

СИСТЕМА ПЕРЕДАВАННЯ ТА ПРИЙОМУ СИГНАЛУ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО МОВЛЕННЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

Авдєєнко Г.Л., Наритник Т.М., Буглак А.О.

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

E-mail: django2006@gmail.com

SYSTEM FOR TRANSMISSION AND RECEPTION OF TELEVISION BROADCAST SIGNAL IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

A variant of the layout of the DVB-S/S2 television broadcasting signal transmission and reception system in the terahertz frequency range is presented. The results of laboratory studies have shown the possibility of transmitting single- and multiprogram high-definition (HD) streams in 2K and 4K formats through this system.

На сьогоднішній день в світі завдяки прогресу в галузі мікроелектроніки та практичного освоєння окремих ділянок діапазону міліметрових хвиль (30-300 ГГц) спостерігається поступовий перехід до впровадження технологій мобільного зв'язку 5G, які потенційно будуть здатні забезпечити абонентам мережі швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с та часову затримку на рівні 5...20 мс. Також, на теперішній час такими провідними виробниками обладнання для радіорелейних ліній зв'язку (РРЛЗ) як SAF Tehnika, Ceragon та ін. розроблено лінійку радіорелейних станцій Е-діапазону (71-76 ГГц, 81-86 ГГц), які здатні забезпечити передавання та прийом інформаційних потоків на швидкості до 10 Гбіт/с при частотній смузі стовбура 2000 МГц та модуляції 128-QAM на відстань до кількох кілометрів, що цілком достатньо для того, щоб побудувати в межах великих міст транспортну мережу для з'єднання між собою базових станцій мережі 5G [1,2]. Крім того, такі РРЛЗ можуть розглядатися як альтернатива прокладанню волоконно-оптичних ліній зв'язку або їх резервування.

Велика увага вчених провідних країн світу останні кілька десятиліть також спрямована на дослідження та освоєння в різних сферах людської діяльності (бездротовий зв'язок, радіолокація, медицина тощо) короткохвильової частини діапазону міліметрових хвиль ($f > 100$ ГГц), яку прийнято також відносити до терагерцового діапазону (0,1 – 10 ТГц). У цьому діапазоні вже розроблено низьку макетних зразків бездротової передачі інформації, які на безліцензійній основі здатні забезпечувати завадозахищену передачу інформаційних потоків в мережах типу «точка-точка», «точка-багатоточка» зі швидкістю кілька одиниць-десятків Гбіт/с в межах прямої видимості на відстань до 2...3 км. Наприклад, в роботі [3] представлено макет терагерцової системи зв'язку, яка функціонує в діапазоні 210...230 ГГц і яка здатна передавати цифровий потік даних на швидкості до 2 Гбіт/с на відстань біля 2,03 км при потужності передавача 200 мВт. Варто відмітити, що переважна більшість сучасних публікацій з проектування дослідних зразків бездротових ліній зв'язку терагерцового діапазону, що представлена в науковій літературі [3,4], базується

на застосуванні оптоелектронного перетворення високостабільних лазерних випромінювань для формування в терагерцовому діапазоні (ТГц) високостабільного несучого коливання гетеродину та його модуляції за допомогою оптичних модуляторів Маха-Цендера для формування модульованого радіосигналу ТГц діапазону.

У даних тезах на відміну від публікацій [3,4] представлено розроблений науковцями кафедри ТК НН ІТС варіант макету системи передавання та прийому сигналу телевізійного мовлення стандарту DVB-S/S2 діапазону 130 ТГц, в якому передавальний та приймальний модуль реалізовано з використанням гетеродинів, несуча частота яких $f = 64,8$ ТГц сформована шляхом послідовного множення частоти термостатованого опорного кварцевого генератора NI-100M-2900 з вихідною частотою $f_0 = 100$ МГц та відносною нестабільністю частоти $\delta f = 5 \cdot 10^{-8}$ в 648 разів (Рис.1).

