

СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО МОВЛЕННЯ

УДК 621.397

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ЦИФРОВОГО НАЗЕМНОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МОВЛЕННЯ У СТАНДАРТАХ DVB-T/T2

БАЛЯР В.Б., ГОФАЙЗЕНО.В.

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова
ДП "Український науково-дослідний інститут радіо та телебачення"

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIGITAL TERRESTRIAL TELEVISION BROADCASTING SYSTEMS IN DVB-T/T2 STANDARDS

BALYAR V.B., GOFAIZENO.V.

Odessa National Academy of Telecommunications named after O.S.Popov
SE "Ukrainian scientific-research institute of radio and television"

***Анотація.** В статті представлено поточний стан впровадження та порівняльну характеристику систем DVB-T та DVB-T2 на фізичному та каналному рівнях, побудовану на базі аналітичних досліджень та математичного моделювання.*

***Abstract.** In article the current status of introduction and comparison analysis of DVB-T and DVB-T2 systems on physical and link layers based on analytical studies and mathematical modeling are presented.*

ВСТУП

З моменту розроблення системи DVB-T2 та офіційної публікації стандарту на цю систему Європейським інститутом зі стандартизації у сфері телекомунікацій (ETSI) у світі відбувається бурхливий процес з розгортання мовленнєвих мереж на базі цієї системи другого покоління. Повідомлення з вибору саме цієї системи як базової системи цифрового наземного телевізійного мовлення надходять майже щодня. Можливим поясненням такої зацікавленості може бути ціла низка факторів: в багатьох країнах впровадження цифрового мовлення перебуває в початковій або активній фазі впровадження, та доцільним є вибір саме цієї нової цифрового мовлення другого покоління, забезпечення за впровадження системи DVB-T2, підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу, реалізація можливості передавання більшої кількості програм порівняно з системою DVB-T та, зокрема, програми у форматі високої чіткості, більша гнучкість у виборі параметрів системи передавання під час розгортання мовленнєвих мереж. Проте існує й ряд недоліків впровадження цієї системи, головним з яких є, перш за все, поки що відносно велика вартість обладнання цієї системи та іноді навіть відсутність доступного приймального обладнання, що викликано тим, що стандарт відносно новий та випробування його ще в активній фазі, та в багатьох випадках відсутністю національних стандартів та інших нормативних документів, щодо певної міри уповільнює широке впровадження.

Враховуючи вищезазначене представляється важливим визначення чітких переваг впровадження системи DVB-T2 порівняно з DVB-T, що їх може бути оцінено шляхом порівняльної характеристики трактів адаптації до наземного каналу розподілу програм мовлення, а також визначенням орієнтовного виграшу в енергетичних характеристиках.

АНАЛІЗ СТАНУ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ DVB-T/T2

Основною організацією, що займається розробленням нормативної бази щодо систем цифрового телевізійного та мультимедійного мовлення, впроваджуваних в Європі та інших країнах світу, є Проект DVB, до складу якого входить цілий ряд мовленнєвих та наукових організацій, а також виробників обладнання. Інформацію щодо впровадження різних систем цифрового мовлення в стандартах DVB наведено на сайті Проекту DVB [1].

Крім розроблення відкритих стандартів на сайті Проекту DVB проводиться аналіз статистики впровадження систем DVB в різних середовищах, що зазвичай наводиться у вигляді мапи світу з зазначенням відповідних частин світу, де впроваджують ту чи іншу систему. Подібне графічне представлення статистики впровадження станом на лютий 2012 р. надано на рисунку 1 [1].

Додатково на рисунку представлено стан впровадження інших систем цифрового наземного телевізійного мовлення, впроваджуваних у світі – систем ISDB-T, ATSC та DTMB.

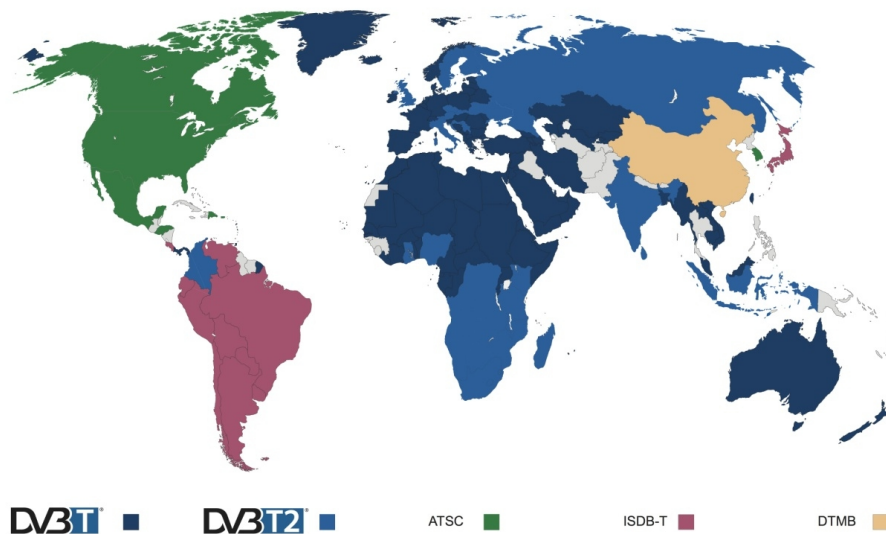


Рисунок 1 – Стан впровадження систем цифрового наземного телевізійного мовлення

З цього рисунку видно, що стандартами, найбільш розповсюдженими у світі, є стандарти DVB-T та DVB-T2, характеристики яких будуть проаналізовані більш детально нижче. Результат візуалізації аналізу та узагальнення інформації щодо стану впровадження систем DVB-T та DVB-T2 наведено на рисунках 2–4.

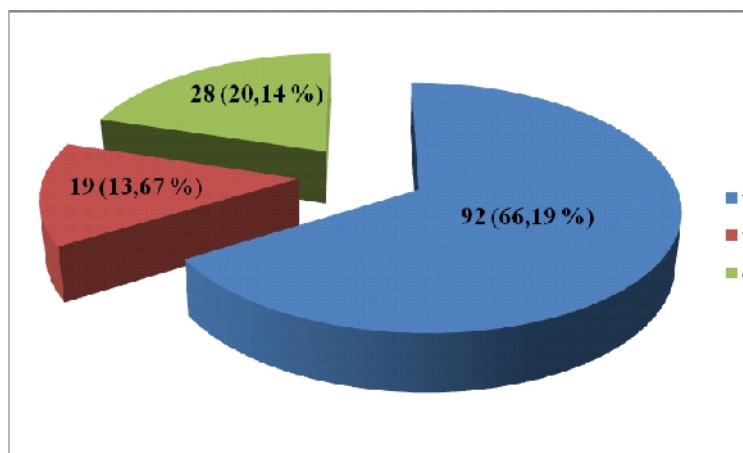


Рисунок 2 – Співвідношення впровадження стандартів DVB-T та DVB-T2 в світі

На рисунку 2 наведено результати аналізу інформації щодо визначення кількості та відсоткового співвідношення країн, що згруповано за трьома категоріями:

- країни, в яких впроваджують чи вже впроваджено виключно стандарт DVB-T;
- країни, в яких впроваджують чи вже впроваджено виключно стандарт DVB-T2;
- країни, в яких впроваджують чи вже впроваджено обидва стандарти DVB-T та DVB-T2;

Аналіз показав, що станом на лютий 2012 р. зі 139 країн, в яких з чотирьох стандартів на цифрове наземне телевізійне мовлення (DVB, ATSC, ISDB-T, DTMB) вибрано стандарт DVB, 92 країни (66,19 %) впроваджують чи вже розгорнули мовленнєві мережі в стандарті DVB-T; 19 країн (13,67 %) – виключно в стандарті DVB-T2; 28 країн (20,14 %) – в обох стандартах.

