизни спектра в таких точках.

3.4. Доопрацювання методу X δB для вимірювання ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення

Запропоновано визначати ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення за допомогою модифікованого методу X δB , який полягає в наступному:

- для підвищення точності вимірювань знаходять ширину смуги частот спектра на рівні -10 δB від рівня, прийнятого за опорний;
- ЗШСЧ дорівнює різниці ширини смуги частот спектра на рівні -10 δB та поправки, яка залежить від режиму роботи апаратури і знаходиться в результаті статистичної обробки результатів вимірювань.

Дані для визначення поправки, а також інша необхідна інформація зосереджена в табл. 3.5, в якій використовуються результати вимірювань у тих же місцях, що й в табл. 3.4, але із застосуванням згладжування фільтром Савицького-Голея із ступенем полінома 4 та кількістю точок 201.

Таблиця 3.5

Результати визначення ЗШСЧ, ширини спектра на рівні -10 δB та поправки для знаходження ЗШСЧ для згладженого спектра (32768 точок)

№	Частота, МГц	ЗШСЧ, МГц	Ширина спектра на рівні -10 δB , МГц	Поправка, кГц
1	2	3	4	5
Для точки № 13 на рис.3.3				
1	514	7,521	7,601	80
2	538	7,488	7,594	106
3	554	7,401	7,474	73
4	634	7,512	7,608	96
5	698	7,494	7,599	105
6	818	7,439	7,589	150
	Середні значення	7,475	7,577	102

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4	5
	Для точки № 2 на рис.3.3			
7	514	7,501	7,595	94
8	538	7,408	7,463	55
9	554	7,419	7,540	121
10	634	7,476	7,607	131
11	698	7,517	7,605	88
12	818	7,525	7,605	80
	Середні значення	7,474	7,569	95
	Для точки № 2 на рис.3.3 (туман)			
13	514	7,530	7,604	74
14	538	7,506	7,600	94
15	554	7,400	7,532	132
16	634	7,550	7,612	62
	Середні значення	7,497	7,587	90
	Для точки № 6 на рис.3.3			
17	514	7,510	7,600	90
18	538	7,497	7,601	104
19	554	7,394	7,531	137
20	634	7,513	7,608	95
21	698	7,507	7,594	87
22	818	7,535	7,602	67
	Середні значення	7,493	7,590	97
	Для точки № 5 на рис.3.3			
23	514	7,515	7,605	90
24	538	7,484	7,601	117
25	554	7,390	7,503	113
26	634	7,488	7,598	110
27	650	7,543	7,611	68
28	698	7,455	7,596	141
29	818	7,532	7,605	73
	Середні значення	7,487	7,589	102
	Для точки № 11 на рис.3.3			
30	514	7,541	7,606	65
31	538	7,502	7,599	97
32	634	7,504	7,604	100
33	650	7,450	7,597	144
34	698	7,517	7,599	82
35	818	7,521	7,602	81
	Середні значення	7,506	7,601	95

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4	5
Для точки № 8 на рис.3.3				
36	514	7,456	7,599	143
37	538	7,450	7,589	139
38	554	7,419	7,544	125
39	634	7,497	7,605	108
40	650	7,538	7,608	70
41	698	7,524	7,599	75
42	818	7,535	7,606	71
	Середні значення	7,488	7,592	104
	Середні значення за всією вибіркою	7,488	7,586	98

Дані табл. 3.5 отримані на основі усереднення багатьох вимірювань, що дає підставу висунути гіпотезу про нормальний закон розподілення. Перевірка відповідності розподілення поправки до визначення ЗШСЧ до нормального розподілення може бути проведена за стандартом РФ [85], який повністю повторює ISO 5479-97. Аргументація щодо застосування критеріїв оцінки наведена в роботі [86] та інших роботах вказаних авторів. Перевага за малих обсягів вибірок ($8 \leq n \leq 50$) надається критерію Шапіро-Уїлка.

Підставою для використання критерію Шапіро-Уїлка є задоволення обмежень на емпіричну кривизну

$$b_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} < 3$$

та емпіричну асиметрію

$$\sqrt{b_1} = \frac{\mu_3}{\sigma^3} < 0,5$$

сукупності. Тут μ_2, μ_3, μ_4 - відповідно другий, третій та четвертий нормовані центральні моменти, σ - середньо квадратичне відхилення (СКВ).

Обчислення даних параметрів дало значення кривизни $b_2 = 2,072$ та асиметрії $\sqrt{b_1} = 0,392$. Тобто будемо використовувати критерій Шапіро-Уїлка для визначення відхилення вибірки поправок до визначення ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення від нормального закону розподілення.

Згідно до критерію Шапіро-Уїлка спочатку для вибірки поправок X з $n=42$ членів розраховується сума

$$S = \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}} a_k [X_{(n+1-k)} - X_k], \quad (3.2)$$

а потім статистика W критерію Шапіро-Уїлка

$$W = \frac{S^2}{n\mu_2}, \quad (3.3)$$

де: a_k - коефіцієнт критерію Шапіро-Уїлка, значення якого залежить від кількості елементів n у сукупності.

Значення статистики W порівнюється із значенням p -квантилі стандартного нормального розподілення, яке залежить від рівня значимості α :

для $\alpha = 0,01$ значення квантилі $u_p = 0,922$;

для $\alpha = 0,05$ значення квантилі $u_p = 0,942$.

Розрахунки за даними поправок в колонці 5 табл. 3.5 принесли наступні результати:

- математичне очікування $\bar{X} = 98,4$ кГц;
- СКВ = 25,786 кГц;
- статистика $W = 0,9417$.

Таким чином, результати вимірювання поправки для знаходження ЗШСЧ в місцях навколо телевежі м. Києва за допомогою SDR платформи HackRF One із згладжуванням підпорядковуються нормальному закону розподілення із рівнем значимості $\alpha = 0,05$ [94]. Проводити оцінки для рівня значимості $\alpha = 0,01$ не можна оскільки значення статистики знаходиться поза межами критичної області.

Статистичні характеристики за вибірковими даними у випадку нормального розподілення розраховуються, наприклад, за [87]. У даному випадку довірна ймовірність $1 - \alpha = 0,95$.

Квантиль стандартного нормального закону розподілення рівня $1 - \alpha$

$$u_{1-\alpha} = 1,645.$$

Квантиль стандартного нормального закону розподілення рівня $1 - \alpha/2$

$$u_{1-\alpha/2} = 1,96.$$

Обчислюємо коефіцієнти

$$K_1 = \frac{u_{1-\alpha}}{\sqrt{n}} = 0,254$$

та

$$K_2 = \frac{u_{1-\alpha/2}}{\sqrt{n}} = 0,302.$$

Двосторонній симетричний довірчий інтервал для точкової оцінки математичного сподівання

$$\bar{X} - K_2\sigma \leq \bar{X} \leq \bar{X} + K_2\sigma;$$

$$\bar{X} - 7,79 \leq \bar{X} \leq \bar{X} + 7,79 .$$

Односторонні довірчі інтервали

$$\bar{X} \leq \bar{X} + K_1\sigma = \bar{X} + 6,55 ;$$

$$\bar{X} \geq \bar{X} - K_1\sigma = \bar{X} - 6,55 .$$

Двосторонній симетричний довірчий інтервал складає 0,1% від оцінки математичного сподівання ЗШСЧ.

Результати на основі даних вимірювання (рис. 3.12 - рис. 3.15) за допомогою аналізатора спектра Rohde&Schwarz U3772 Advantest ($SPAN=10$ МГц, $RBW=3$ кГц) без згладжування поміщені в табл.3.6.

Таблиця 3.6

Результати визначення ЗШСЧ та відповідних рівнів спектра в місцях навколо телевежі м. Києва за допомогою аналізатора спектра R&S за $RBW=3$ кГц без згладжування

№	Частота, МГц	ЗШСЧ, МГц	Ширина спектра на рівні -10 дБ, МГц	Ширина спектра на рівні -20 дБ, МГц
1	2	3	4	5
1	514	7,450	7,569	7,643
2	538	7,490	7,610	7,630
3	554	7,448	7,588	7,683
4	634	7,549	7,614	7,666
5	650	7,505	7,613	7,659
6	698	7,517	7,609	7,639
7	818	7,509	7,607	7,632

