

УДК 621.396.43

ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ ДЛЯ ПРИЙОМОПЕРЕДАВАЧА БЕЗПРОВОДОВОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ФІКСОВАНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ



[Г.Л. Авдєєнко](#), [М.Ю. Ільченко](#), [Т.М. Наритник](#), [А.В. Єрмаков](#),
[О.В. Лутчак](#)

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

Abstract – Results of simulation and development of the frequency converter for the study of DVB-S standard satellite TV signal parameters change during its transmission through the prototype of the terahertz range transceiver of new fixed service wireless telecommunication system are presented. The proposed frequency converter consist of double balanced mixer, frequency synthesizer, bandpass filter and RF amplifier. The analysis of the obtained results testifies possibility of broadband signals transmission with a low level of distortion through the prototype of terahertz range transceiver. These results in the future also open up the possibility to investigate the distortion of ultra-wideband signals in time domain when its transmitted through this prototype. This work can be useful for developers of telecommunication equipment such as radio relay communication and satellite communication systems.

Анотація – Представлено результати імітаційного моделювання та розробки перетворювача частоти для дослідження зміни параметрів сигналу цифрового супутникового телебачення стандарту DVB-S при його передаванні через вітчизняний дослідний зразок прийомопередавача нової безпроводової телекомунікаційної системи фіксованого зв'язку терагерцового діапазону. Аналіз отриманих результатів свідчить про можливість передавання через дослідний зразок прийомопередавача терагерцового діапазону широкополосних сигналів з малим рівнем спотворень, що в майбутньому відкриває можливість й для дослідження спотворень часової форми надширокополосних сигналів при їх передаванні через цей дослідний зразок.

Аннотация – Представлены результаты имитационного моделирования и разработки преобразователя частоты для исследования изменения параметров сигнала цифрового спутникового телевидения стандарта DVB-S при его передаче через отечественный опытный образец приемопередатчика новой беспроводной телекоммуникационной системы фиксированной связи терагерцового диапазона. Анализ полученных результатов свидетельствует о возможности передачи через опытный образец приемопередатчика терагерцового диапазона широкополосных сигналов с малым уровнем искажений, что в будущем открывает возможность и для исследования искажений временной формы сверхширокополосных сигналов при их передаче через этот опытный образец.

Вступ

Однією із перспективних сфер застосування терагерцових технологій є системи телекомунікацій [1-9]. Зокрема в телекомунікаціях передбачається створення принципово нових за габаритами, заводозахищеністю та енергоефективністю пристроїв терагерцового діапазону, а саме: для транспортних мереж мобільного зв'язку четвер-

того (4G) та п'ятого (5G) поколінь, для безпроводових систем високошвидкісної передачі відеосигналів високої (HDTV) та надвисокої (UHDTV) чіткості, для побудови надвисокошвидкісних радіорелейних систем прямої видимості, для високоточного виявлення та розпізнавання малорозмірних рухомих цілей і для сенсорів з метою отримання більш точної та детальної оперативної інформації про стан контрольованого об'єкта або місцевості. Також останні десятиріччя терагерцові технології знаходять своє місце й в медицині.

В технологіях стільникового зв'язку LTE (4G, 5G) задля забезпечення високих швидкостей передачі інформації до та від абонента потрібна величезна смуга частот як абонентських радіоканалів, так і каналів транспортної мережі, що є одним з головних факторів, який обмежує поширення даних технологій. Одним з рішень для побудови транспортних мереж мобільного зв'язку 4G та 5G є використання телекомунікаційних систем фіксованого радіозв'язку терагерцового діапазону та перехід на малі стільники (мікростільники, піко- і фемтостільники), які являють собою базові станції з обмеженим радіусом дії і які встановлюються для розширення зони покриття базових станцій макрорівня. Маючи невелику дальність передачі, ці малі стільники дозволять задіяти технології багаторазового використання частот для більш ефективного використання доступного спектру. Системи малих стільників з часом можуть стати основою стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G). Малі стільники теоретично можуть працювати в терагерцовому діапазоні, що дозволить отримати безцінний спектр, необхідний для розширення зони покриття та надання сучасних високошвидкісних телекомунікаційних сервісів [1-9].