Причому країни, що впроваджують обидва стандарти, використовують стандарт DVB-T2 в якості базового стандарту на цифрове мовлення як в обох форматах – телебачення стандартної чіткості (SDTV) та високої чіткості (HDTV), так і виключно у форматі HDTV.

На рисунку 3 та 4 відповідно наведено статус впровадження кожного з стандартів (DVB-T та DVB-T2) по країнах за такими критеріями:

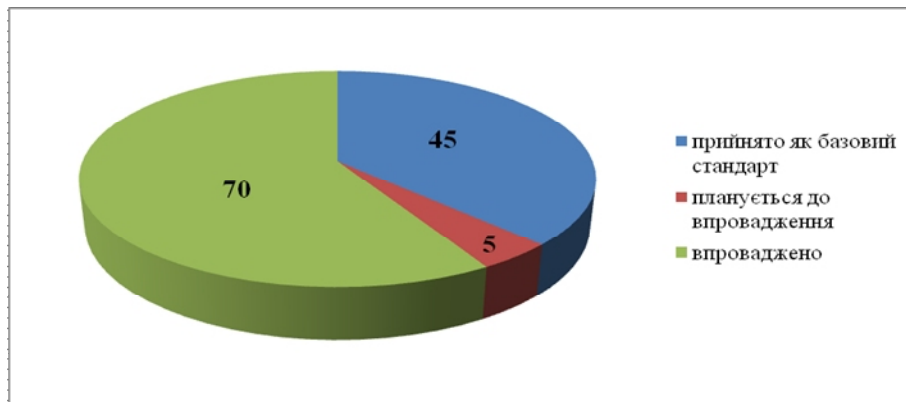


Рисунок 3 – Статус впровадження стандарту DVB-Tу світі

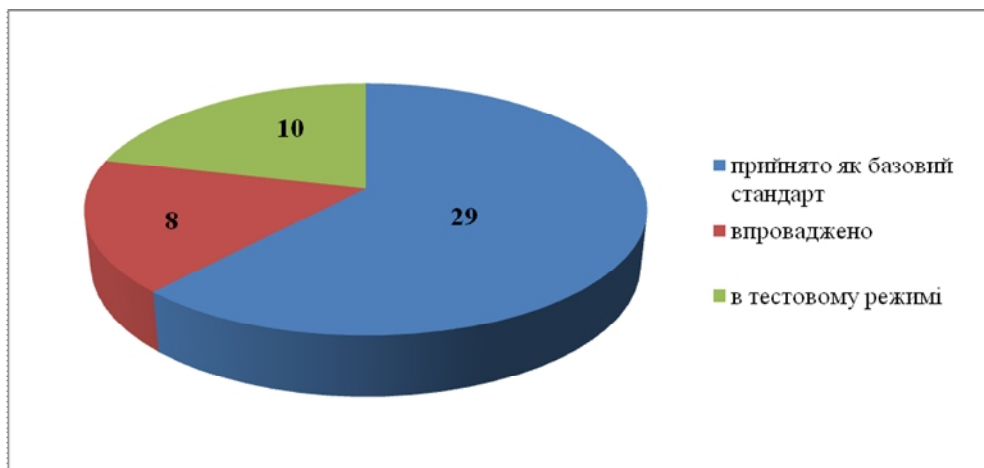


Рисунок 4 – Статус впровадження стандарту DVB-T2 у світі

- країни, в яких прийнято рішення щодо впровадження відповідного стандарту, але діяльність щодо ліцензування не розпочато та відсутні діючі мережі (на рисунках позначено як "прийнято як базовий стандарт");
- країни, в яких відповідний стандарт планується до впровадження та/чи видано відповідні ліцензії;
- країни, в яких відповідний стандарт вже впроваджено та розпочато мовлення;
- країни, в яких здійснюється тестування відповідного стандарту.

З проведеного аналізу видно, що у 120 країнах, в яких заявлено використання стандарту DVB-T, переважно вже розгорнуто мовленнєві мережі (70 країн), в інших - рішення щодо впровадження ще в стадії прийняття або мережі у стадії розгортання. Мережі DVB-T, що працюють в тестовому режимі, відсутні.

Враховуючи те, що стандарт DVB-T2 відносно новий, більшість країн ще тільки розгортають відповідні мережі чи прийняли рішення щодо впровадження цього стандарту як єдиного чи другого стандарту на цифрове мовлення. На сьогодні мережі DVB-T2 функціонують тільки у 8 країнах.

Більш детальну інформацію щодо впровадження стандартів DVB-T та DVB-T2 по кожній з країн можливо отримати на сайті Проекту DVB [1].

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ DVB-T ТА DVB-T2

Важливою складовою широкого впровадження систем мовлення у світі є їх міжнародна стандартизація. Після її завершення вважається, що відповідна система мовлення є офіційно визнаною у світі та може бути впроваджена в будь-якій країні, яка буде вважати за потрібне. Безумовно, вибір та впровадження певної системи є власною справою кожної з країн та відбуватись це може й без міжнародної стандартизації, але вищезгаданий підхід все ж таки є, так би мовити, "правилом доброго тону" та є важливою складовою успішного майбутнього системи.

Особливістю процесу стандартизації системи цифрового наземного телевізійного мовлення другого покоління є те, що європейську та міжнародну стандартизацію цієї системи розпочато практично одночасно. На момент публікації попередньої версії стандарту на систему DVB-T2 авторами цієї статті від імені Адміністрації зв'язку України в 2008 р. була ініційована міжнародна стандартизація цієї системи в Дослідній комісії 6 "Служби мовлення" Міжнародного союзу електрозв'язку. Більш докладну інформацію з цього наведено в [2, 3].

Порівняльну характеристику трактів систем DVB-T та DVB-T2, що увійшла до відповідних міжнародних рекомендацій (див. [4, 5]) в результаті розгляду та обговорення в Дослідній комісії 6 Сектору радіозв'язку МСЕ (МСЕ-Р) вкладів України, підготовлених авторами від імені Адміністрації зв'язку України, наведено в таблиці 1. В цій таблиці розглянуто відповідні значення тільки для ширини смуги частот 7 та 8 МГц. Параметри для інших варіантів ширини смуги частот визначено в [4, 5].

Окремою графою в цій таблиці є графа, що присвячена забезпеченню сумісності системи DVB-T та DVB-T2. Поняття "сумісність", застосоване в цій таблиці, вказує лише на спільність тих чи інших характеристик в обох стандартах, але в ніякому разі не вказує на можливість приймання сигналу DVB-T за допомогою приймального обладнання системи DVB-T2 та приймання сигналу DVB-T2 за допомогою приймачів DVB-T – така можливість відсутня. Відсутність такого роду сумісності викликана відмінністю у використовуваних алгоритмах оброблення інформації у системах DVB-T та DVB-T2, навіть незважаючи на те, що в обох системах використовують певні однакові технічні рішення.

У графі "сумісність між DVB-T та DVB-T2" використано такі поняття:

- забезпечується (характеристики системи DVB-T та DVB-T2 збігаються);
- часткова (означає, що алгоритм обробки однаковий у системі DVB-T та DVB-T2, але сумісність відсутня внаслідок обов'язкового попереднього чи подальшого оброблення сигналу іншими алгоритмами в тракті передавача);
- не розглядається (порівняльна характеристика не проводиться);
- відсутня (використовувані алгоритми відмінні в обох системах).

З таблиці 1 видно, що системи DVB-T та DVB-T2 мають значну гнучкість та складність використовуваних алгоритмів, яка дозволяє підібрати необхідну конфігурацію, що є оптимальною та забезпечує необхідні характеристики в самих різних умовах приймання. Якщо порівнювати обидві системи за забезпечуваною швидкістю передавання через мережу, то у системі DVB-T2 максимальну швидкість цифрового потоку, що відповідає 50,4 Мбіт/с проти 31,67 Мбіт/с у системі DVB-T, що забезпечить орієнтовний вииграш приблизно 50 % в кількості програм в одному частотному каналі. Порівняння за забезпечуванним відношенням сигнал/шум буде більш детально проведено в наступному розділі цієї статті.