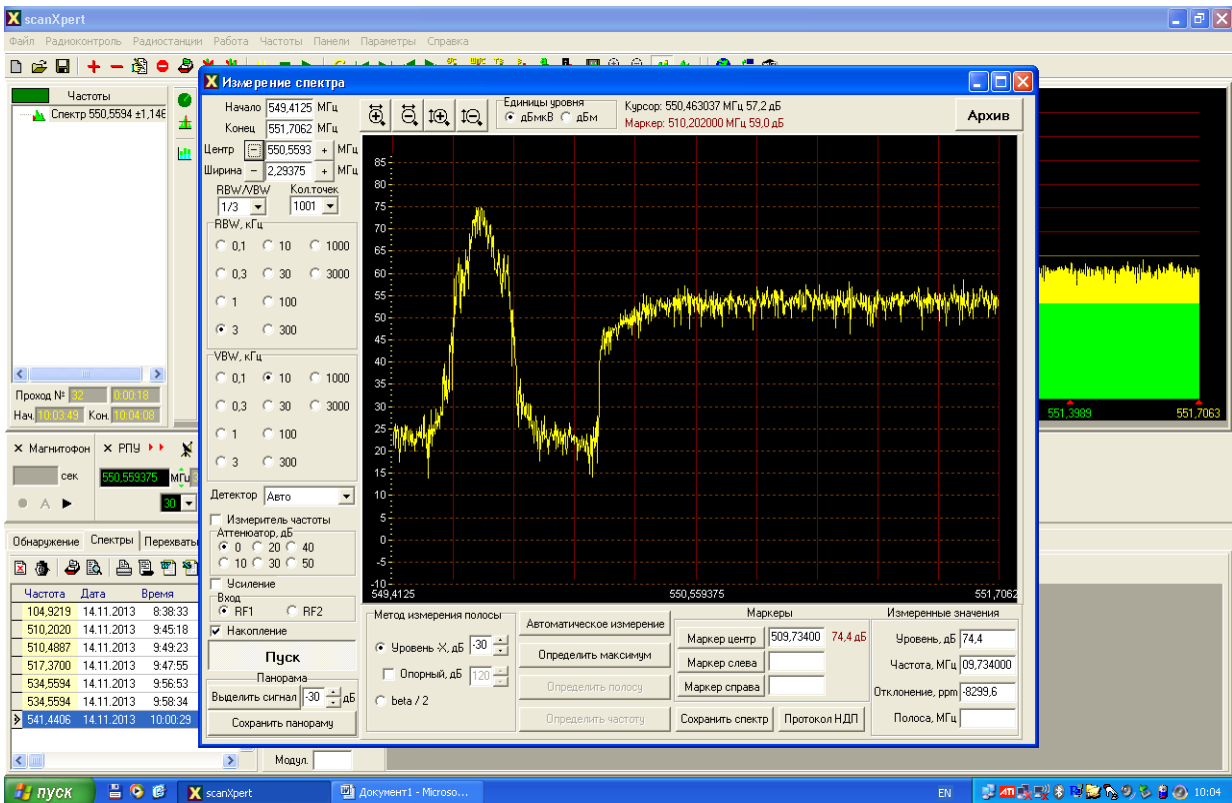


Рис. 3.12. Фрагмент спектра випромінювання цифрового телебачення із середньою частотою 554 МГц при вимірюванні аналізатором спектра з $RBW=3$ кГц.

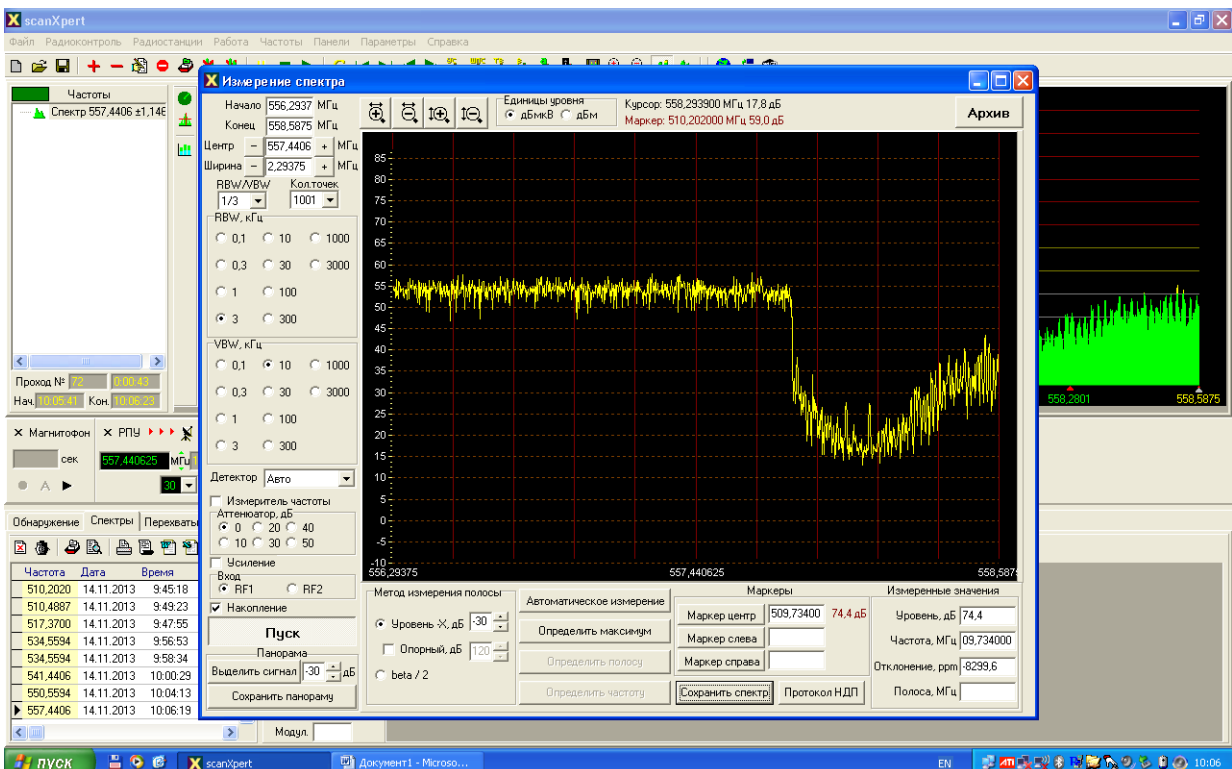


Рис. 3.13. Фрагмент спектра із середньою частотою 554 МГц при вимірюванні аналізатором спектра з $RBW=3$ кГц.

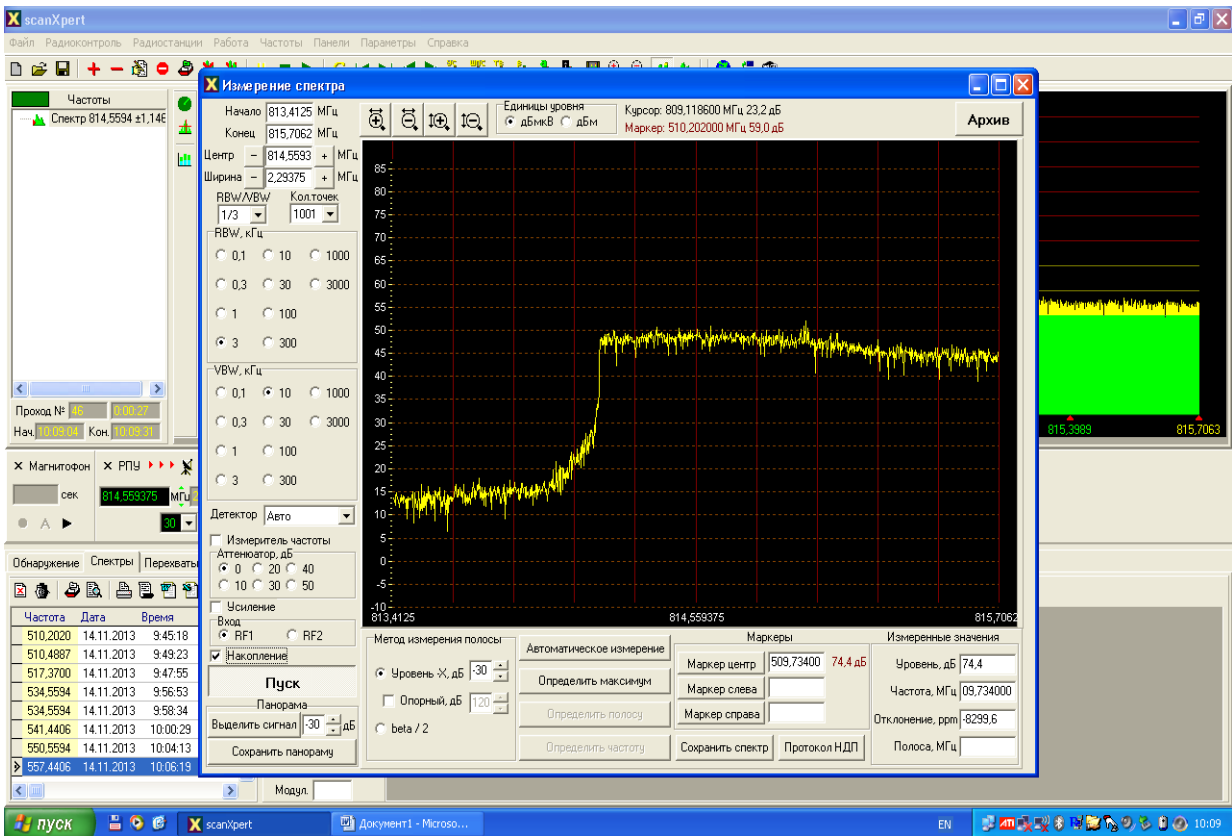


Рис. 3.14. Фрагмент спектра із середньою частотою 818 МГц при вимірюванні аналізатором спектра з $RBW=3$ кГц.