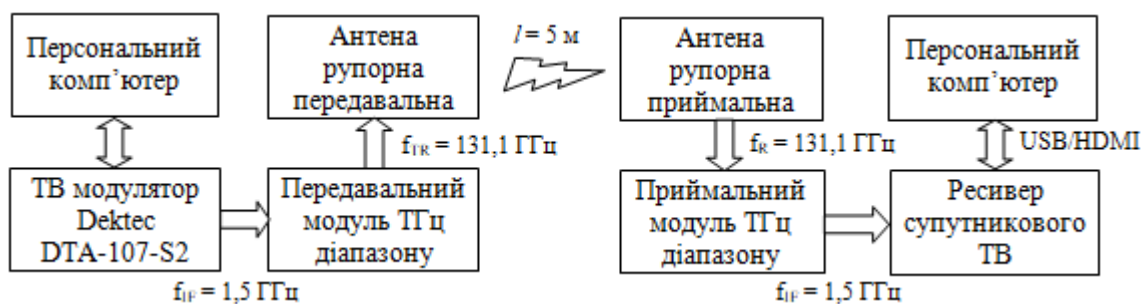


Рис.1. Структурна схема макету системи передавання та прийому сигналу ТВ мовлення стандарту DVB-S/S2.

Формування радіосигналу ТГц діапазону з несучою частотою $f_{TR} = 131,1$ ТГц на передавальній стороні макету (рис.1) здійснювалось шляхом перетворення по частоті радіосигналу ТВ мовлення стандарту DVB-S/S2, який генерувався на несучій частоті $f_{IF} = 1,5$ ТГц за допомогою PCI-плати ТВ модулятора Dektec DTA-107-S2, яка була підключена до материнської плати персонального комп'ютера, з одно- або багатопрограмного потоку ТВ мовлення стандарту стиснення H.264, який був попередньо записаний на SSD-диск ПК у вигляді файлу з розширенням *.ts. Також файл тестового транспортного потоку для ТВ модулятора Dektec може бути сформований з будь-якого відеозапису ТВ програми або відеоконтенту (наприклад, попередньо завантаженого з Youtube) за допомогою функціоналу програмного застосунку ffmpeg [5] відповідно до рис.2.

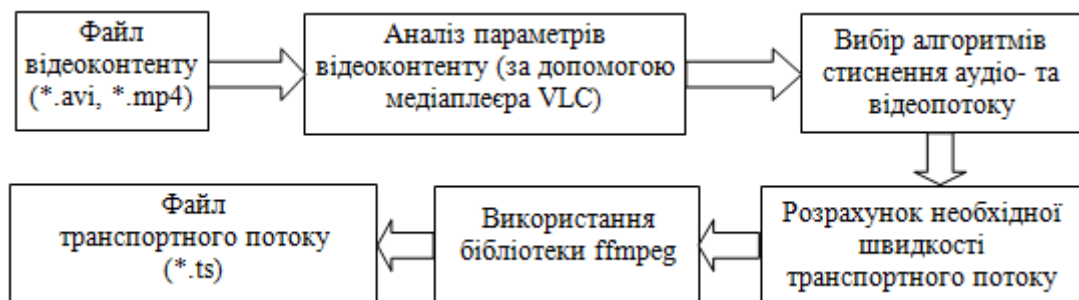


Рис.2. Формування транспортного потоку для ТВ модулятора Dektec за допомогою програмного застосунку ffmpeg.

Для контролю параметрів сформованого на проміжній частоті $f_{IF} = 1,5$ ГГц ТВ модулятором Dektec за допомогою програмного забезпечення StreamXpress (рис.3) радіосигналу ТВ мовлення стандарту DVB-S/S2, з другого ВЧ-виходу PCI-плати модулятора сигнал подавався на ВЧ-вхід PCI-плати супутникового ресивера OMICOM S2, який був доданий до материнської плати ПК передавальної сторони і який контролювався програмним пакетом CrazyScan [6] (рис.4).