Крім того, з проведеного аналізу також можливо зробити такі висновки: відмінність у принципах формування та оброблення випромінюваного сигналу та відповідних до цього принципів побудови передавального обладнання не дозволяє використовувати передавальне та приймальне обладнання системи DVB-T для передавання та приймання сигналів системи DVB-T2.

Це означає, що система DVB-T не сумісна з системою DVB-T2 та навпаки – система DVB-T2 не сумісна з системою DVB-T. Сумісність DVB-T2 та DVB-T може розглядатись лише на рівні частотного планування, коли система DVB-T2 може впроваджуватись в межах частотного плану (розподілу частот) в тому ж самому діапазоні частот (див. таблицю 1), що й система DVB-T. Але в технічному плані це зовсім різні стандарти.

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ DVB-T ТА DVB-T2

Важливою енергетичною характеристикою, що нормують у системах цифрового мовлення є відношення сигнал/шум у приймачі. Враховуючи наявність порогового ефекту, що проявляється в "розсіпанні" ТВ зображення на окремі структурні елементи при декодуванні відеосигналу MPEG чи в неможливості декодування взагалі, забезпечення певного відношення сигнал/шум є вкрай важливим для забезпечення якості функціонування системи цифрового мовлення на необхідному рівні.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз систем DVB-T і DVB-T2

Параметри	Система DVB-T (7 МГц)	Система DVB-T (8 МГц)	Система DVB-T2 (7 МГц)	Система DVB-T2 (8 МГц)	Сумісність між DVB-T та DVB-T2
Ширина каналу	Див. Рекомендацію ITU-R BT.1206				забезпечується (тільки для нормального режиму та режимів OFDM 2k, 4k та 8k)
Використовувана ширина смуги частот каналу	6,66 МГц	7,61 МГц	6,66 МГц в нормальному режимі 6,75 МГц в розширеному режимі (режим 8k) 6,80 МГц в розширеному режимі (режим 16k та 32k)	7,61 МГц в нормальному режимі 7,72 МГц в розширеному режимі (режим 8k) 7,77 МГц в розширеному режимі (режим 16k та 32k)	
Кількість носійних коливань					
режим 1k	-		853		
режим 2k	1705		1705		
режим 4k	3409		3409		
режим 8k	6817		6817 (нормальний режим) 6913 (розширений режим)		
режим 16k	-		13 633 (нормальний режим) 13921 (розширений режим)		
режим 32k	-		27 265 (нормальний режим) 27841 (розширений режим)		
Режими модуляції	постійне кодування та модуляція (CCM) ієрархічна модуляція		постійне кодування та модуляція (CCM)/ змінне кодування та модуляція (VCM)		
Метод модуляції	ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64 (однаковий для всіх передаваних даних), MR-КАМ-16, MR-КАМ-64 (MR – ієрархічна модуляція)		ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, що обирається окремо для кожного логічного каналу фізичного шару		

Продовження таблиці 1

Параметри	Система DVB-T (7 МГц)	Система DVB-T (8 МГц)	Система DVB-T2 (7 МГц)	Система DVB-T2 (8 МГц)	Сумісність між DVB-T та DVB-T2
Тривалість активного символу					забезпечується (тільки для нормального режиму та режимів OFDM 2k, 4k та 8k)
режим 1k	-	-	128 мкс	112 мкс	
режим 2k	256 мкс	224 мкс	256 мкс	224 мкс	
режим 4k	512 мкс	448 мкс	512 мкс	448 мкс	
режим 8k	1024 мкс	896 мкс	1024 мкс	896 мкс	
режим 16k	-	-	2048 мкс	1792 мкс	
режим 32k	-	-	4096 мкс	3584 мкс	
Інтервал між носійними коливаннями					
режим 1k	-	-	7812,88 Гц	8929 Гц	
режим 2k	3906 Гц	4464 Гц	3906 Гц	4464 Гц	
режим 4k	1953 Гц	2232 Гц	1953 Гц	2232 Гц	
режим 8k	976 Гц	1116 Гц	976 Гц	1116 Гц	
режим 16k	-	-	488,25 Гц	558 Гц	
режим 32k	-	-	244,125 Гц	279 Гц	
Тривалість захисного інтервалу	1/32, 1/16, 1/8, 1/4 від тривалості активного символу	1/32, 1/16, 1/8, 1/4 від тривалості активного символу	1/128, 1/32, 1/16, 19/256, 1/8, 19/128, 1/4 від тривалості активного символу	1/128, 1/32, 1/16, 19/256, 1/8, 19/128, 1/4 від тривалості активного символу	
режим 1k	-	-	8; 16; 32 мкс	7; 14; 28 мкс	
режим 2k	8; 16; 32; 64 мкс	7; 14; 28; 56 мкс	8; 16; 32; 64 мкс	7; 14; 28; 56 мкс	
режим 4k	16; 32; 64; 128 мкс	14; 28; 56; 112 мкс	16; 32; 64; 128 мкс	14; 28; 56; 112 мкс	
режим 8k	8; 32; 64; 75,9; 128; 152; 256 мкс	7; 28; 56; 66,5; 112; 133; 224 мкс	8; 32; 64; 75,9; 128; 152; 256 мкс	7; 28; 56; 66,5; 112; 133; 224 мкс	
режим 16k	-	-	16; 64; 128; 152; 256; 304; 512 мкс	14; 56; 112; 133; 224; 266; 448 мкс	
режим 32k	-	-	32; 128; 256; 304; 512; 608 мкс	28; 112; 224; 266; 448; 532 мкс	

Продовження таблиці 1

Параметри	Система DVB-T (7 МГц)	Система DVB-T (8 МГц)	Система DVB-T2 (7 МГц)	Система DVB-T2 (8 МГц)	Сумісність між DVB-T та DVB-T2
Загальна тривалість символу					
режим 1k	-	-	136; 144; 160 мкс	119; 126; 140 мкс	забезпечується (тільки для нормального режиму та режимів OFDM 2k, 4k та 8k)
режим 2k	264; 272; 288; 320 мкс	231; 238; 252; 280 мкс	264; 272; 288; 320 мкс	231; 238; 252; 280 мкс	
режим 4k	527,9; 544; 576; 640 мкс	462; 476; 504; 560 мкс	527,9; 544; 576; 640 мкс	462; 476; 504; 560 мкс	
режим 8k	1032; 1056; 1088; 1100; 1152; 1176; 1280 мкс	903; 924; 952; 962,5; 1008; 129; 1120 мкс	1032; 1056; 1088; 1100; 1152; 1176; 1280 мкс	903; 924; 952; 962,5; 1008; 129; 1120 мкс	
режим 16k	-	-	2064; 2112; 2176; 2200; 2304; 2352; 2560 мкс	1806; 1848; 1904; 1925; 2016; 2058; 2240 мкс	
режим 32k	-	-	4128-4704 мкс	3612; 3696; 3808; 3850; 4032; 4116 мкс	
Тривалість кадру передавання	68 символів OFDM. Один суперкадр містить 4 кадри		Кадр починають з преамбули та має конфігуровану кількість символів з максимальною тривалістю 250 мс. Мінімальна кількість символів даних є 3 (режим 32k) чи 7 (в інших режимах). Довжина суперкадру є конфігурованою, причому максимальна кількість кадрів є 25 із тривалістю 64 с.		не розглядається
Формат вхідного потоку	Транспортні потоки (TS)		Транспортні потоки (TS) чи потоки загального формату (GS)		забезпечується
Можливість одночасного передавання багатьох вхідних потоків	Підтримується (необхідне додаткове ремультимплексування)		Підтримується (без ремультимплексування)		часткова
Формат системного потоку	Модифікований транспортний потік		Формат BB		відсутня