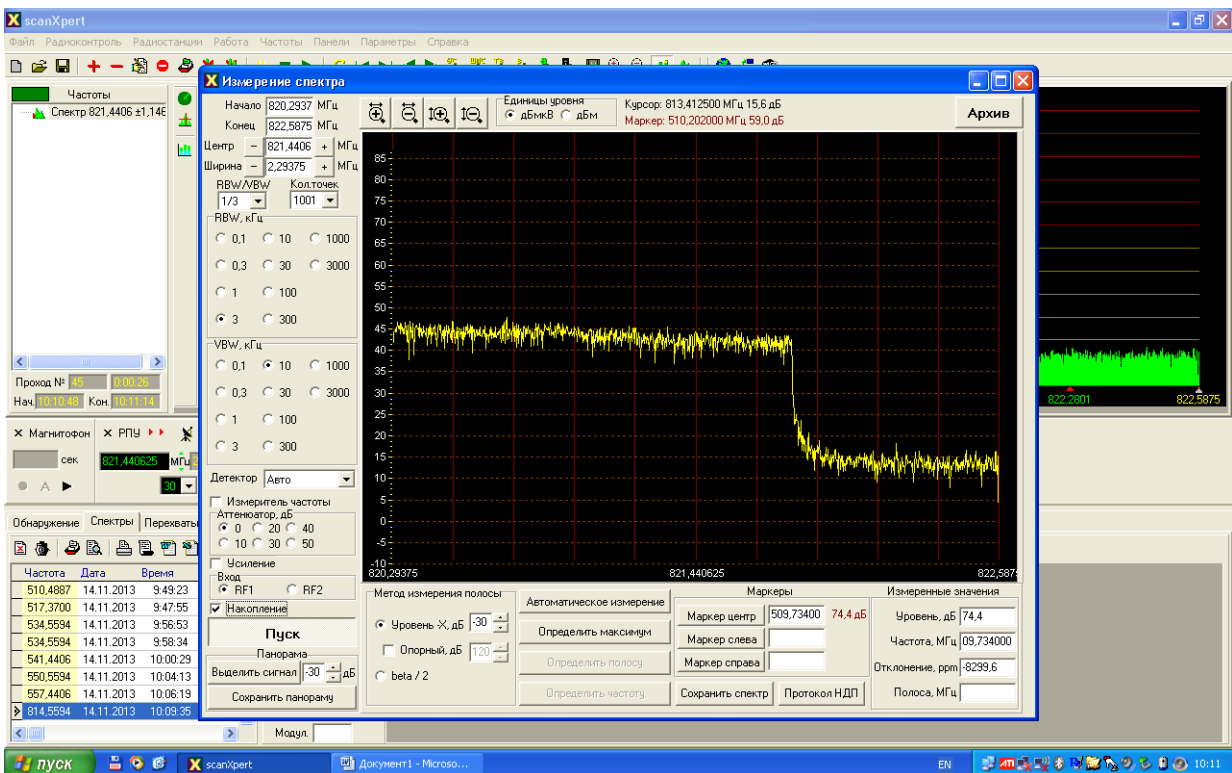


Рис. 3.15. Фрагмент спектра із середньою частотою 818 МГц при вимірюванні аналізатором спектра з $RBW=3$ кГц.

Як видно з наведених на рис. 3.12 - рис. 3.15 за $RBW=3$ кГц зашумленість спектра є меншою. Тому простіше визначити рівень, який приймається за опорний. Це може бути результатом обробки даних у станції радіомоніторингу.

Результати згладжування даних вимірювання за допомогою аналізатора спектра Rohde&Schwarz U3772 Advantest ($SPAN=10$ МГц, $RBW=3$ кГц) поміщені в табл. 3.7. До табл. 3.7 не включені результати згладжування на основі алгоритмів LOWESS і LOESS, а також робастних алгоритмів LOWESS і LOESS з причини їх низької ефективності для випадку, що розглядається.

Таблиця 3.7

Результати згладжування спектрів на основі даних вимірювання аналізатором спектра R&Sc U3772 Advantest ($SPAN=10$ МГц, $RBW=3$ кГц)

№	Частота, МГц	Алгоритм згладжування	Кількість точок у рухомій послідовності	ЗШСЧ, МГц	Ширина смуги на рівні -10 дБ, МГц	Ширина смуги на рівні -20 дБ, МГц
1	2	3	4	5	6	7
1	514	Рухомого усереднення	5	7,478	7,588	7,624
			11	7,450	7,569	7,643
			21	7,395	7,524	7,661
		Фільтр Савицького-Голя (ФСГ). Ступінь полінома - 2	5	7,496	7,597	7,615
			11	7,494	7,594	7,615
			21	7,468	7,569	7,643
		ФСГ. Ступінь полінома - 3	5	7,496	7,597	7,615
			11	7,487	7,588	7,624
			21	7,468	7,569	7,643
			41	7,404	7,533	7,661
		ФСГ. Ступінь полінома - 4	5	7,496	7,588	7,615
			11	7,496	7,588	7,615
			21	7,487	7,588	7,624
			41	7,459	7,560	7,643

1	2	3	4	5	6	7		
	514	ФСГ. Ступінь полінома - 5	5	7,496	7,588	7,615		
			11	7,487	7,588	7,624		
			21	7,487	7,588	7,624		
			41	7,459	7,560	7,643		
2	538	Рухомого усереднення	5	7,489	7,610	7,621		
			11	7,479	7,605	7,628		
			21	7,470	7,596	7,639		
		ФСГ. Ступінь полінома - 2	5	7,490	7,610	7,619		
			11	7,486	7,610	7,621		
			21	7,490	7,610	7,619		
		ФСГ. Ступінь полінома - 3	5	7,490	7,610	7,619		
			11	7,486	7,610	7,621		
			21	7,483	7,605	7,628		
			41	7,483	7,598	7,637		
		ФСГ. Ступінь полінома - 4	5	7,490	7,610	7,630		
			11	7,490	7,610	7,616		
			21	7,486	7,607	7,623		
			41	7,486	7,605	7,630		
		ФСГ. Ступінь полінома - 5	5	7,490	7,610	7,630		
			11	7,490	7,610	7,616		
			21	7,486	7,607	7,623		
			41	7,486	7,605	7,630		
		3	544	Рухомого усереднення	5	7,441	7,588	7,619
					11	7,437	7,574	7,624
21	7,437				7,572	7,631		
ФСГ. Ступінь полінома - 2	5			7,443	7,588	7,635		
	11			7,443	7,591	7,619		
	21			7,443	7,582	7,624		
ФСГ. Ступінь полінома - 3	5			7,443	7,573	7,635		
	11			7,443	7,576	7,619		
	21			7,443	7,584	7,624		
	41			7,439	7,574	7,631		

1	2	3	4	5	6	7
		ФСГ.	5	7,448	7,588	7,693
		Ступінь	11	7,443	7,593	7,635
		полінома - 4	21	7,443	7,591	7,619
			41	7,439	7,584	7,626
4	634	Рухомого усереднення	5	7,544	7,614	7,652
			11	7,540	7,618	7,657
			21	7,524	7,618	7,661
		ФСГ.	5	7,549	7,614	7,654
		Ступінь	11	7,544	7,614	7,654
		полінома - 2	21	7,544	7,618	7,648
		ФСГ.	5	7,549	7,614	7,654
		Ступінь	11	7,544	7,614	7,654
		полінома - 3	21	7,544	7,618	7,648
			41	7,537	7,618	7,661
		ФСГ.	5	7,549	7,614	7,666
		Ступінь	11	7,548	7,614	7,657
		полінома - 4	21	7,544	7,616	7,654
			41	7,544	7,618	7,652
5	650	Рухомого усереднення	5	7,501	7,615	7,654
			11	7,494	7,613	7,650
			21	7,482	7,611	7,657
		ФСГ.	5	7,505	7,613	7,659
		Ступінь	11	7,501	7,613	7,655
		полінома - 2	21	7,498	7,615	7,650
		ФСГ.	5	7,505	7,613	7,659
		Ступінь	11	7,501	7,613	7,650
		полінома - 3	21	7,498	7,615	7,650
			41	7,494	7,613	7,657
		ФСГ.	5	7,505	7,613	7,659
		Ступінь	11	7,501	7,613	7,657
		полінома - 4	21	7,501	7,615	7,652
			41	7,498	7,613	7,647

1	2	3	4	5	6	7		
6	698	Рухомого усереднення	5	7,513	7,609	7,639		
			11	7,504	7,607	7,635		
			21	7,486	7,593	7,639		
		ФСГ. Ступінь полінома - 2	5	7,511	7,607	7,639		
			11	7,506	7,607	7,632		
			21	7,504	7,605	7,630		
		ФСГ. Ступінь полінома - 3	5	7,511	7,607	7,639		
			11	7,506	7,607	7,633		
			21	7,504	7,605	7,630		
			41	7,495	7,598	7,637		
		ФСГ. Ступінь полінома - 4	5	7,513	7,609	7,639		
			11	7,509	7,607	7,637		
			21	7,509	7,607	7,623		
			41	7,502	7,600	7,632		
		7	818	Рухомого усереднення	5	7.502	7,607	7,632
					11	7.497	7,605	7,637
21	7.486				7,598	7,641		
ФСГ. Ступінь полінома - 2	5			7.506	7,607	7,628		
	11			7.506	7,607	7,630		
	21			7.502	7,605	7,632		
ФСГ. Ступінь полінома - 3	5			7.506	7,605	7,632		
	11			7.506	7,605	7,630		
	21			7.502	7,605	7,632		
	41			7.495	7,598	7,641		
ФСГ. Ступінь полінома - 4	5			7.509	7,607	7,632		
	11			7.506	7,607	7,628		
	21			7.506	7,607	7,628		
	41			7.502	7,605	7,635		

Головним критерієм, за яким обираються алгоритм згладжування та кількість точок у рухомій послідовності для даних налаштувань аналізатора спектра, є близькість отриманих результатів до значень ЗШСЧ з табл. 3.6.

Аналіз даних з табл. 3.7 свідчить про наступне:

- кращі результати для даних, отриманих при $SPAN=10$ МГц, $RBW=3$ кГц, дає застосування 5 точок у рухомій послідовності, що свідчить про попереднє згладжування в станції радіоконтролю;
- використання фільтру Савицького-Голея із ступенем полінома 3-4 у порівнянні з іншими алгоритмами згладжування має переваги у близькості оцінок ЗШСЧ до відповідних оцінок не згладженого спектра;
- дані таблиці свідчать про правильність обрання рівня - 10 дБ для вимірювання ЗШСЧ, оскільки дане значення відповідає найбільшій крутизні схилів спектра і характеризується меншими помилками при згладжуванні, наприклад, у порівнянні з рівнем - 20 дБ.

Дані для визначення поправки включені до табл. 3.8, в якій використовуються результати вимірювань із застосуванням згладжування фільтром Савицького-Голея із ступенем полінома 4 та кількістю точок 5 в рухомій послідовності.