В 2015-2016 році в НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» на базі Науково-дослідного інституту телекомунікацій у кооперації з Інститутом електроніки та зв'язку Української Академії Наук за рахунок видатків державного бюджету була виконана науково-дослідна робота №2846п «Розробка радіолінії із гігабітною пропускнуою здатністю терагерцового діапазону для надвисокошвидкісних розподільчих мереж доступу» (номер держ. реєстрації 0115U002330). В результаті виконання вказаної науково-дослідної роботи на базі сучасних досягнень в мікроелектроніці розроблено схематичне рішення з побудови радіорелейної системи терагерцового діапазону, проведено імітаційне моделювання основних функціональних вузлів її приймальнопередавального тракту, спроектовано та виготовлено дослідний зразок прийомопередавача цифрової симплексної радіорелейної лінії терагерцового діапазону частот 130–132 ГГц [10].

Для дослідження працездатності вищевказаного прийомопередавача було розроблено перетворювач частоти, що дозволив виконати перенесення сигналу стандарту цифрового супутникового телебачення стандарту DVB-S, що має символічну швидкість 27,5 Мсимв/с та ширину спектра $\Delta f = 36$ МГц з проміжною частотою $f_{пч1} = 70$ МГц на проміжну частоту $f_{пч2} = 1960$ МГц й передати його через прийомопередавач терагерцового діапазону, вимірявши при цьому зміну параметрів сигналу DVB-S.

Метою даної роботи є розгляд результатів імітаційного моделювання та експериментальних досліджень з передавання сигналу стандарту DVB-S через дослідний

зразок прийомопередавача терагерцового діапазону при використанні розробленого перетворювача частоти. Головний науковий результат роботи, отриманий авторами, полягає в тому, що за допомогою розробленого перетворювача частоти вперше в Україні вдалось довести можливість надійного передавання сигналів з цифровою модуляцією (в даному випадку на прикладі сигналу стандарту DVB-S) по приймальнопередавальному тракту терагерцового діапазону в умовах впливу на нього фазового шуму гетеродину прийомопередавача, а також лінійних та нелінійних спотворень цього тракту.

Основна частина

Розроблена імітаційна модель перетворювача частоти (рис. 1) для прийомопередавача ТГц діапазону складається з кільцевого діодного змішувача (рис. 2) MIXER_B, ВЧ генератору TONE, смугового фільтру LIN_S та високочастотних підсилювачів AMP_B (рис. 1). Моделювання перетворювача частоти було виконане в програмному середовищі Microwave Office для наступних його параметрів:

1. Частота вхідного сигналу $f_{ПЧ1} = 70$ МГц;
2. Частота гетеродинного входу $f_{гет} = 1890$ МГц;
3. Потужність вхідного сигналу $P_{вх} = -40 \dots -10$ дБм;
4. Потужність гетеродину $P_{гет} = -10 \dots 13$ дБм;
5. Придушення завади дзеркального каналу 1820 МГц $D_{дзерк} \geq 40$ дБ;
6. Придушення частоти гетеродину 1890 МГц, $D_{гет} \geq 40$ дБ;
7. Вихідна проміжна частота $f_{ПЧ2} = 1960$ МГц;
8. Розв'язка між входом гетеродину та входом сигналу не менше 20 дБ;
9. Розв'язка між входом сигналу і входом гетеродину не менше 15 дБ;
10. Розв'язка між виходом проміжної частоти і сигнальним входом не менше 30 дБ;
11. Розв'язка між виходом проміжної частоти і входом гетеродину не менше 30 дБ.