Продовження таблиці 1

Параметри	Система DVB-T (7 МГц)	Система DVB-T (8 МГц)	Система DVB-T2 (7 МГц)	Система DVB-T2 (8 МГц)	Сумісність між DVB-T та DVB-T2
Захист на каналному рівні	-		CRC-8		відсутня
Канальнекодування	Код RS (204,188, T = 8) та згортковий код, вихідна швидкість 1/2 з 64 станами. Перфорування до швидкості 2/3; 3/4; 5/6; 7/8		Код BCH з змінною коригувальною здатністю та змінним розміром блока 64 800 чи 16200 бітів (після кодування LDPC) та код LDPC швидкістю коду 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6		
Перемеження	Згорткове перемеження, бігове перемеження, комбіноване з власним чи символним перемеженням		Бігове, часове перемеження та перемеження комірок, окремо в кожному логічному каналі фізичного шару. До кожного каналу також застосовують загальне частотне перемеження		
Модифікація сигнального сузір'я	-		Обернення сигнального сузір'я (29 (ФМ-4); 16,8 (КАМ-16); 8,6 (КАМ-64) градусів чи $\arctg(1/16)$ (КАМ-256))		
Логічні канали фізичного шару (PLP)	-		Режим А з одним логічним каналом PLP та режим В з багатьма каналами PLP. Модуляцію, кодування та глибину часового перемеження обирають окремо для кожного каналу PLP		
Рандомізація даних/розсіювання енергії	PRBS				забезпечується
Автоматичне конфігурування приймача	Сигналізація параметрів передавання (TPS)		Швидке сканування з застосуванням спеціального символу преамбули P1, що входить до складу кадру системи		відсутня
Часова/частотна синхронізація	Захисний інтервал (часова синхронізація). Рознесені носійні коливання рознесених пілот-сигналів з 1 еталонною послідовністю. Безперервні пілот-сигнали		Захисний інтервал (часова синхронізація). Символи преамбули P1 та P2. Рознесені носійні коливання рознесених пілот-сигналів з 8 різними еталонними послідовностями. Безперервні пілот-сигнали		часткова
Режим з багатьма антенами	-		Додатковий режим 2x1 (багато на вході/один на виході (MISO) з кодуванням Алмуті		відсутня
Зменшення споживання енергії приймачем	Мультиплексування з квантуванням в часі (тільки для системи DVB-H)		Логічні канали фізичного шару (PLP) організують як субриси в кадрі. Коли отримують один PLP, тоді приймають та обробляють тільки преамбулу та відповідні субриси		часткова

Закінчення таблиці 1

Параметри	Система DVB-T (7 МГц)	Система DVB-T (8 МГц)	Система DVB-T2 (7 МГц)	Система DVB-T2 (8 МГц)	Сумісність між DVB-T та DVB-T2
Сигналізація шару 1	-	-	Інформацію сигналізації L1 передають в символах P2 в преамбулі та модулюють методом ФМ-2 з кодуванням 1/4 16kLDPC. Для передавання пост-сигналізації L1 можливо обирати різні методи модуляції та кодування методом 1/2 16k LDPC. Крім того застосовують внутрішньосмугове передавання інформації сигналізації всередині каналів PLP		відсутня
Передавання інформації сигналізації шару 1	-	-	Всередині каналів даних PLP чи в спеціальному загальному PLP на початку кадру		
Зменшення пікфактору (PAPR)	-	-	Додаткові методи - розширення активного сигнального сузір'я (ACE) та резервування носійних коливань (TR)		
Можливість подальшого розширення	-	-	Суперкадр може містити один чи декілька кадрів майбутнього розширення FEF, які може бути використано для розширення системи в майбутньому		
Діапазон частот для впровадження	174–230 МГц, 470–862 МГц				забезпечується
Побудова одночасних мереж (SFN)	передбачено				
Побудова багаточастотних мереж	передбачено				
Метод синхронізації передавачів в мережі	Пакет ініціалізації мегакадру (MP)		Пакет інтерфейсу модулятора системи DVB-T2 (T2-MP)		відсутня
Швидкість передавання даних через мережу	4,35-27,71 Мбіт/с (залежно від захисного інтервалу, швидкості коду та методу модуляції в режимах неієрархічного передавання)	4,98-31,67 Мбіт/с (залежно від захисного інтервалу, швидкості коду та методу модуляції в режимах неієрархічного передавання)	від 4,68 до 44,1 Мбіт/с, в залежності від обсягу ШПФ, методу модуляції, швидкості коду, захисного інтервалу, еталонної послідовності пілот-сигналів, MISO, FEF, PAPR	від 5,35 до 50,4 Мбіт/с, в залежності від обсягу ШПФ, методу модуляції, швидкості коду, захисного інтервалу, еталонної послідовності пілот-сигналів, MISO, FEF, PAPR	не розглядається
Відношення (носійне коливання/шум) у каналі з АБГШ	В залежності від методу модуляції та каналного коду 3,1-20,1 дБ		В залежності від методу модуляції та каналного коду від 0,8 дБ до 21,8 дБ		

Для оцінки енергетичних характеристик з метою проведення порівняльного аналізу систем DVB-T та DVB-T2 та орієнтовної оцінки виграшу за величиною відношення носійне коливання/шум (відношення C/N) при переході до системи мовлення другого покоління будемо використовувати математичні моделі обох систем, побудовані в розширенні Simulink середовища моделювання Matlab. Такий підхід є найбільш ефективним для проведення подібного аналізу, тому що він не вимагає застосування діючого обладнання, яке не пристосовано для проведення детального аналізу характеристик без наявності спеціального обладнання вимірювання, що на теперішній час є досить дорогим. Сучасні можливості, що надають спеціалізовані середовища моделювання є такими, що можуть забезпечити отримання результатів, які є максимально близькими до реальних. Окрім того, в більшості випадків при розробці систем цифрового мовлення в проєкті DVB застосовують моделювання, результати якого потім використовують в якості еталонних.

Опис моделі. Simulink є досить гнучким та самостійним розширенням середовища Matlab, в якому реалізовано принцип візуального програмування, під час якого здійснюється побудова необхідної моделі за допомогою окремих блоків стандартних вбудованих бібліотек, їх певного комбінування чи розроблення нових блоків шляхом створення системних функцій (s-функцій) за допомогою мов програмування Matlab, C, C++, Ada, або Fortran.

Для оцінки використано схему випробувань (див. рисунок 5), що її рекомендовано в стандарті ETSI TR 101 290 "Настанови до проведення вимірювань у системі DVB" [6] з внесенням певної модифікації для врахування специфіки реалізації моделі.

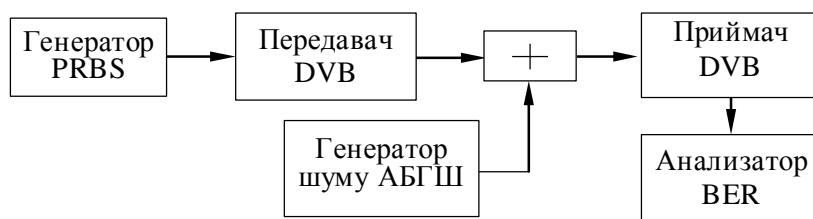


Рисунок 5 -Схема випробувань для оцінки залежності BER від відношення C/N

Схема випробувань відповідає випадку, коли вимірювання проводилось для режиму "коли служба не працює". На цій схемі під передавачем та приймачем DVB розуміють передавач та приймач систем DVB-T та DVB-T2 з урахуванням того, що вимірювання проводилось окремо для кожного з стандартів. Використання генератора псевдовипадкової двійкової послідовності (PRBS) дозволяє проводити порівняльний аналіз з декодованими даними з виходу приймача DVB для визначення помилок в аналізаторі коефіцієнта помилок бітів (BER). Для проведення вимірювань побудовано модель передавача та приймача системи DVB-T, в яких порядок оброблення інформації здійснюється за алгоритмами, що їх описано у стандартах на систему цифрового наземного телевізійного мовлення першого покоління [7, 8]. Інтерфейс розробленої моделі представлено на рисунку 6.