Таблиця 3.8

Результати визначення ЗШСЧ, ширини спектра на рівні -10 дБ та поправки для знаходження ЗШСЧ в місцях навколо телевежі м. Києва за допомогою аналізатора спектра ($SPAN=10$ МГц, $RBW=3$ кГц)

№	Частота, МГц	ЗШСЧ, МГц	Ширина спектра на рівні -10 дБ, МГц	Поправка, кГц
1	2	3	4	5
1	514	7,496	7,588	92
2	538	7,490	7,610	120
3	554	7,448	7,588	140
4	634	7,549	7,614	65
5	650	7,505	7,613	108
6	698	7,513	7,609	96
7	818	7,509	7,607	98
	Середні значення	7,501	7,604	103

Статистична обробка даних табл. 3.8 не дає достовірних результатів оскільки критерії Шапіро-Уїлка та Еппса-Паллі погано працюють за обсягом вибірки $n < 8$ [85]. Для поправки: $\bar{X} = 103$ кГц; $СКВ = 14,3$ кГц.

Проведена обробка результатів вимірювання SDR платформою HackRF One для числа точок 4096 у вибірці, що відповідає частотному розподіленню 2,441 кГц. Використовувалося згладжування фільтром Савицького-Голея із ступенем полінома 4 із кількістю точок 101 у рухомій послідовності. Результати поміщені в табл. 3.9.

Таблиця 3.9

Результати визначення ЗШСЧ, ширини спектра на рівні -10 дБ та поправки для знаходження ЗШСЧ за допомогою платформи HackRF One із згладжуванням (4096 точок)

№	Частота, МГц	ЗШСЧ, МГц	Ширина спектра на рівні -10 дБ, МГц	Поправка, кГц
1	2	3	4	5
Для точки № 13 на рис.3.3				
1	514	7,500	7,578	78
2	538	7,451	7,560	109
3	698	7,502	7,579	77
4	818	7,444	7,539	95
Для точки № 2 на рис.3.3				
5	514	7,441	7,496	55
6	538	7,466	7,571	105
7	818	7,507	7,585	78
Для точки № 2 на рис.3.3 (туман)				
8	514	7,522	7,596	74
9	538	7,488	7,583	95
10	698	7,534	7,605	71
11	818	7,463	7,536	73
Для точки № 6 на рис.3.3				
12	514	7,473	7,584	111
13	538	7,500	7,598	98
14	634	7,513	7,608	95
15	650	7,507	7,586	79
16	698	7,466	7,558	92
17	818	7,505	7,571	66

Продовження табл. 3.9

1	2	3	4	5
Для точки № 5 на рис.3.3				
18	514	7,514	7,611	97
19	538	7,488	7,593	105
20	634	7,466	7,571	105
21	650	7,524	7,610	86
22	698	7,481	7,573	92
23	818	7,502	7,578	76
Для точки № 11 на рис.3.3				
24	514	7,505	7,583	78
25	538	7,473	7,576	103
26	634	7,471	7,573	102
27	650	7,532	7,590	58
28	698	7,539	7,613	74
29	818	7,502	7,580	78
Для точки № 8 на рис.3.3				
30	514	7,441	7,556	115
31	634	7,493	7,597	104
32	650	7,505	7,578	73
33	698	7,461	7,564	103
34	818	7,498	7,576	78
	Середні значення за вибіркою	7,491	7,579	87,65

За даними табл. 3.9 $СКВ = 15,6$ кГц. Значення емпіричної асиметрії $\sqrt{b_1} = -0,13$ та емпіричної кривизни $b_2 = 2,0$ дозволяють використання критерія Шапіро-Уїлка. Статистика критерія Шапіро-Уїлка $W = 0,9419$ відповідає рівню значимості $\alpha = 0,05$.

Обчислюємо коефіцієнти

$$K_1 = \frac{u_{1-\alpha}}{\sqrt{n}} = 0,282$$

та

$$K_2 = \frac{u_{1-\alpha/2}}{\sqrt{n}} = 0,336.$$

Двосторонній симетричний довірчий інтервал для точкової оцінки математичного сподівання

$$\bar{X} - 5,24 \leq \bar{X} \leq \bar{X} + 5,24 .$$

Односторонні довірчі інтервали

$$\bar{X} \leq \bar{X} + K_1 \sigma = \bar{X} + 4,4$$

та

$$\bar{X} \geq \bar{X} - K_1 \sigma = \bar{X} - 4,4 .$$

Для визначення статистичних даних з шириною смуги $RBW=10$ кГц можна використати результати вимірювання аналізатором спектра Rohde&Schwarz U3772 Advantest фахівцями УДЦР для розв'язку завдання дослідження роботи. Проводилося згладжування фільтром Савицького-Голея із ступенем полінома 4 із кількістю точок 11 у рухомій послідовності. Результати поміщені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10

Результати визначення ЗШСЧ, ширини спектра на рівні -10 дБ та поправки для знаходження ЗШСЧ в місцях навколо телевежі м. Києва за допомогою аналізатора спектра ($SPAN=10$ МГц, $RBW=10$ кГц) із згладжуванням

№	Частота, МГц	ЗШСЧ, МГц	Ширина спектра на рівні -10 дБ, МГц	Поправка, кГц
1	2	3	4	5
1	514	7,470	7,608	138
2	538	7,480	7,582	102
3	554	7,410	7,568	158
4	634	7,570	7,660	90
5	650	7,550	7,678	128
6	698	7,551	7,685	134
7	714	7,471	7,635	164
8	818	7.501	7,643	142
	Середні значення	7,500	7,632	132

За даними табл. 3.9 $СКВ = 23,77$ кГц. Значення емпіричної асиметрії $\sqrt{b_1} = -0,46$ та емпіричної кривизни $b_2 = 2,13$ відповідають критерію Шапіро-

Уїлка. Статистика критерію Шапіро-Уїлка $W= 0,9396$ дозволяє використати рівень значимості $\alpha = 0,05$.

Коефіцієнти

$$K_1 = \frac{u_{1-\alpha}}{\sqrt{n}} = 0,582$$

та

$$K_2 = \frac{u_{1-\alpha/2}}{\sqrt{n}} = 0,693.$$

Двосторонній симетричний довірчий інтервал для точкової оцінки математичного сподівання

$$\bar{X} - 16,47 \leq \bar{X} \leq \bar{X} + 16,47 .$$

Односторонні довірчі інтервали

$$\bar{X} \leq \bar{X} + K_1 \sigma = \bar{X} + 13,83$$

та

$$\bar{X} \geq \bar{X} - K_1 \sigma = \bar{X} - 13,83 .$$

Аналіз статистичної обробки результатів вимірювання ЗШСЧ наведено в четвертому розділі.

2.5. Висновки

За результатами проведених у третьому розділі роботи досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Оскільки результати математичного моделювання з причин, що досліджені в розділі 2, не можуть в повній мірі задовольнити розв'язку завдання дослідження, займана ширина смуги частот радіовипромінювання цифрового телебачення визначалася за результатами експериментів. На прохання Національного авіаційного університету фахівці УДЦР провели ряд вимірювань, кількість і повнота яких є недостатньою для отримання надійних статистичних оцінок. Тому в якості альтернативи дорогій апаратурі, яка відсутня в університеті, досліджена можливість застосування SDR платформи HackRF One. Результати дослідження свідчать про відповідність точнісних характеристик платформи для вимірювання ЗШСЧ радіовипромінювання.

2. Для застосування методу X дБ потрібно коректно визначити опорний рівень спектра. У випадку зашумленого спектра крім невизначеності опорного

рівня можуть виникнути труднощі із знаходженням ширини смуги частот на певному рівні від опорного. Дослідження методів згладжування на прикладі спектрів радіовипромінювання дозволяють зробити висновок про переваги застосування фільтра Савицького-Голея із ступенем поліному 3-4. Кількість точок у рухомій послідовності обирається в залежності від зашумленості спектра.

3. Опорний рівень спектра обирається за середнім значенням "полиці" спектра або за його максимальним рівнем. Дослідження залежності опорного рівня, знайденого за середнім значенням, від кількості точок у рухомій послідовності свідчать про практичну незалежність результату від кількості точок. При застосуванні фільтра Савицького-Голея із ступенем полінома 4 опорний рівень слабо залежить від кількості точок у рухомій послідовності. Потрібно зазначити, що не всі спектри радіовипромінювання мають "полицю", для якої зручно знаходити середній рівень. Суттєвим фактором на користь визначення опорного рівня за максимальним значенням є простота алгоритму програмного знаходження рівня без втручання оператора.

4. З метою підвищення точності запропоновано визначати ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення за допомогою модифікованого методу X дБ, який полягає в наступному:

- знаходять ширину смуги частот спектра на рівні -10 дБ від рівня, прийнятого за опорний;

- ЗШСЧ дорівнює різниці ширини смуги частот спектра на рівні -10 дБ та значення поправки, яка залежить від обраного режиму роботи апаратури і знаходиться в результаті статистичної обробки результатів вимірювань.

5. Результати статистичної обробки експериментальних даних ширини смуги частот на рівні $X = -10$ дБ та ЗШСЧ, отриманих за допомогою аналізатора спектра Rohde&Schwarz U3772 Advantest та SDR платформи HackRF One, свідчать, що поправка підпорядковуються нормальному закону розподілення із рівнем значимості $\alpha = 0,05$ для налаштувань аналізатора спектра $SPAN=10$ МГц, $RBW=10$ кГц, $RBW=3$ кГц, $RBW=0,3$ кГц.