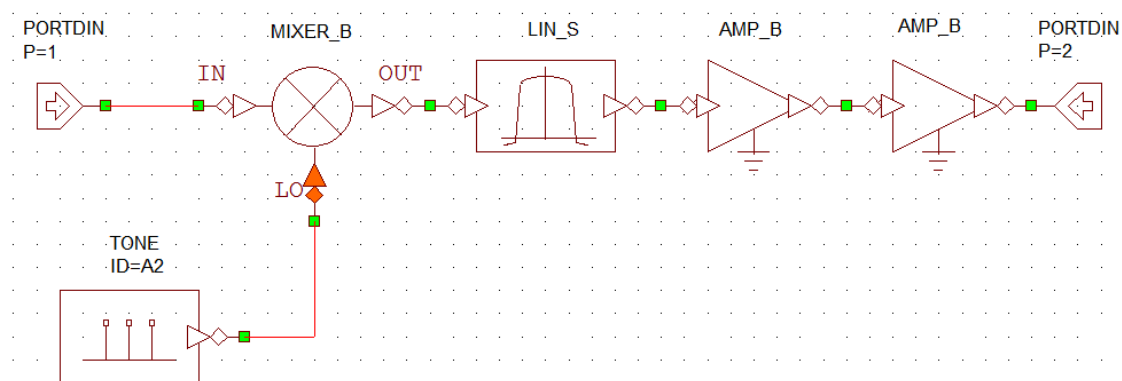


Рис. 1. Імітаційна модель перетворювача частоти у складі змішувача, гетеродину, смугового фільтру, підсилювача, дільника потужності

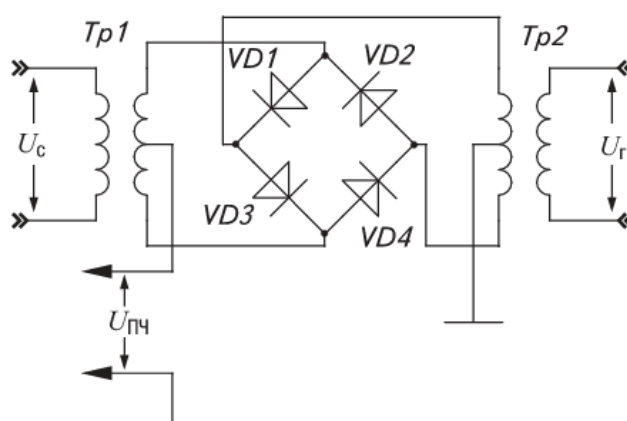


Рис. 2. Електрична схема кільцевого діодного змішувача

На рис. 3 зображено спектр сигналів на виході кільцевого діодного змішувача імітаційної моделі на рис.1. при перетворенні частоти «вгору».

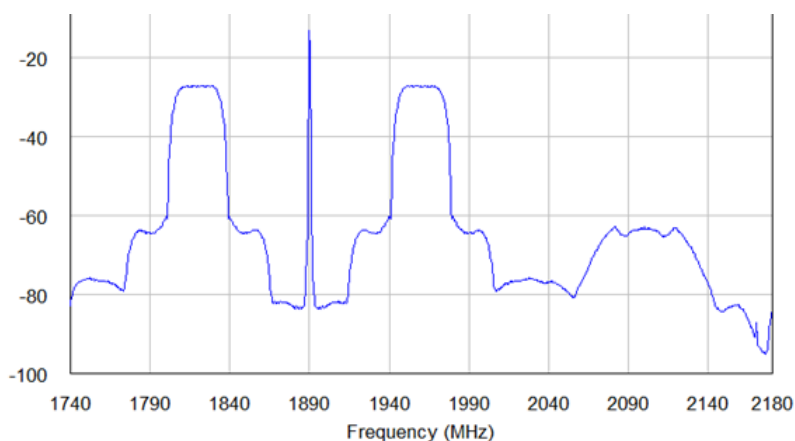


Рис. 3. Спектри сигналів на виході кільцевого діодного змішувача

В якості імітаційної моделі смугопропускнуго фільтру обрано модель фільтру на зосереджених реактивних елементах (рис. 4) з АЧХ Батерворта (рис. 5), що був синтезований за допомогою утиліти iFilter, яка входить до складу САПР Microwave Office. Смуга пропускання цього фільтру складає 50 МГц, а втрати в смузі пропускання – біля 6 дБ. При цьому на виході фільтру придушення потужності гетеродину $f_{\text{гет}} = 1890$ МГц складає біля 60 дБ, а дзеркального каналу з частотою $f_{\text{дз}} = f_{\text{гет}} - f_{\text{пч1}} = 1820$ МГц – не менше 80 дБ.