При побудові моделі зроблено такі припущення:

- на вхід транспортного мультиплектора подають псевдовипадкові дані, що в подальшому безпосередньо вводять до корисного навантаження пакета транспортного потоку. Заголовок пакета транспортного потоку також утворено випадковими даними;
- наскрізний тракт представлено лише низькочастотною частиною, тобто відсутні аналого-цифрове перетворення, перетворення частоти, підсилення, тощо. Під час моделювання використано концепцію комплексного еквіваленту каналу в основній смузі частот, що зазвичай використовують в Simulink;
- синхронізація між передавачем і приймачем є ідеальною. Також відсутні інші спотворення, що можуть виникнути в радіочастотному тракті, за винятком шуму АБГШ;
- оцінка та компенсація каналу вважаються ідеальними, тобто відсутнє певне погіршення характеристик внаслідок помилки інтерполяції, що є притаманним при впливі тільки АБГШ.

Під час моделювання системи DVB-T обрано таку конфігурацію:

- ширина смуги частот: 8 МГц;
- режим OFDM: 2k (1705 активних носійних коливань);
- тривалість захисного інтервалу: 1/4 від тривалості активного символу OFDM;

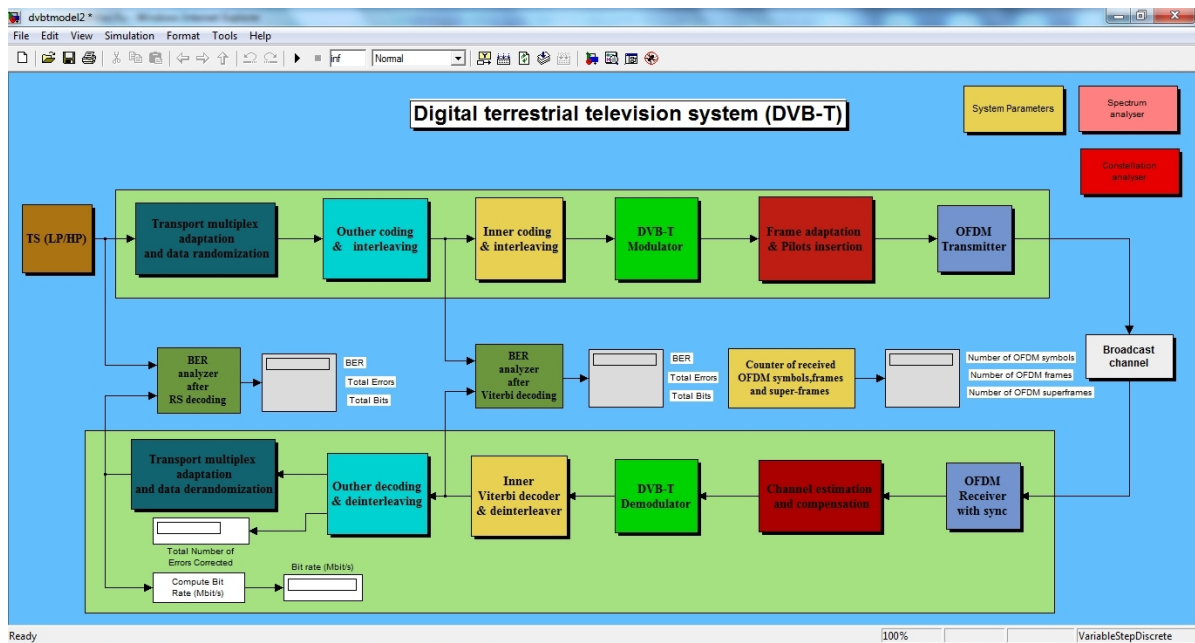


Рисунок 6 – Інтерфейс розробленої моделі системи DVB-T

Під час моделювання системи DVB-T обрано таку конфігурацію:

- ширина смуги частот: 8 МГц;
- режим OFDM: 2k (1705 активних носійних коливань);
- тривалість захисного інтервалу: 1/4 від тривалості активного символу OFDM;
- швидкість згорткового коду: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8;
- метод модуляції: ФМ-4 (QPSK), КАМ-16 (16-QAM), КАМ-64 (64-QAM).

Для забезпечення однакових вихідних умов під час порівняння модель передавача та приймача системи DVB-T2 також побудовано з урахуванням припущень, що їх визначено вище для системи DVB-T. Алгоритми оброблення інформації відповідають наданим в [9, 10].

Під час розроблення моделі наскрізного тракту системи DVB-T2 зроблено наступні припущення:

- блок планування структури кадру T2 реалізовано з використанням критерію найближчої цілої кількості символів OFDM за кожною з конфігурацій;

- компенсація нерівномірності обвідної сигналу OFDM в часі не застосовувалась.

Конфігурація системи DVB-T2 відповідала такій:

- ширина смуги частот: 8 МГц;
- режим OFDM: 2k (1705 активних носійних коливань);
- тривалість захисного інтервалу: 1/4 від тривалості активного символу OFDM;
- еталонна послідовність пілот-сигналів: PP1;
- режим передавання: SISO (один передавач – один приймач);
- довжина кадру основної смуги: 64 800 біт;
- кількість каналів PLP: 1 PLP (режим A);
- швидкість коду LDPC: 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6;
- кількість ітерацій за декодування LDPC: 50 ітерацій (типове значення);
- метод модуляції: ФМ-4 (QPSK), КАМ-16 (16-QAM), КАМ-64 (64-QAM), КАМ-256 (256-QAM);
- обернення сигнального сузір'я вимкнено.

Інтерфейс розробленої моделі системи DVB-T2 надано на рисунку 7.