РОЗДІЛ 4

**РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИМІРЮВАННЯ ЗАЙМАНОЇ ШИРИНИ
СМУГИ ЧАСТОТ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЦИФРОВОГО
ТЕЛЕБАЧЕННЯ СТАНДАРТІВ DVB-T, DVB-T2 ЗА X-дБ МЕТОДОМ**

4.1. Аналіз результатів статистичної обробки експериментальних даних

Основні результати обробки експериментальних даних зведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Середні значення ЗШСЧ радіовипромінювання та поправок до її
визначення за експериментальними даними

№	Засіб ви- мірювання	Роздільна здатність, кГц	Середнє значення ЗШСЧ, МГц	Середнє значення поправки, кГц	Довірчий інтервал, кГц
1	R&S U3772	10	7,500	132	16,5
2	R&S U3772	3	7,501	103	-
3	Hack RF One	2,44	7,491	88	5,2
4	Hack RF One	0,3	7,488	98	7,8

До двох перших рядків табл. 4.1 включені оцінки на основі даних вимірювання аналізатором спектра. Для отримання результатів вимірювання у вигляді електронної таблиці на прохання університету розробником мобільного комплексу радіомоніторингу було доопрацьовано програмне забезпечення. Обсягу вибірки за $RBW=3$ кГц було недостатньо для визначення закону розподілення. Тому були проведені вимірювання у різних місцях та у різний час навколо телевежі в м. Києві за допомогою SDR платформи HackRF One та отримані спектри радіовипромінювання з 4096 точками, що при загальній частотній смузі в 10 МГц дає роздільну здатність 2,44 МГц, яка наближена до $RBW=3$ кГц.

Отримано підтвердження нормального закону розподілення похибки до визначення ЗШСЧ із рівнем значимості $\alpha = 0,05$ та довірчим інтервалом 5,2 кГц. Відносна різниця середніх значень ЗШСЧ за даними аналізатора спектра і SDR платформи HackRF One (рядки 2 і 3 табл. 4.1) становить 0,13 %. Значення поправок відрізняються на 15,3 кГц, що також не є суттєвим для вимірювання займаної ширини смуги частот радіовипромінювання цифрового телебачення. Дані результати є ще одним підтвердженням можливості використання SDR платформи HackRF One у якості вимірювального засобу.

Оскільки аналізатор спектра Rohde&Schwarz U3772 Advantest є повіреним засобом, а вимірювання проводилися спеціально для розв'язку завдання дослідження висококваліфікованими фахівцями, за середнє значення ЗШСЧ при $RBW=3$ кГц приймемо 7,501 МГц, а за середнє значення поправки - 103 кГц.

За більш високої роздільної здатності є тільки результати обробки даних SDR платформи HackRF One (рядок 4 табл. 4.1).

На рис. 4.1 представлена залежність поправки до визначення ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення від ширини смуги частот за проміжною частотою аналізатора спектра.

Користуючись графіком на рис. 4.1 можна визначити поправку до ширини частотної смуги на рівні -10 дБ від опорного рівня спектра радіовипромінювання цифрового телебачення для будь якого значення ширини частотної смуги аналізатора спектра за проміжною частотою RBW .

Відносні значення поправки до середніх значень ЗШСЧ наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Рівень поправки у порівнянні з середнім значенням ЗШСЧ
радіовипромінювання

Ширина частотної смуги RBW , кГц	0,3	3	10
Відносний рівень поправки до ЗШСЧ, %	1,31	1,37	1,76

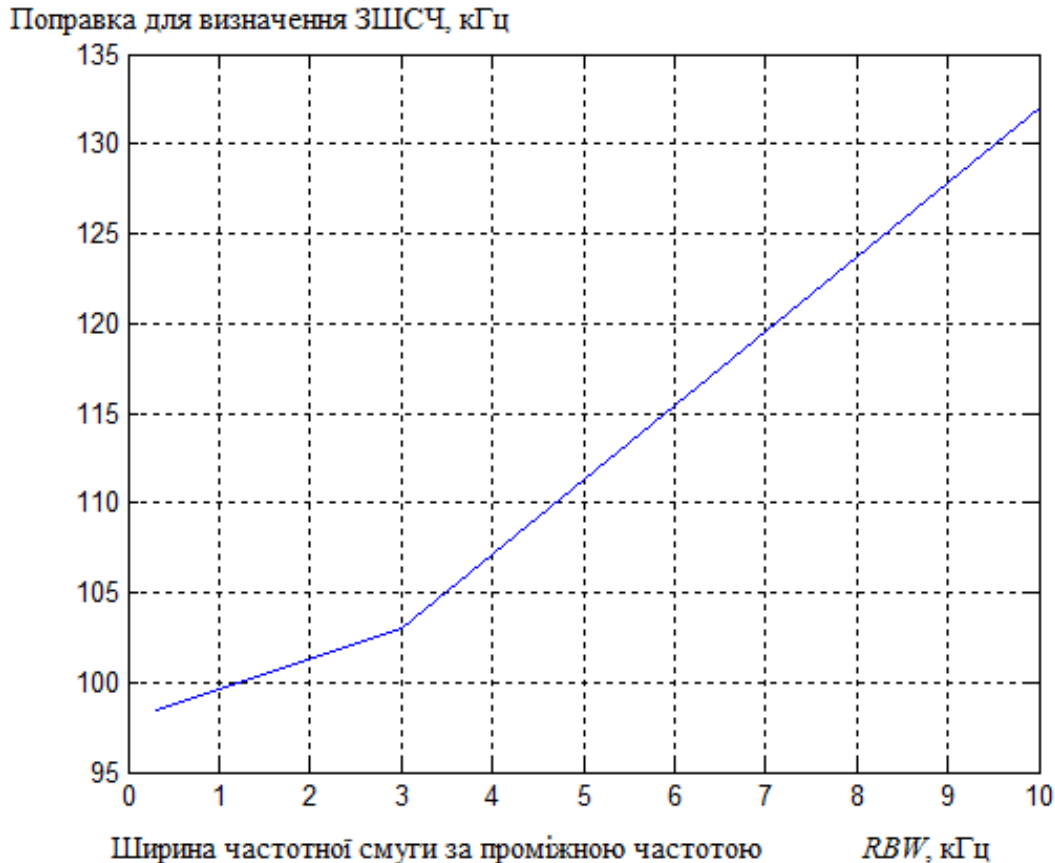


Рис. 4.1. Залежність поправки до ширини частотної смуги на рівні -10 дБ від опорного рівня спектра радіовипромінювання цифрового телебачення від ширини смуги частот за проміжною частотою аналізатора спектра.

Найбільший відносний рівень поправки $1,76\%$ спостерігається для значення $RBW=10$ кГц, що дуже часто використовується на практиці. Тобто використання поправки до ширини частотної смуги на рівні -10 дБ від опорного рівня спектра радіовипромінювання цифрового телебачення дозволяє проводити вимірювання за методом X дБ на ділянках спектра з найбільшою крутизною та отримати оцінку ЗШСЧ з достатньою для практики точністю (найбільше значення довірчого інтервалу складає $16,5$ кГц).

Для практичного впровадження поправки потрібно отримати апроксимуючий вираз. Наближення залежності на рис. 4.1 поліномом третього ступеня в діапазоні ширини частотної смуги за проміжною частотою від $0,3$ кГц до 10 кГц характеризується максимальною похибкою $0,75$ кГц навколо точки з

$RBW=3$ кГц та значно меншими значеннями похибки на інших ділянках можливих значень RBW (рис. 4.2).

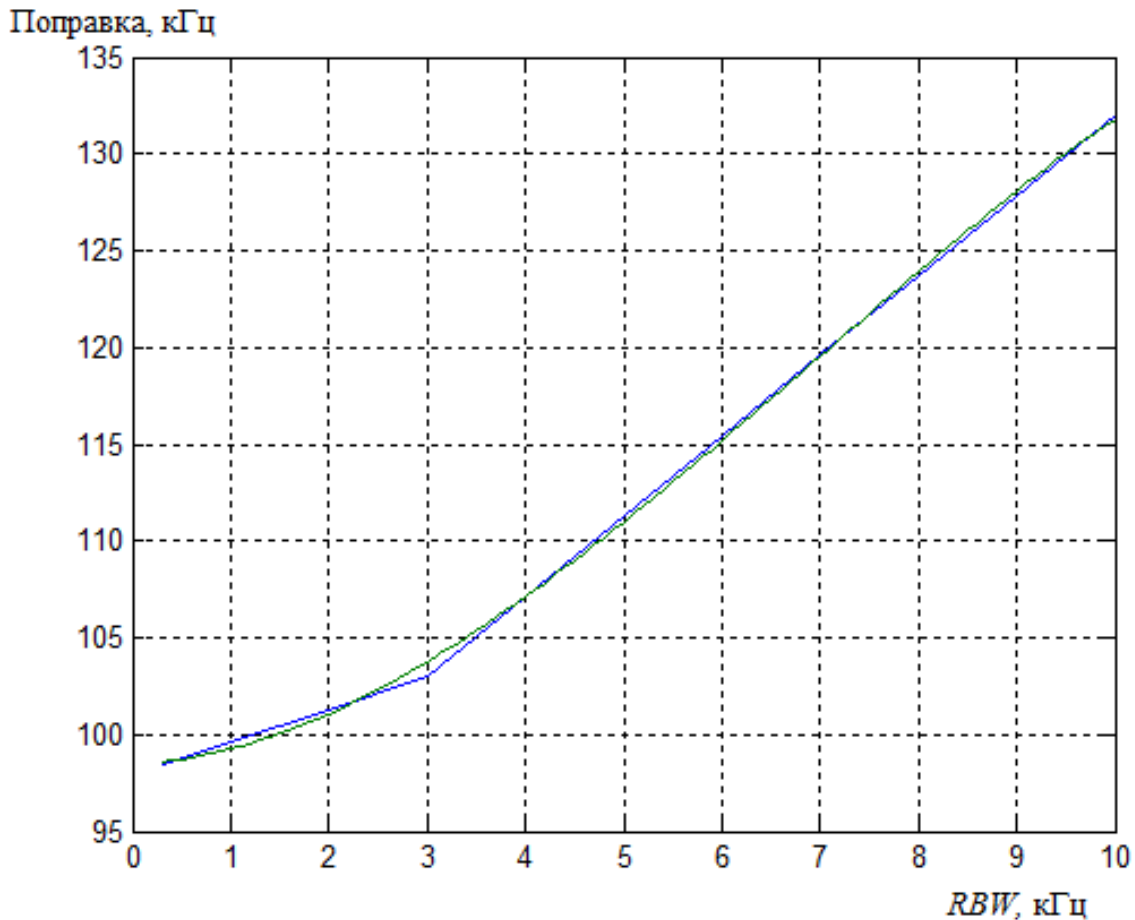


Рис. 4.2. Апроксимація поправки до ширини частотної смуги на рівні -10 дБ від опорного рівня спектра радіовипромінювання цифрового телебачення поліномом третього ступеня.