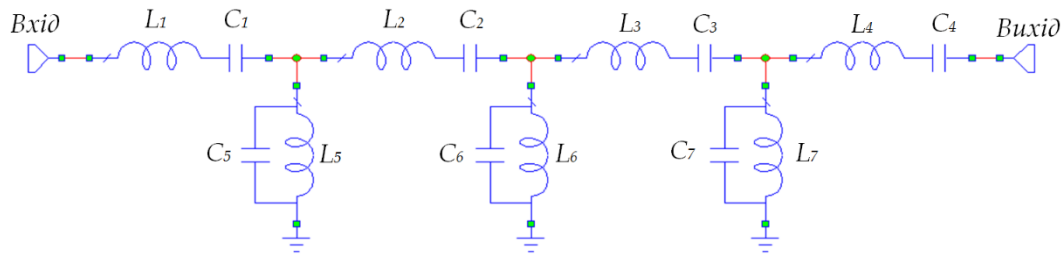


Рис. 4. Модель смугопропускнуго фільтру на зосереджених елементах

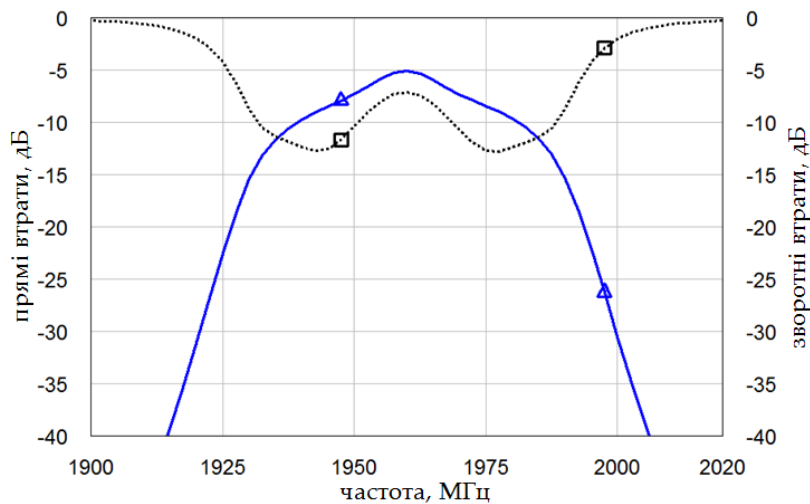


Рис. 5. АЧХ фільтру з центральною частотою 1.96 ГГц

Після смугопропускнуго фільтру додано два підсилювачі з коефіцієнтом підсилення по 12 дБ кожен та ділянку потужності з втратами 3 дБ. Остаточний відфільтрований DVB-S сигнал на виході імітаційної моделі перетворювача частоти зображено на рис. 6.

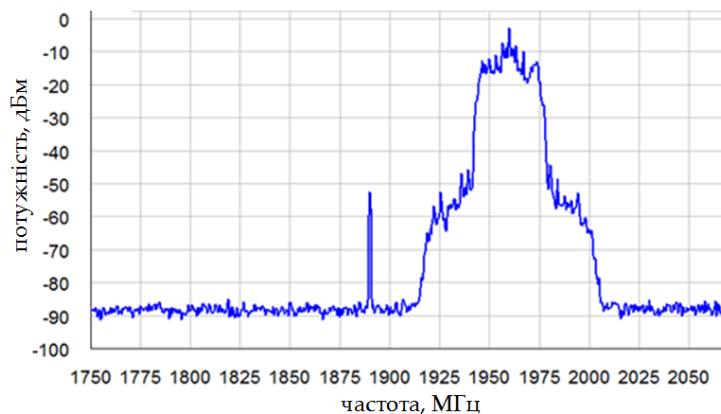


Рис. 6 Спектр сигналу DVB-S частотою 1,96 ГГц на виході фільтру

Структурна схема розробленого перетворювача частоти для прийомопередавача терагерцового діапазону показано на рис. 7.