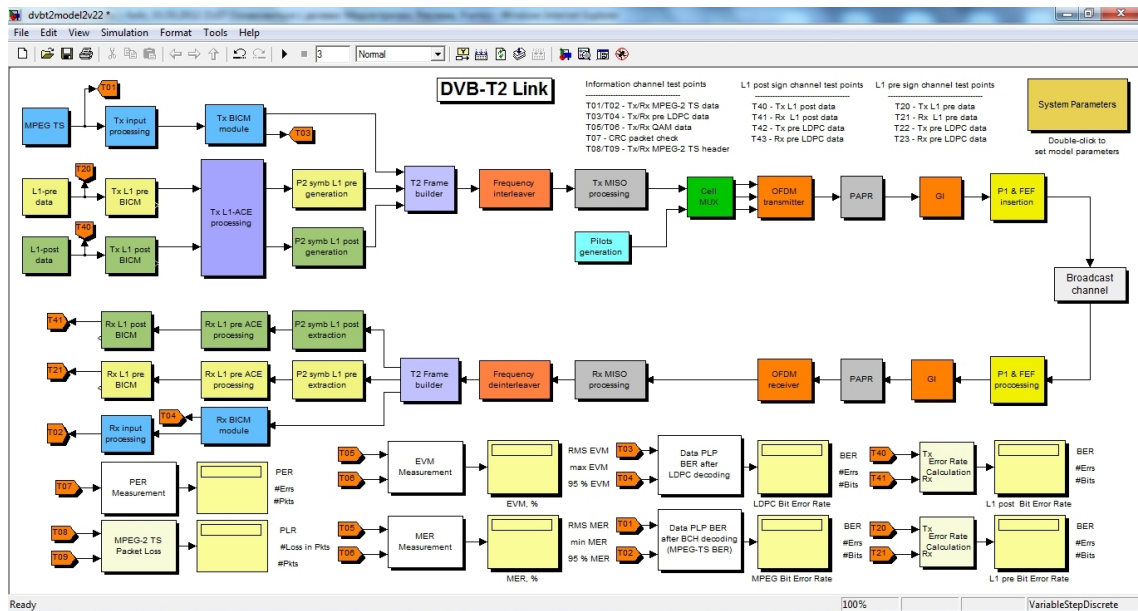


Рисунок 7 – Інтерфейс розробленої моделі системи DVB-T2

Оцінювані параметри. В моделі систем DVB-T та DVB-T2 за впливу АБГШ передбачено визначення таких параметрів, як коефіцієнт помилкових бітів (BER), коефіцієнт помилки модуляції (MER) та величина вектора помилки (EVM). Однак враховуючи те, що останні два параметри використовують зазвичай для аналізу сигнального сузір'я під час наявності квадратурних чи будь-яких інших спотворень подібного типу, вплив яких в цій статті не досліджується, їх оцінку дано не буде.

При передаванні цифрової інформації, кількість помилкових біт - це кількість прийнятих з каналу зв'язку бітів цифрового потоку, які були змінені за рахунок шуму, завади, спотворень або помилок синхронізації. Коефіцієнт помилкових біт (BER) – це кількість помилкових біт поділена на повну кількість переданих біт впродовж певного інтервалу часу спостереження. Коефіцієнт BER визначається відношенням між числом помилкових бітів і числом переданих бітів:

$$BER = \frac{\text{кількість помилкових бітів}}{\text{кількість переданих бітів}}$$

Коефіцієнт BER розглядають як приблизну оцінку вірогідності появи помилкових біт. Це наближення є точним при тривалому часі спостереження і достатньо великій кількості бітових помилок.

У системі DVB-T використовують каскадне включення двох каналних кодерів – кодера блокового коду Ріда-Соломона RS(204,188,8)(зовнішній код) та згорткового коду (внутрішній код) з базовою швидкістю 1/2 та можливістю підвищення інформаційної швидкості до значень швидкості коду 2/3, 3/4, 5/6 та 7/8.

Тому у системі DVB-T оцінюється три варіанти коефіцієнта BER:

- коефіцієнт BER перед декодером Вітербі (декодером згорткового коду);
- коефіцієнт BER після декодера Вітербі (перед декодером Ріда-Соломона);
- коефіцієнт BER після декодера Ріда-Соломона.

При вимірюванні кожний пакет транспортного потоку аналізують на наявність помилок. Якщо обмірюване значення BER перевищує 10^{-3} , то результати вимірювання розглядають як недостовірні.

У системі DVB-T2 також використовують каскадне включення двох каналних кодерів – кодера блокового коду Боуза-Чаудхурі-Хоквінгейма BCH (зовнішній код) та коду з низькою щільністю перевірок на парність LDPC (внутрішній код) з можливими значеннями швидкості коду 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6. Тому у системі DVB-T2 оцінюється три варіанти коефіцієнта BER:

- коефіцієнт BER перед декодером LDPC;
- коефіцієнт BER після декодера LDPC (перед декодером BCH);
- коефіцієнт BER після декодера BCH.

Для мінімізації впливу порогового ефекту необхідно забезпечити функціонування системи цифрового наземного телевізійного мовлення в квазібезпомилковому (QEF) режимі. За цього режиму система буде працювати при вірогідності помилки біту, що буде відповідати величині $BER \approx 10^{-11} \dots 10^{-12}$. Однак для оцінки такої вірогідності помилки необхідно аналізувати транспортний потік з виходу зовнішнього декодера досить тривалий час. Тому зазвичай аналізують вірогідність помилки біту на вході зовнішнього декодера. При цьому інтервал часу, на протязі якого необхідно аналізувати потік на наявність помилок, є меншим, а вимірювання може бути виконано за розумну тривалість часу з достатньою точністю.

При цьому якщо величина коефіцієнта помилок бітів після декодера Вітербі у системі DVB-T буде відповідати $BER \approx 2 \cdot 10^{-4}$, тоді на виході декодера Ріда-Соломона буде забезпечуватись $BER \approx 10^{-11} \dots 10^{-12}$ та система буде працювати в режимі QEF. Для системи DVB-T2 режим QEF буде забезпечено, якщо величина BER після декодера LDPC буде відповідати $BER \approx 1 \cdot 10^{-7}$, при цьому BER після декодера BCH буде дорівнювати приблизно $BER \approx 10^{-11} \dots 10^{-12}$. Враховуючи вищевикладене можна зробити висновки, що достатнім буде аналізувати лише величину BER після внутрішнього декодера в обох системах. Саме такий підхід й буде використано в цій статті.

Опис експерименту. Експеримент проводився в два етапи – на першому етапі аналізувались характеристики системи DVB-T, на другому – системи DVB-T2. Під час кожного з етапів спочатку визначалось порогове значення відношення носійне коливання/шум (C/N), за якого система цифрового мовлення працювала в режимі QEF. Потім для отримання всієї залежності BER після внутрішнього декодера відношення C/N поступово зменшувалось в діапазоні від порогового значення до величини приблизно 0,5. Після запуску моделі на виконання генерувалась псевдовипадкова послідовність, що підлягала оброблянню за алгоритмами, визначеними для кожного зі стандартів, а сформовані сигнали системи DVB-T та DVB-T2 подавали до каналу з АБГШ.

Кількість бітів з виходу зовнішнього декодера, яку обрано відповідно до рекомендованих значень [6], для обох системи відповідала величині приблизно $1 \cdot 10^6$ біт, що забезпечує статистично достовірні результати вимірювання. Отримані значення фіксувались у протоколі лабораторного дослідження. Під час інтерпретації результатів дослідження використано інтерполяцію кусковим кубічним поліномом Ерміта (PCHIP).

На рисунках 7 і 8 представлено отриману в процесі математичного моделювання залежність коефіцієнта BER після декодера Вітербі від відношення C/N в режимі системи DVB-T з методами модуляції ФМ-4, КАМ-16 та КАМ-64. Для системи DVB-T2 залежність коефіцієнта BER після декодера LDPC від відношення C/N в режимах системи DVB-T2 з методами модуляції ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64 та КАМ-256 представлено на рисунках 9 і 10. Окрім того, на рисунках пунктирною лінією позначено значення BER після внутрішнього декодера, що відповідає квазібезпомилковому режиму (QEF).

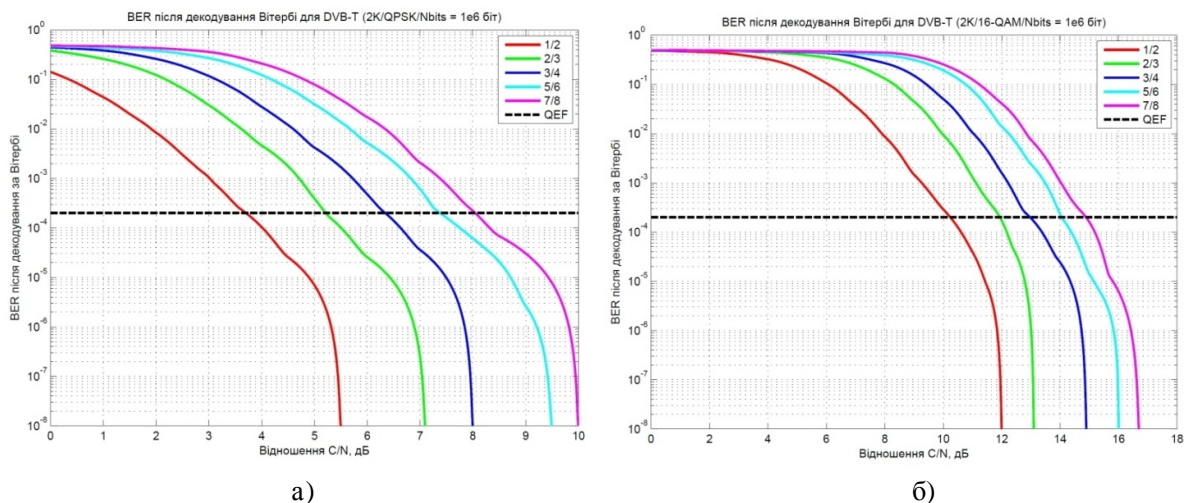


Рисунок 7– Залежність коефіцієнта BER після декодера Вітербі від відношення C/N в режимах системи DVB-T з методами модуляції ФМ-4 (а) та КАМ-16 (б)