За методикою [33] при інструментальному оцінюванні ЗШСЧ значення RBW обирається в діапазоні 3%-5% від необхідної ширини смуги частот радіовипромінювання. За ETSI EN300744 [53] необхідна ширина смуги частот слабо залежить від кількості несучих та приблизно дорівнює 7,6 МГц. Тоді рекомендований діапазон ширини смуги за проміжною частотою $RBW=0,228$ МГц - $0,38$ МГц. Щодо широкосмугових сигналів, до яких належить телевізійне мовлення, і за П-подібної форми спектра за таких значень RBW схили спектра будуть пропущені, що знижує точність оцінювання. Отриманий спектр буде далекий від справжнього. Метод X дБ застосовувати не можна.

Тому з урахуванням ширини схилів спектра радіовипромінювання цифрового телебачення, на нашу думку, доцільно обирати ширину смуги частот за проміжною частотою в діапазоні $RBW=3$ кГц - 10 кГц.

Апроксимуючий поліном для поправки Δf має вигляд:

$$\Delta f = -0,0293 \cdot RBW^3 + 0,6065 \cdot RBW^2 + 0,2034 \cdot RBW + 98,4698 \quad (4.1)$$

при $RBW = [0,3 - 10]$ кГц.

4.2. Рекомендації щодо внесення змін до методики інструментального оцінювання ЗШСЧ

Чинна методика інструментального оцінювання (вимірювання) ЗШСЧ радіовипромінювання [33] призначена в тому числі для контролю параметрів телевізійного мовлення. В ній зазначено перелік дій щодо вимірювання ЗШСЧ за допомогою мобільних та стаціонарних станцій радіомоніторингу з визначеним програмним забезпеченням автоматизованого робочого місця.

Всі станції крім UMS100 з програмним забезпеченням "ARGUS-UMS" та РМ-2500Р дозволяють оцінювати ЗШСЧ у автоматизованому режимі, за яким оператору не потрібно визначати максимальний рівень спектра шляхом встановлення маркера.

Для частини засобів у методиці немає інформації щодо методу вимірювання ЗШСЧ, а для стаціонарної станції радіоконтролю FMS1-UA, мобільних станцій MMS1-UA, РМ-1300М-2РЗ виокремлюється перелік дій за методом $X \text{ дБ}$.

Для всіх станцій радіоконтролю потрібно задавати ширину смуги частот за проміжною частотою, а для UMS100, АИК-С, РМ-2500Р, FMS1-UA необхідно встановлювати поріг відсікання шумів. Рівень шумів також нормується для MMS1-UA (-35 дБ від опорного рівня спектра) та для РМ-1300М-2РЗ (-30 дБ від опорного рівня спектра). Це пояснюється вимогами до вимірювання контрольної ширини смуги частот випромінювання (КШСЧ), яка знаходиться на рівні - 30 дБ від опорного рівня спектра. Крім того різниця між

рівнем шумів та рівнем, на якому вимірюється КШСЧ, повинна бути не менше 5 дБ.

Дані вимоги реально обмежують як можливість вимірювання КШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення, так і застосування самого методу X дБ, тому що вимірювання, які проводилися фахівцями УДЦР і НАУ, показали можливість досягнення рівня сигналу 30 дБ тільки на відстанях до 2 км від телевежі та ще і не у всіх точках.

Практичне застосування запропонованого методу оцінювання ЗШСЧ [95], за яким вимірюється ширина смуги частот на рівні -10 дБ від опорного рівня спектра та застосовується поправка, яка залежить від вибору ширини смуги частот за проміжною частотою, дозволяє проводити радіоконтроль ЗШСЧ за рівня шумів значно більшим за -30 дБ. За аналогією з вимогами до оцінювання КШСЧ критичним рівнем може бути: $-10 \text{ дБ} -5 \text{ дБ} = -15 \text{ дБ}$, що наближено відповідає відстані від телевежі 10 км. Антени стаціонарних станцій радіоконтролю встановлюють на дахах висотних будівель з метою створення сприятливих умов приймання та і відстані є меншими. Тому можна прогнозувати рівень сигналу вище 20 дБ, що дозволяє отримати надійні оцінки даного параметру. При цьому не потрібно шукати точки приймання, що відповідають вимозі -30 дБ при застосуванні $\beta/2$ -методу.

З метою впровадження запропонованого методу оцінювання ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення потрібно внести окремі зміни до програмного забезпечення станцій радіоконтролю та методики інструментального оцінювання, серед них нищевказані.

1). Включити до меню програмного забезпечення засобів вікно, позначка в якому означає контроль параметрів радіовипромінювання цифрового телебачення. Після активації даного вікна передбачити блокування вікон: встановлення маркерів на максимальну складову спектра для станції UMS100 з програмним забезпеченням "ARGUS-UMS" та станції РМ-2500Р; порогу відсікання шумів для станції UMS100 під управлінням РС-157Р, АИК-С під

управлінням PC-157P, FMS1-UA; обмеження на необхідний рівень сигналу для станцій MMS1-UA, 1300M-2P3.

2). Для всіх станцій радіоконтролю встановити обмеження на мінімально необхідний рівень сигналу в 15 дБ (перевищення максимального рівня згладженого спектра над рівнем шумів).

3). Програмно обмежити діапазон значень ширини смуги частот за проміжною частотою, що задаються оператором в межах від 0,3 кГц до 10 кГц. В розділі методики щодо проведення інструментального оцінювання ЗШСЧ включити рекомендацію щодо вибору ширини смуги частот за проміжною частотою в межах від 0,3 кГц до 10 кГц.

4). При активації вікна щодо оцінювання ЗШСЧ цифрового телебачення програмно забезпечити вимірювання ширини смуги частот спектра на рівні $ШСЧ_{-10} = -10$ дБ від максимального значення згладженого спектра радіовипромінювання.

5). Оцінка ЗШСЧ радіовипромінювання визначається за формулою

$$ЗШСЧ = ШСЧ_{-10} - \Delta f,$$

де Δf – поправка, що знаходиться

$$\Delta f = -0,0144 \cdot RBW^3 + 0,2961 \cdot RBW^2 + 2,2271 \cdot RBW + 94,3985 ;$$

RBW - ширина смуги частот за проміжною частотою, кГц.

6). Передбачається, що програмне забезпечення станцій радіоконтролю містить засоби згладжування спектра, отриманого на основі експериментальних даних.

Повний перелік змін у програмному забезпеченні станцій радіоконтролю можна визначити на основі аналізу конкретних алгоритмів та програм, які є конфіденційними.

4.3. Висновки

За результатами проведених у четвертому розділі роботи досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Оцінювання займаної ширини смуги частот радіовипромінювання цифрового телебачення за методом X дБ на рівні -10 дБ від максимального рівня згладженого спектра в точках з високою крутизною схилів, із довірчою імовірністю 0,95 характеризується похибкою від 1,67% до 1,76% в залежності від ширини смуги частот за проміжною частотою засобу вимірювання. Доцільно передбачити в програмному забезпеченні станцій радіоконтролю компенсацію даної похибки за допомогою поправки, значення якої обрунтовано в роботі.

2. Аналіз чинної методика інструментального оцінювання (вимірювання) ЗШСЧ радіовипромінювання свідчить про необхідність внесення до неї доповнень, пов'язаних з визначенням ЗШСЧ цифрового телебачення, в частині рекомендованого діапазону значень ширини смуги частот за проміжною частотою, що задаються оператором, та мінімально необхідного рівню сигналу.

3. Для практичного впровадження оцінювання займаної ширини смуги частот радіовипромінювання цифрового телебачення за модифікованим методом X дБ потрібно в обмеженому обсязі доопрацювати програмне забезпечення станцій радіоконтролю, а саме:

- передбачити режим вимірювання ЗШСЧ цифрового телебачення;
- змінити рівень спектра, на якому вимірюється ширина смуги частот, з -30 дБ або довільного значення на -10 дБ;
- включити обчислення поправки до ширини смуги частот спектра на рівні -10 дБ для отримання оцінки ЗШСЧ радіовипромінювання.

4. Основними перевагами оцінювання ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення за модифікованим методом X дБ у порівнянні з $\beta/2$ -методом є можливість проведення радіоконтролю на відстанях у 4-5 разів більших та в умовах дії завад із спектром близьким до границь необхідної ширини смуги частот.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених у дисертаційній роботі досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Аналіз нормативних джерел та проведені експериментальні дослідження виявили протиріччя між необхідністю забезпечення різниці між опорним рівнем спектра та рівнем шумів не менше 30 дБ під час контролю займаної ширини смуги частот радіовипромінювання та результатами вимірювань ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення в умовах мегаполісу, яким є м. Київ. Це призводить до пошуку місць радіоконтролю в межах 2 км від передавачів та використання мобільних станцій радіомоніторингу. Натомість існують передумови для спрощення процедури радіоконтролю у випадку застосування методу X дБ та проведення вимірювання на рівні, що відповідає ЗШСЧ радіовипромінювання за з $\beta/2$ -методом. Зазначимо, що рівень шумів спектра -20 дБ... -25 дБ від опорного рівня спостерігається в Києві на відстанях в декілька разів більших за 2 км.