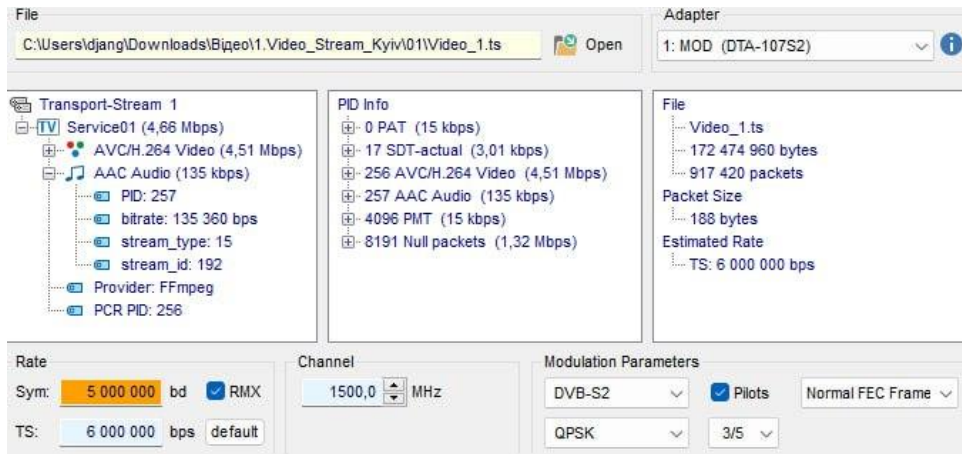


Рис.3. Вікно програмного пакету StreamXpress для формування модулятором Dektec радіосигналу ТВ мовлення стандарту DVB-S/S2 на проміжній частоті 1,5 ГГц.

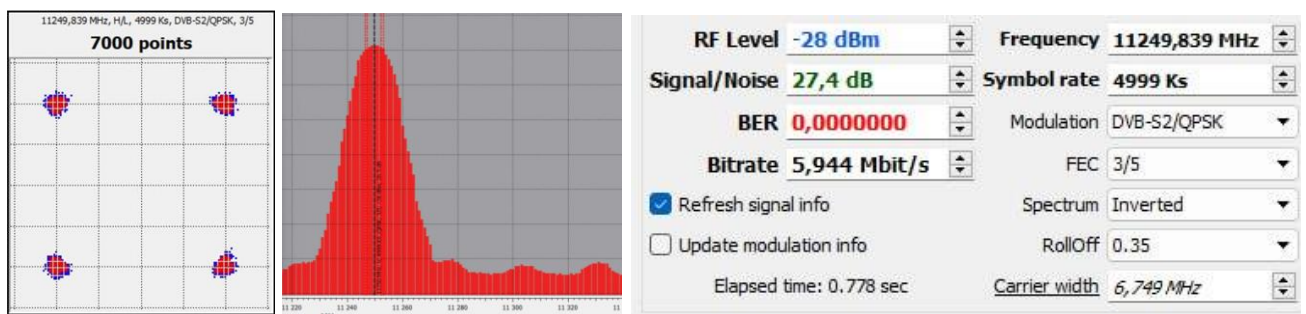


Рис.4. Вікно програмного пакету CrazyScan для контролю параметрів сформованого радіосигналу ТВ мовлення стандарту DVB-S/S2 на проміжній частоті 1,5 ГГц.

Сформований радіосигнал ТГц діапазону з вихідною потужністю -13дБм та несучою частотою 131,1 ГГц випромінювався за допомогою конічної рупорної антени в лабораторних умовах в напрямку приймальної частини макету, яка була розташована на відстані біля 5 м від передавальної (рис.5). Прийом радіосигналу ТГц діапазону здійснювався за допомогою рупорної антени та приймального модуля ТГц діапазону, який виконував перетворення частоти несучої $f_{TR} = 131,1$ ГГц на проміжну несучу $f_{IF} = 1,5$ ГГц (рис.6). Далі радіосигнал проміжної частоти надходив на ВЧ-вхід стандартного ресиверу (тюнеру) супутникового ТВ мовлення, який через інтерфейс HDMI підключався до телевізора або за допомогою конвертора HDMI/USB до ПК, в якому відеозображення та звуковий супровід переданої ТВ програми відтворювалися за допомогою медіаплеєра VLC або PotPlayer. Крім того, для контролю параметрів прийнятого ТВ сигналу стандарту DVB-S/S2 через 3-х каналний дільник потужності ТВ сигналу до виходу приймального модуля ТГц підключався аналізатор спектра Signal Hound USB-SA44B та контрольний ресивер Prof7500.