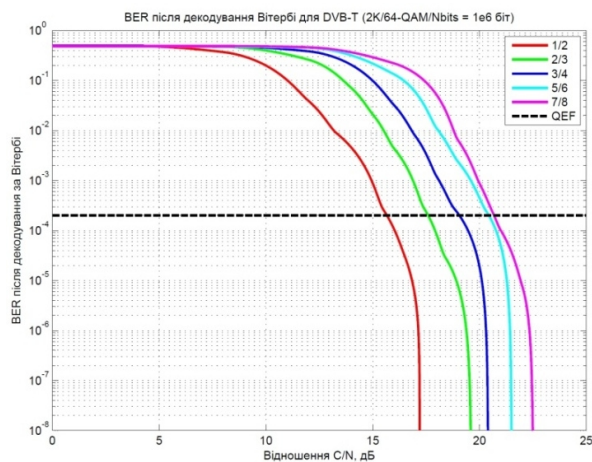
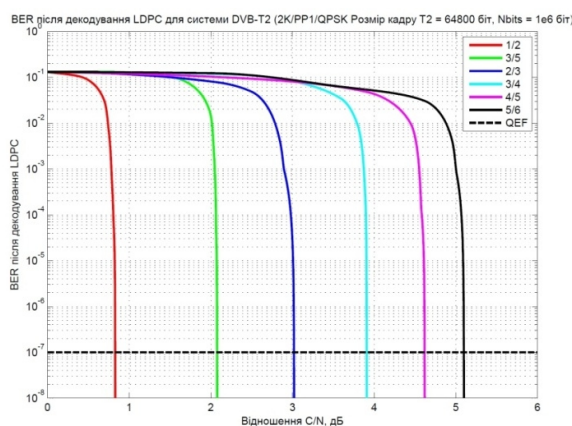
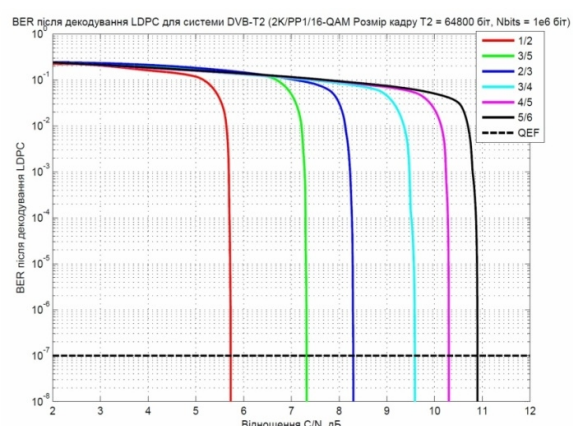


Рисунок 8– Залежність коефіцієнта BER після декодера Вітербі від відношення C/N в режимах системи DVB-T з методами модуляції КАМ-64

Проведемо порівняльний аналіз конфігурацій систем DVB-T та DVB-T2 за величинами порогових значень відношення C/N, за яких системи будуть функціонувати в режимі QEF. Під час цього аналізу порівнювати будемо конфігурації, за яких швидкість внутрішнього каналного коду (згорткового коду (CC) у системі DVB-T та коду LDPCу системі DVB-T2) та порядок модуляції будуть однаковими чи близькими.

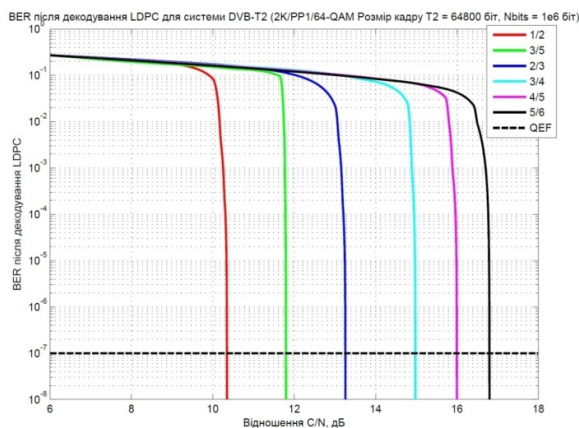


а)

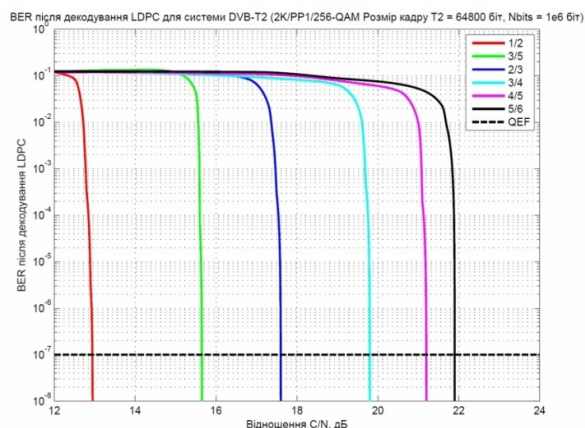


б)

Рисунок 9– Залежність коефіцієнта BER після декодераLDPC від відношення C/N в режимах системи DVB-T2 з методами модуляції ФМ-4 (а) та КАМ-16 (б)



а)



б)

Рисунок 10– Залежність коефіцієнта BER після декодераLDPC від відношення C/N в режимах системи DVB-T2 з методами модуляції КАМ-64 (а) та КАМ-256 (б)

Для характеристики ефективності систем будемо використовувати параметр $G_{C/N}$, що будемо визначати як різницю між пороговим значенням відношення C/Nу системи DVB-T та пороговим значенням відношення C/Nу системі DVB-T2. Результати аналізу представлено на рисунках 11–13.

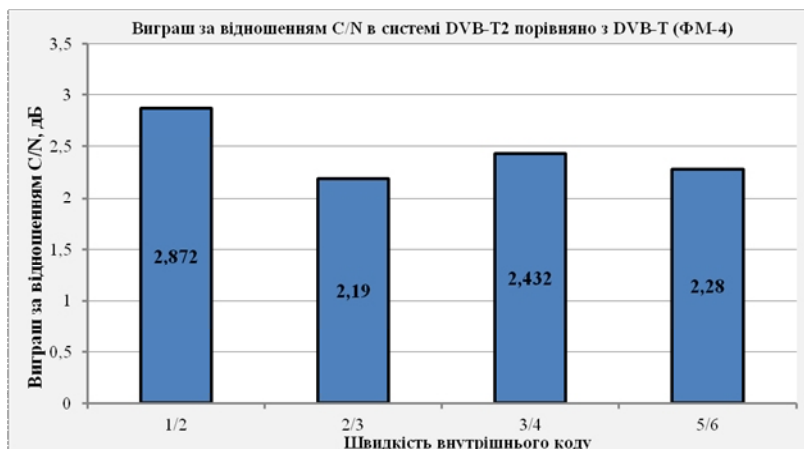


Рисунок 11 – Виграш за відношенням C/N у системі DVB-T2 порівняно з DVB-T за різних швидкостей внутрішнього коду та методу модуляції ФМ-4