2. Мережа ефірного мовлення цифрового телебачення включає апаратуру, що встановлюється в 166 містах країни. Загальна кількість передавачів в мережі перевищує число міст. Потрібно проводити плановий радіоконтроль параметрів радіовипромінювання з усіх джерел. Тому очевидно, що розробка та впровадження методик, спрямованих на зменшення трудомісткості радіоконтролю засобів цифрового телебачення є актуальним.

3. Аналіз науково-технічних джерел щодо математичних моделей та програмних засобів моделювання процесу функціонування цифрового телебачення стандарту DVB-T2 свідчить, що найбільш досконалою є моделююча платформа CSP, розроблена рядом провідних організацій європейських країн.

4. Результати математичного моделювання спектрів радіовипромінювання на виході радіоканалу за допомогою доопрацьованої платформи CSP співпадають зі спектрами, що надаються нормативними документами на

систему цифрового телебачення стандарту DVB-T2, та є відмінними від результатів вимірювання штатними засобами УДЦР в частині крутизни схилів спектрів. Пошук причин невідповідності результатів моделювання та вимірювання спектрів радіовипромінювання цифрового телебачення показав, що за вибору малих значень ширини смуг пропускання аналізаторів спектра за проміжною частотою та у відео тракті отримані спектри в частині схилів наближаються до нормативних кривих. Проте вимірювання параметрів радіовипромінювання за таких режимів неприйнятно для практики з причини низької швидкодії.

5. Оскільки результати математичного моделювання не можуть в повній мірі задовольнити розв'язку завдання дослідження, займана ширина смуги частот радіовипромінювання цифрового телебачення визначалася за результатами експерименту. Проведених на прохання Національного авіаційного університету вимірювань фахівцями УДЦР виявилось недостатньо для отримання надійних статистичних оцінок. Тому в якості альтернативи апаратурі, яка відсутня в університеті, досліджена можливість застосування SDR платформи HackRF One. Результати дослідження свідчать про відповідність точніших характеристик платформи вимірюванню ЗШСЧ радіовипромінювання.

6. Для застосування методу X дБ потрібно коректно визначати опорний рівень спектра. У випадку зашумленого спектра крім невизначеності опорного рівня можуть виникнути труднощі із знаходженням ширини смуги частот на певному рівні від опорного. Дослідження методів згладжування на прикладі спектрів радіовипромінювання дозволяють зробити висновок про переваги застосування фільтра Савицького-Голея із ступенем полінома 3-4. Кількість точок у рухомій послідовності обирається в залежності від зашумленості спектра.

7. Опорний рівень спектра обирається за середнім значенням "полиці" спектра або за його максимальним рівнем. Дослідження залежності опорного рівня, знайденого за середнім значенням, від кількості точок у рухомій

послідовності свідчать про практичну незалежність результату від кількості точок. При визначенні опорного рівня за максимальним значенням і застосуванням фільтра Савицького-Голея із ступенем полінома 4 опорний рівень слабо залежить від кількості точок у рухомій послідовності. Суттєвим фактором на користь визначення опорного рівня за максимальним значенням є простота алгоритму програмного знаходження рівня.

8. З метою підвищення точності запропоновано визначати ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення за допомогою модифікованого методу $X \text{ дБ}$, який полягає в наступному:

- знаходять ширину смуги частот спектра на рівні -10 дБ від опорного рівня, тобто на ділянці спектра з максимальною крутизною схилів;

- ЗШСЧ радіовипромінювання дорівнює різниці ширини смуги частот спектра на рівні -10 дБ та значення поправки, яка залежить від обраного режиму роботи апаратури і знаходиться в результаті статистичної обробки результатів вимірювань.

9. Результати статистичної обробки експериментальних даних ширини смуги частот на рівні $X = -10 \text{ дБ}$ та ЗШСЧ, отриманих за допомогою аналізатора спектра Rohde&Schwarz U3772 Advantest та SDR платформи HackRF One, свідчать, що поправка до визначення ЗШСЧ підпорядковуються нормальному закону розподілення із рівнем значимості $\alpha = 0,05$ для налаштувань аналізатора спектра: $SPAN=10 \text{ МГц}$, $RBW=10 \text{ кГц}$, $RBW=3 \text{ кГц}$, $RBW=0,3 \text{ кГц}$.

10. Оцінювання займаної ширини смуги частот радіовипромінювання цифрового телебачення за методом $X \text{ дБ}$ на рівні -10 дБ від максимального рівня згладженого спектра характеризується похибкою від $1,67 \%$ до $1,76 \%$ в залежності від ширини смуги частот за проміжною частотою засобу вимірювання. Доцільно передбачити в програмному забезпеченні станцій радіоконтролю компенсацію даної похибки за допомогою поправки, значення якої обрунтовано в роботі.

11. Аналіз чинної методика інструментального оцінювання (вимірювання) ЗШСЧ радіовипромінювання свідчить про необхідність внесення до неї

доповнень, пов'язаних з визначенням ЗШСЧ цифрового телебачення, в частині рекомендованих значень ширини смуги частот за проміжною частотою, що задаються оператором, та мінімально необхідного перевищення опорним рівнем спектра рівня шумів.

12. Для практичного впровадження оцінювання займаної ширини смуги частот радіовипромінювання цифрового телебачення за модифікованим методом X дБ потрібно в обмеженому обсязі доопрацювати програмне забезпечення станцій радіоконтролю, а саме:

- передбачити режим вимірювання ЗШСЧ цифрового телебачення;
- встановити рівень спектра, на якому вимірюється ширина смуги частот на -10 дБ;
- включити обчислення поправки до ширини смуги частот спектра на рівні -10 дБ для отримання оцінки ЗШСЧ радіовипромінювання.

13. Основними перевагами оцінювання ЗШСЧ радіовипромінювання цифрового телебачення за модифікованим методом X дБ у порівнянні з $\beta/2$ -методом є можливість проведення радіоконтролю на відстанях у 4-5 разів більших та в умовах дії завад із спектром близьким до границь необхідної ширини смуги частот.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про радіочастотний ресурс України» від 24.06.2004 р. № 1876-IV із змінами та доповненнями.
2. Слободянюк П.В., Благодатний В.Г., Ступак В.С. Довідник з радіомоніторингу. – Ніжин: «Аспект-Поліграф», 2008. – 588с.
3. Регламент радиосвязи. Сборник рабочих материалов по международному регулированию планирования и использования радиочастотного спектра. Т.1. – М.: 2004.
4. Закон України «Про телекомунікації» від 18.11.2003 р. № 1280-IV із змінами та доповненнями.
5. План використання радіочастотного ресурсу України, затверджений Постановою Кабінету Міністрів України від 9.06.2006р. №815. Бюлетень Національної комісії з питань регулювання зв'язку України. (Офіційне видання) К.: №6(7) червень 2006 р. 174 с.
6. Національна таблиця розподілу смуг радіочастот України, затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 15.12.2005р. №1208. Бюлетень Національної комісії з питань регулювання зв'язку України. (Офіційне видання) К.: №1(2) січень 2006р. 166 с.
7. Порядок здійснення державного нагляду за користуванням радіочастотним ресурсом України в смугах радіочастот загального користування, затверджений Рішенням Національної комісії з питань регулювання зв'язку України від 27.10.2006р. №427. Бюлетень Національної комісії з питань регулювання зв'язку України. (Офіційне видання) К.: №10(11) жовтень 2006р. 160 с.
8. Статут Державного підприємства „Український державний центр радіочастот”, затверджений Рішенням Національної комісії з питань регулювання зв'язку України від 03.11.2005 р. № 117.

9. Положення про надання висновків щодо електромагнітної сумісності та дозволів на експлуатацію радіоелектронних засобів, затверджене Рішенням Національної комісії з питань регулювання зв'язку України від 12.08.2005 р. № 46.
10. Слободянюк П.В., Благодарный В.Г. Радиомониторинг: вчера, сегодня, завтра (Теория и практика построения системы радиомониторинга). – Прилуки: ООО «Издательство «Аир-Поліграф», 2010. – 296с.
11. Справочник по радиоконтролю. – Женева: Международный союз электросвязи, 2002. – 386 с.
12. Слободянюк П.В., Благодарный В.Г. Справочник для инженеров по радиомониторингу.- Киев, 2012. – 720 с.
13. Рекомендация МСЭ-R SM.1880. Измерение занятости спектра. 02, 2011.
14. Рекомендация МСЭ-R SM.1880. Стандартный формат обмена данными для целей регистрации и измерения полосы частот на станциях радиоконтроля. 2007.
15. Отчет МСЭ–R SM.2256. Измерения и оценка занятости спектра. 09, 2012.
16. Recommendation ITU-R SM.377-4. Accuracy of frequency measurements at stations of international monitoring.
17. Recommendation ITU-R SM.443-4. Bandwidth measurement at monitoring stations.
18. Recommendation ITU-R SM.378-7. Field-strength measurement at monitoring stations.
19. Методика інструментального оцінювання (вимірювання) напруженості електромагнітного поля випромінювання засобами радіочастотного контролю / Затвер. наказом Українського державного центру радіочастот 22.01.2007 N 12. – 13 с.
20. ДСТУ 3254-95. Радіозв'язок. Терміни та визначення. –К.: Держстандарт України, 1996.
21. Recommendation ITU-R SM.328-11. Spectra and bandwidth of emissions.