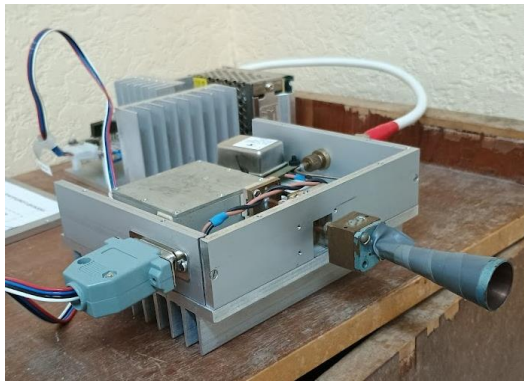


Рис.5. Фотографія передавального модуля ТГц діапазону.



Рис.6. Фотографія приймального модуля ТГц діапазону.

На рис.7 зображено спектр та сигнальне сузір'я, а на рис.8 параметри прийнятого радіосигналу ТВ мовлення з несучою частотою $f_{IF} = 1,5$ ГГц на виході приймального модуля ТГц діапазону.

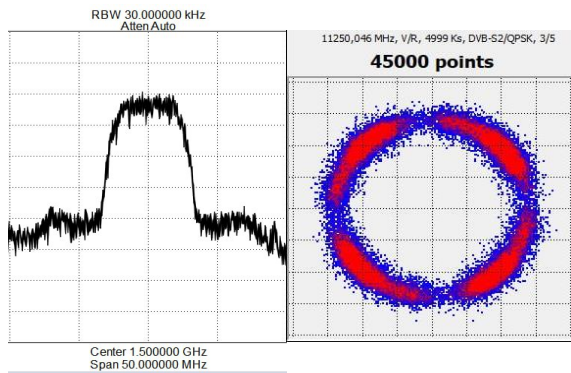


Рис.7. Спектр та сигнальне сузір'я прийнятого радіосигналу на приймальній стороні макету.

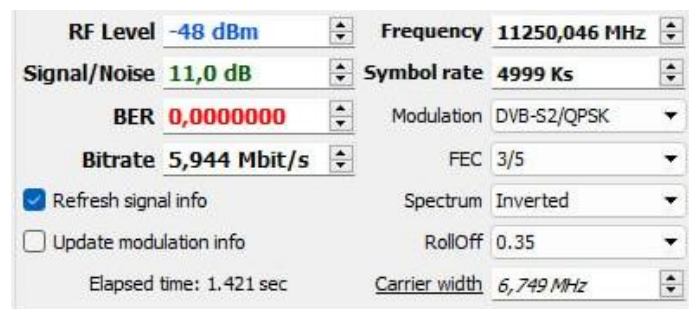


Рис.8. Параметри прийнятого радіосигналу на приймальній стороні макету.

Порівняння отриманих параметрів радіосигналу ТВ мовлення на вході передавального та виході приймального модулів ТГц діапазону (рис.4, рис.7, рис.8) показує, що сигнальне сузір'я модуляції QPSK на приймальній стороні спотворене фазовими шумами, відношення сигнал/шум зменшилось з 27 дБ до 11 дБ, проте ймовірність бітової помилки BER залишилась на рівні 10^{-7} , що було достатнім для якісного відтворення зображення ТВ програми без спотворень.

Література

1. Integra-E series. URL: <https://old.saftehnika.com/en/integrae> (дата звернення: 18.03.2025).
2. EtherHaul Kilo 8000 Series URL: <https://www.ceragon.com/products/etherhaul-kilo-8000> (дата звернення: 18.03.2025).
3. Sen, P., Siles, J.V., Thawdar, N. et al. Multi-kilometre and multi-gigabit-per-second sub-terahertz communications for wireless backhaul applications. Nat Electron 6, 164–175 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41928-022-00897-6>
4. H. Avdieienko, A. Slyvka, O. Dykyi. Terahertz communication systems for high-definition and ultra-high-definition television transmission. Information and telecommunication sciences - 2022. - Vol.13. - №1. - pp. 4-13.
5. FFmpeg. URL: <https://www.ffmpeg.org/> (дата звернення 18.03.2025р).
6. CrazyScan. URL: <https://sourceforge.net/projects/crazyscan/> (дата звернення 18.03.2025р).