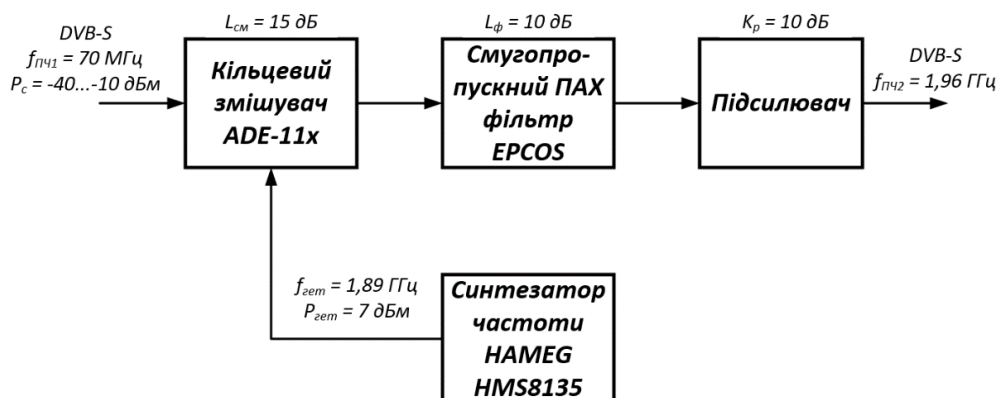


Рис. 7. Структурна схема розробленого перетворювача частоти

В якості змішувача частоти було використано ІМС широкосмугового кільцевого діодного змішувача ADE-11x фірми Mini-Circuits, що працює в діапазоні 10 – 2000 МГц, а в якості гетеродину – синтезатор частоти HAMEG HMS8135. Смугопропускний фільтр був реалізований на базі двох ІМС фільтру на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) фірми EPCOS з центральною частотою 1960 МГц, а підсилювач частоти на базі ІМС AG602 фірми TriQuint.

На рис. 8 показано місце перетворювача частоти в складі лабораторної установки для дослідження працездатності дослідного зразка передавача та приймача терагерцового діапазону зі складу прийомопередавача терагерцового діапазону, що сполучені між собою хвилеводною лінією з прямокутним перерізом $1,6 \times 0,8$ мм². При цьому в якості джерела сигналу DVB-S виступав модулятор DVB-3030 Radyne Comstream, на вхід якого в свою чергу поступав транспортний потік від професійного приймача супутникового телебачення IRD-2600 CODICO SCOPUS. В якості вимірювача параметрів ТВ сигналів виступав прилад ST-2 ROVER.

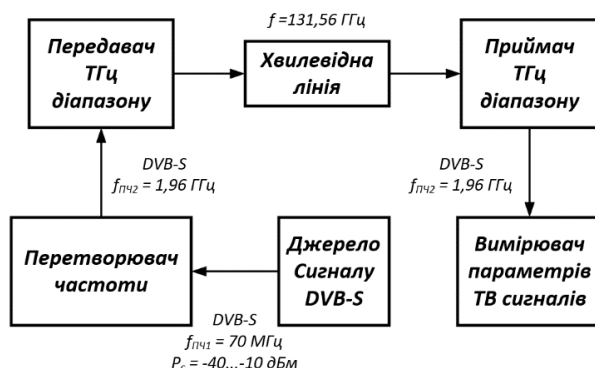


Рис. 8. Структурна схема для дослідження працездатності прийомопередавача ТГц діапазону за допомогою перетворювача частоти

Відповідно до рис. 9, до складу прийомопередавача терагерцового діапазону входять: 1) гетеродин у складі прецизійного кварцевого генератору з частотою 100 МГц, помножувачі частоти та дільник потужності; 2) передавач та приймач у складі подвоювача частоти гетеродину, субгармонійного діодного змішувача, смугопропускного фільтру та підсилювача проміжної частоти. При цьому діапазон проміжних частот по входу передавача та виходу приймача складає від 1 до 2 ГГц.