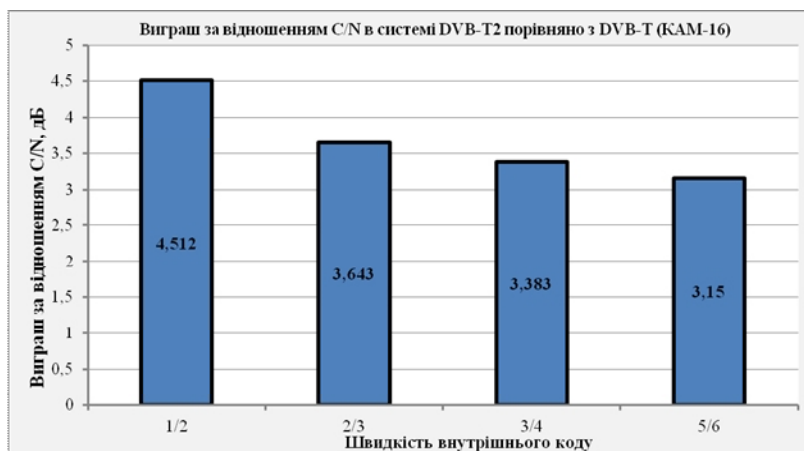


Рисунок 12 – Виграш за відношенням C/N у системі DVB-T2 порівняно з DVB-T за різних швидкостей внутрішнього коду та методу модуляції КАМ-16

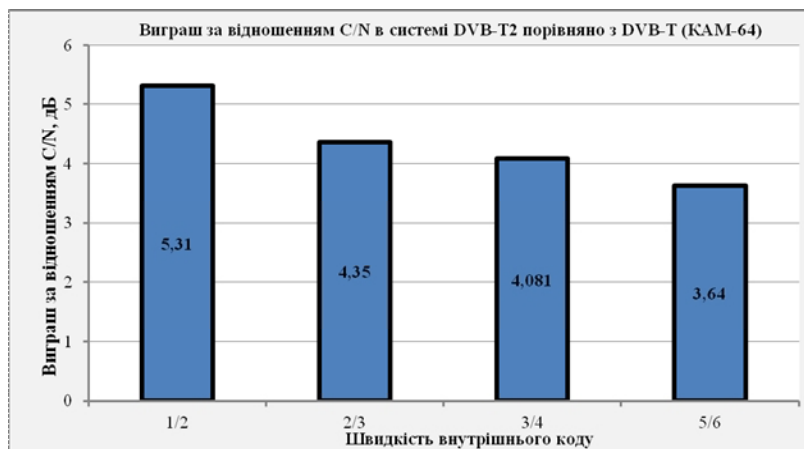


Рисунок 13 – Виграш за відношенням C/N у системі DVB-T2 порівняно з DVB-T за різних швидкостей внутрішнього коду та методу модуляції КАМ-64

З проведеного аналізу видно, що вираш за відношенням C/N при переході від системи DVB-T до DVB-T2 складає приблизно від 2,28–5,31 дБ в залежності від швидкості внутрішнього коду та методу модуляції. Конфігурація системи DVB-T2 з методом модуляції КАМ-256 не розглядалась внаслідок того, що у системі DVB-T цей метод модуляції не застосовують. Однак при практично однаковому відношенні C/N у системі DVB-T2 забезпечують швидкість цифрового потоку на приблизно 50 % вище, ніж у системі DVB-T.

ВИСНОВОК

Сьогодні система DVB-T2 продовжує динамічно розвиватись та удосконалюватись. Вже розширено можливість її застосування для доставляння сигналів мультимедійного мовлення до носимих та портативних приймачів за набору характеристик, визначених профілем DVB-T2 Lite. Все це обумовило динамічне впровадження цієї системи в Європі та світі – кількість країн, що обирають стандарт DVB-T2 як базовий чи інший стандарт на цифрове телевізійне мовлення в форматі телебачення стандартної та високої чіткості, непинно зростає. Система DVB-T2 за рахунок підвищення складності та гнучкості у виборі конфігурації тракту адаптації до наземного каналу розподілу програм мовлення забезпечує більш ефективне використання радіочастотного та енергетичного ресурсу, що дозволяє за певних умов або підвищити кількість програм мовлення в одному частотному каналі за приблизно того ж відношення C/N (тобто за приблизно тієї ж потужності передавача), або за тієї ж кількості програм в одному частотному каналі зменшити необхідне відношення C/N, за якого система буде працювати в квазібезпомилковому режимі. Можливість забезпечення такого компромісу дозволяє досягти необхідного ступеня ефективності за умов дії різних обмежуючих факторів.

Важливою складовою подальшого розвитку та більш ефективного впровадження систем цифрового телевізійного мовлення є дослідження їх характеристик за впливу різних спотворень та визначення оптимальних технічних рішень, що будуть забезпечувати покращення стійкості та ефективності окремих елементів тракту адаптації чи системи в цілому. Ефективним та гнучким інструментом для цього можуть виступати середовища імітаційного моделювання, серед яких можливо відзначити середовище Matlab. Вже сьогодні це середовище дозволяє реалізувати практично будь який функціональний блок обладнання та забезпечити первинну підготовку спеціалістів цифрового мовлення в найбільш ефективний спосіб, дозволяючи встановлювати будь-яку з можливих конфігурацій системи в моделі системи та проводити вимірювання параметрів, що підлягають контролю в наскрізному тракті системи без необхідності припинення мовлення та будь-яких інших експлуатаційних затрат. Розроблені та проаналізовані в цій статті моделі систем DVB-T та DVB-T2 вже впроваджено як навчальні макети низки дисциплін, а саме: "Цифрове телевізійне, мультимедійне та звукове мовлення" та "Аудіовізуальні системи та служби", що входять в перелік нормативних дисциплін в напрямі підготовки спеціалістів з цифрового мовлення в Навчально-науковому інституті радіо, телебачення, електроніки (ННІ РТЕ) ОНАЗ ім. А.С. Попова.

ЛІТЕРАТУРА

1. Веб-сайт мережі Інтернет Проекту DVB: www.dvb.org
2. Баляр В.Б., Гофайзен О.В Системи наземного цифрового телевізійного мовлення другого покоління: аспекти впровадження та вклад України в міжнародну стандартизацію / Баляр В.Б., Гофайзен О.В. // Зв'язок. – 2011 № 1/11. – с. 7-12.
3. Баляр В.Б., Гофайзен О.В. [Препринт] Технічні аспекти впровадження систем наземного цифрового телевізійного мовлення другого покоління в Україні на загальнонаціональному, регіональному та локальному рівнях. – 10 с.
4. Error-correction, data framing, modulation and emission methods for digital terrestrial television broadcasting: Recommendation ITU-R BT.1306-3. – Switzerland, Geneva: ITU, 2008. – 23 p.
5. Рекомендація ITU-R BT.1877-2010 Error-correction, data framing, modulation and emission methods for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems
6. ДСТУ ETSI TR 101 290:2004 "Цифрове телевізійне мовлення (DVB). Характеристики системи передавання. Настанови до вимірювання"
7. ДСТУ EN 300 744: 2004 "Цифрове телевізійне мовлення (DVB). Структура кадрів, каналне кодування та методи модуляції у системі цифрового наземного телебачення. Загальні технічні вимоги"
8. ДСТУ ETSI TR 101 190:2008 "Цифрове телевізійне мовлення. Принципи побудови розподільчих систем наземного ефірного мовлення"
9. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2): ETSI EN 302 755. – Sophia, France: ETSI, 2009. – 164 p.
10. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2): ETSI TR 102 831. – Sophia, France: ETSI, 2010. – 217 p.