22. Recommendation ITU-R SM.1138. Determination of necessary band-widths including examples for their calculation and associated examples for the designation of emissions.
23. Нормы 19-02. Нормы на ширину полосы радиочастот и внеполосные излучения радиопередатчиков гражданского применения. – М.: ГКРЧ, 2002.
24. Нормы 19-13. Нормы на ширину полосы радиочастот и внеполосные излучения радиопередатчиков гражданского применения. – М.: ГКРЧ, 2013.
25. ГОСТ 30318-95. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к ширине полосы радиочастот и внеполосным излучениям радиопередатчиков. Методы измерения и контроля. – 36 с.
26. Логинов Н.А. Актуальные вопросы радиоконтроля в Российской Федерации.-М.: Радио и связь, 2000. – 240с.
27. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под ред. А.М. Рембовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 492 с.
28. Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. –224с.
29. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов.- СПб.: Питер, 2006. –752 с.
30. Руководящий документ РД 45.193-2001. Оборудование станций радиоконтроля. Общие технические требования. Утв. Министерством связи и информатизации РФ 24.10.2001, № 7476.
31. Методика інструментального оцінювання (вимірювання) девіації частоти електромагнітних випромінювань радіоелектронних засобів радіомовної служби засобами радіочастотного контролю / Затвер. наказом Українського державного центру радіочастот 22.01.2007 N 12. – 17 с.
32. Інструментальне оцінювання (вимірювання) частоти радіовипромінювання. Методика М-3.4.3/01–10 / Затвер. наказом

начальника Українського державного центру радіочастот 18.05.2010. – 24с.

33. Інструментальне оцінювання (вимірювання) ширини смуги частот радіовипромінювання. Методика М-3.4.3/02-10 / Затвер. наказом начальника Українського державного центру радіочастот 18.05.2010. – 24с.
34. Інструментальне оцінювання (вимірювання) зайнятості радіочастотних каналів (. Методика М-3.4.3/03-10 / Затвер. наказом начальника Українського державного центру радіочастот 18.05.2010. – 27с.
35. Многофункциональный пост радиомониторинга РМ-2500. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 91 с.
36. Автоматизированный измерительный комплекс радиомониторинга АИК-С. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 60 с.
37. Мобильная станция радиомониторинга РМ-1300М-2РЗ. Альбом электрических схем.
38. Система мониторинга R&S UMS100. http://www.rohde-schwarz.ru/products/radiomonitoring/Systems/UMS100/Brief_Description/
39. Широкодиапазонный многофункциональный радиоприемник AR-5000. Руководство по эксплуатации. –234с.
40. АРМ обработки и управления РС-157. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 138с.
41. Гепко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. – К.: «ЕКМО», 2009.-672 с.
42. Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005. - 592с.
43. Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа. – М.: Эко-Трендз, 2005. -384с.

44. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Издательский дом Вильямс, 2003. – 1104 с.
45. IEEE Std 802.11a-1999(R2003): Supplement to IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11.- IEEE, 2003. – 91p.
46. IEEE Std 802.11g-2003: IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11.- IEEE, 2003. – 78p.
47. IEEE Std 802.11n-2009: IEEE Standard for Information technology. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11. - IEEE, 2009. – 565p.
48. IEEE Std 802.16-2004: IEEE Standard for local and metropolitan area networks. Part 16.- IEEE, 2004. – 895p.
49. IEEE Std 802.16e: IEEE Standard for local and metropolitan area networks. Part 16.- IEEE, 2006. – 864p.
50. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). DVB document A122. – EBU, Geneva, 2011. – 187p.
51. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). DVB document A133. – EBU, Geneva, 2012. – 242p.
52. ETSI TR 101 190 v.1.3.2 (2011-05). Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects. – 87p.
53. ETSI EN 300 744 v.1.6.1 (2009-01). Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. –66 p.

54. TIA–2000.2–D (Revision of TIA/IS–2000.2–C) Physical Layer for cdma2000 Spread Spectrum Systems. // Telecommunication Industry Association, 2004. –523p.
55. Постанова Кабінету міністрів України від 26 листопада 2008р. №1085 «Про затвердження Державної програми цифрового телерадіомовлення».
56. Рекомендация МСЭ-R SM.1541-4. Нежелательные излучения в области внеполосных излучений.
57. Рекомендация МСЭ-R SM.1792. Измерения излучений боковой полосы передатчиков T-DAB и DVB-T для целей контроля.
58. Recommendation ITU-R SM.853-1. Necessary bandwidth.
59. Липатов А.А., Нарытник Т.Н., Сахневич А.Л. Схема формирования и доставки мультиплексов к цифровым передатчикам. <http://www.mitris.com/index.php?a=16>
60. Покрытие цифрового эфирного телевидения DVB-T2 в Украине. <http://satmaster.kiev.ua/index.php?categoryID=507>
61. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation Guideline for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2). DVB Document A133, February 2012. www.dvb.org/technology/standards/a133_DVB-T2_Imp_Guide.pdf
62. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital broadcasting system (DVB-T2). DVB document A122, July 2011. – 187 p.
63. ETSI EN 302755 v1.3.1. Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital broadcasting system (DVB-T2), November 2011. –189p.
64. B21C Project D07 Part A. Report on Simulating Chains and Outcomes. 2009. <http://www.google.com.ua/url?sa>
65. Haffender O. DVB-T2: Common simulation platform. – BBC White research paper WHP 196, May 2011. – 29 p.

66. Marshall P. Digital Television Project: Provision of Technical Assistance. Issue 1.1, March 2005.
http://www.digitalelevision.gov.uk/pdf_documents/publications/art_v1-2.pdf
67. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 6.x.: программирование численных методов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 672с.
68. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2007. – 751 с.
69. Гандер В., Гржебичек И. [Решение задач в научных вычислениях с применением Maple и MATLAB](#). – Минск: Издательство "Вассамедина", 2005. -520 с.
70. Sibruk L., Basansky A., Bondarenko D. Simulation of radiation field of DVB-T2 digital television. / Proceedings of the National Aviation University, 3(56), 2013. P. 65-69.
71. Сібрук Л. В., Басанський О. А., Бондаренко Д. П. Моделювання поля випромінювання цифрового телебачення стандарту DVB-T2. / Мат. XI міжнар. НТК «АВІА-2013», 21–23 травня, том 4. –К.:НАУ,2013. С. 24.22–24.25
72. Рекомендация МСЭ-R SM.1875. Измерение покрытия DVB-T и проверка критериев планирования.
73. Roberto Sacchi. Novita' tecnologiche e soluzioni di test per il DVB-T2 e gli altri standard per il broadcasting
http://www.home.agilent.com/upload/cm_upload/All/DigitalVideo.pdf?&cc=UA&lc=eng
74. Sebesla R., Dvorsky M. DVB-T2 Spectrum Measurement.
http://marek.mrak.cz/publications/sebesta_RTT08_v2_sec.pdf
75. Measurements on MPEG2 and DVB-T signals. http://www.rohde-schwarz.co.uk/file/n170_mpeg2.pdf
76. Дьяконов В.П., Афонский А.А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики.- М.: Солон-Пресс, 2009. –248с.

77. Advantest U3772 Spectrum Analyzer.
http://www.testequipmentconnection.com/specs/ADVANTEST_U3772.PDF
78. HackRF One. <http://greatscottgadgets.com/hackrf/>
79. R&S SMJ Vector Signal Generator. http://www.rohde-schwarz.us/en/products/test_and_measurement/signal_generation/SMJ100A
80. ETSI EN 302 296-2 v1.2.1. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for digital television broadcast service, Terrestrial (DVB-T); Part 2: Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive. March 2011.
81. Stephanie Bell. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement. National Physical laboratory.
http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/UK_NPL/mgpg11.pdf
82. Cleveland W. S. Robust locally weighted regression and smoothing scatter plots //Journal of the American Statistical Association. 1979. Vol. 74, no. 368. –P. 829–836.
83. Алгоритм LOWESS.
http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=_LOWESS
84. Savitzky A., Golay M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least-squares procedures. Anal. Chem. 36 (8), 1964. P. 1627–1639.
85. Лемешко Б. Ю., Рогожников А.П. Сравнительный анализ критериев проверки отклонения распределения от нормального закона // Метрология. 2005. № 5. – С. 3-23.
86. ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения.
87. ГОСТ Р 50779.21-2004. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение.
88. Основы управления использованием радиочастотного спектра. Т. 1: Международная и национальная системы управления РЧС. Радиоконтроль

и радионадзор/ Под ред. М.А.Быховского.
–М.:КРАСАНД, 2012. -340с.

89. Основы управления использованием радиочастотного спектра. Т. 2: Обеспечение электромагнитной совместимости радиосистем/ Под ред. М. А. Быховского.-М.:КРАСАНД, 2012. -552 с.
90. Basansky A. A. Mathematical modeling and measuring the occupied bandwidth emissions of DVB-T2 / Electronics and control systems, № 4 (38), 2013. - P. 25-28.
91. Sibruk L., Basansky A. Estimation of occupied bandwidth of digital television emission for monitoring / Proc. of 15-th Int. Radar Symp. "Microwave and Radar Week", 16-18 June 2014, Gdansk, Poland, p. 469-471.
92. Sibruk L., Bondarenko D., Basansky A. Occupied bandwidth of digital television measurement at monitoring stations. / Proc. of 2014 Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, 23-25 September 2014, Kiev, Ukraine. С. 58-60.
93. Sibruk L. V., Basansky A. A. Measurement the occupied bandwidth of the emission using SDR platform HackRF One / Electronics and control systems, № 2 (40), 2014. - P. 24-28.
94. Sibruk L. V., Basansky A. A. Measurement the occupied bandwidth of digital television emission by method X dB / Electronics and control systems, № 3 (41), 2014. – P. 24–28.
95. Сібрук Л. В., Басанський О. А. Вимірювання займаної ширини смуги частот радіовипромінювання цифрового телебачення / Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку, №5(33), 2014. С. 42-47.
96. Басанський О. А. Експериментальне дослідження радіовипромінювання цифрового телебачення. / Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «Проблеми навігації та управління рухом», Київ, НАУ, 18–20 листопада 2013 р. – С. 97.