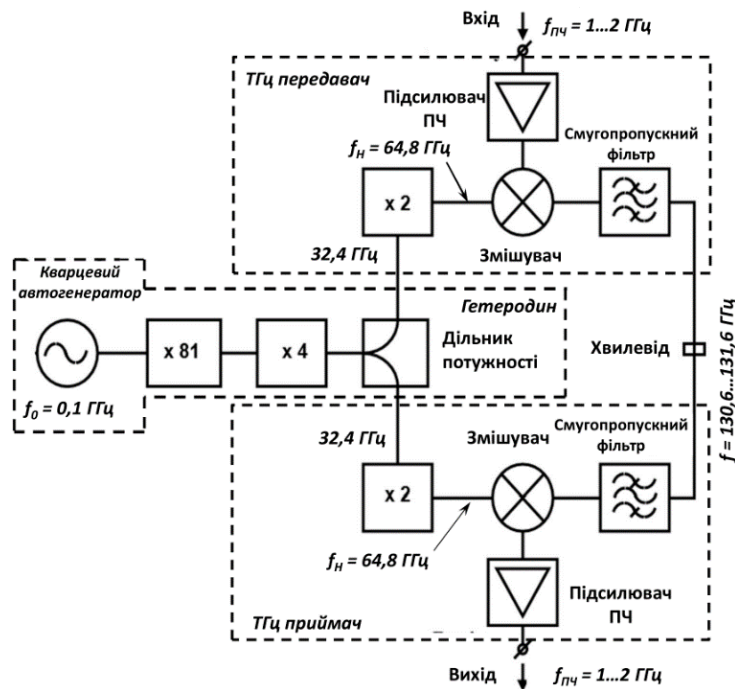


Рис. 9. Структурна схема дослідного зразка прийомопередавача ТГц діапазону

На рис. 10 зображено спектр сигналу на виході кільцевого змішувача ADE-11x перетворювача частоти, а на рис. 11 та рис. 12 відповідно спектр сигналу DVB-S на виході смугопропускного фільтру в масштабі 70 МГц/поділку та 5 МГц/поділку.

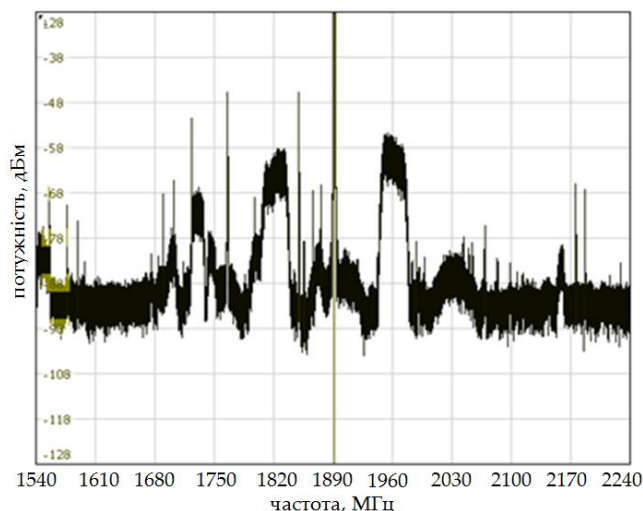


Рис. 10. Результати дослідження спектру сигналу DVB-S на частоті 1,96 ГГц до проходження смугового ПАХ фільтру

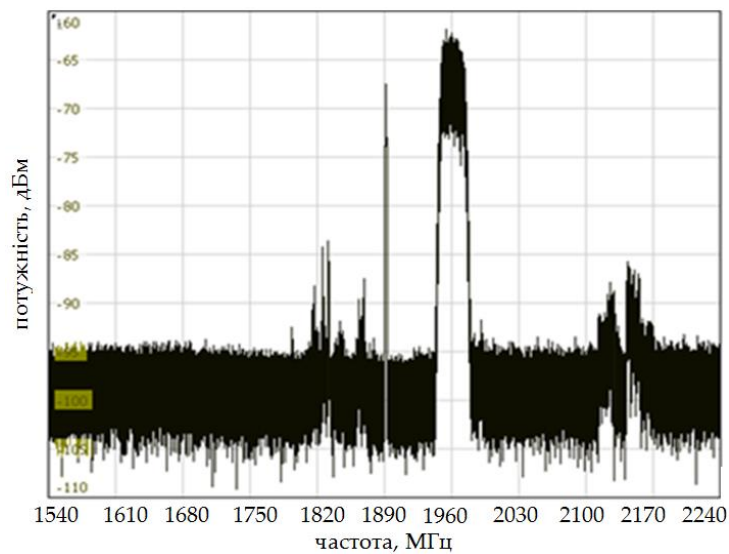


Рис. 11. Результати дослідження спектру сигналу DVB-S на частоті 1.96 ГГц після проходження смугового ПАХ фільтру

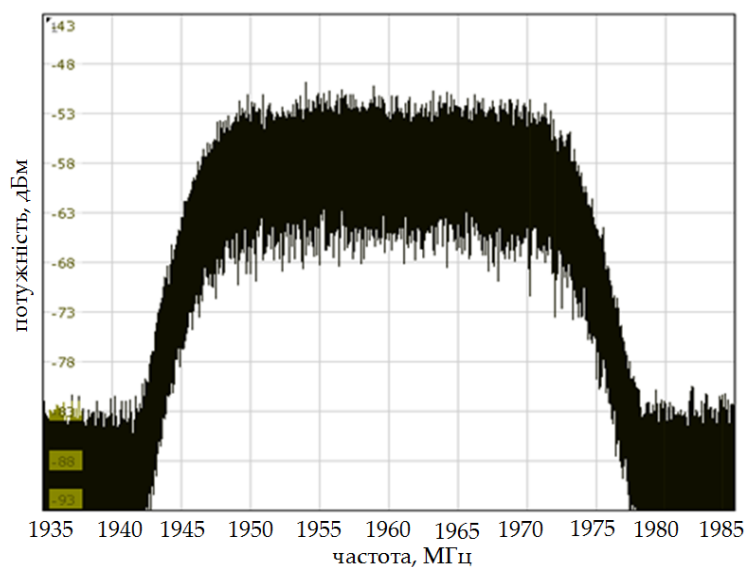


Рис. 12. Результати дослідження спектру сигналу DVB-S на частоті 1,96 ГГц на виході приймача терагерцового діапазону

Як видно з порівняння рис. 10 та рис. 11, придушення дзеркального каналу на частоті 1820 МГц та коливання гетеродину на частоті 1890 МГц складає не менше 40 дБ.

Основні параметри сигналу стандарту DVB-S, перенесеного за допомогою змішувача на частоту 1960 МГц, які виміряні в різних ланках схеми на рис. 8 з використанням ST-2 ROVER, зведені до табл. 1.

Таблиця 1. Параметри сигналу DVB-S з частотою 1.96 ГГц

| На виході | N.MAR, дБм | MER, дБм | EVM, % | bBER | aBER | PWR, дБм |
|---|---------------|-------------|--------|-------------------|------------|-------------|
| змішувача частоти | 11 | 17,4 | 14 | 10^{-6} | $<10^{-8}$ | -25,2 |
| смугопропускного ПАХ фільтра | 9,5 | 15,9 | 17 | 10^{-6} | $<10^{-8}$ | -43,9 |
| адаптера живлення підсилювача | 10,9 | 16,8 | 14 | $2 \cdot 10^{-6}$ | $<10^{-8}$ | -21,4 |
| спрямованого відга- лужувача передавача ТГц діапазону | 10,7 | 16,5 | 15 | 10^{-6} | $<10^{-8}$ | -24,7 |
| приймача ТГц діапазону | 8,3 | 14,6 | 19 | $2 \cdot 10^{-6}$ | $<10^{-8}$ | -40,9 |

Аналіз отриманих результатів показав, що дослідний зразок прийомопередавача терагерцового діапазону здатен передавати та приймати сигнал DVB-S з деякими спотвореннями, що чисельно виражаються у зменшенні параметру запасу завадостійкості N.MARG з 10,7 дБ на вході передавача до 8,3 дБ на виході приймача, що можна вважати непоганим результатом.

В свою чергу, в роботі [11] відображено результати успішних випробувань з передавання групового сигналу стандартів DVB-S/S2 (рис. 13), сформованому на виході конвертору приймальної антени системи супутникового телебачення, через дослідний зразок прийомопередавача терагерцового діапазону.

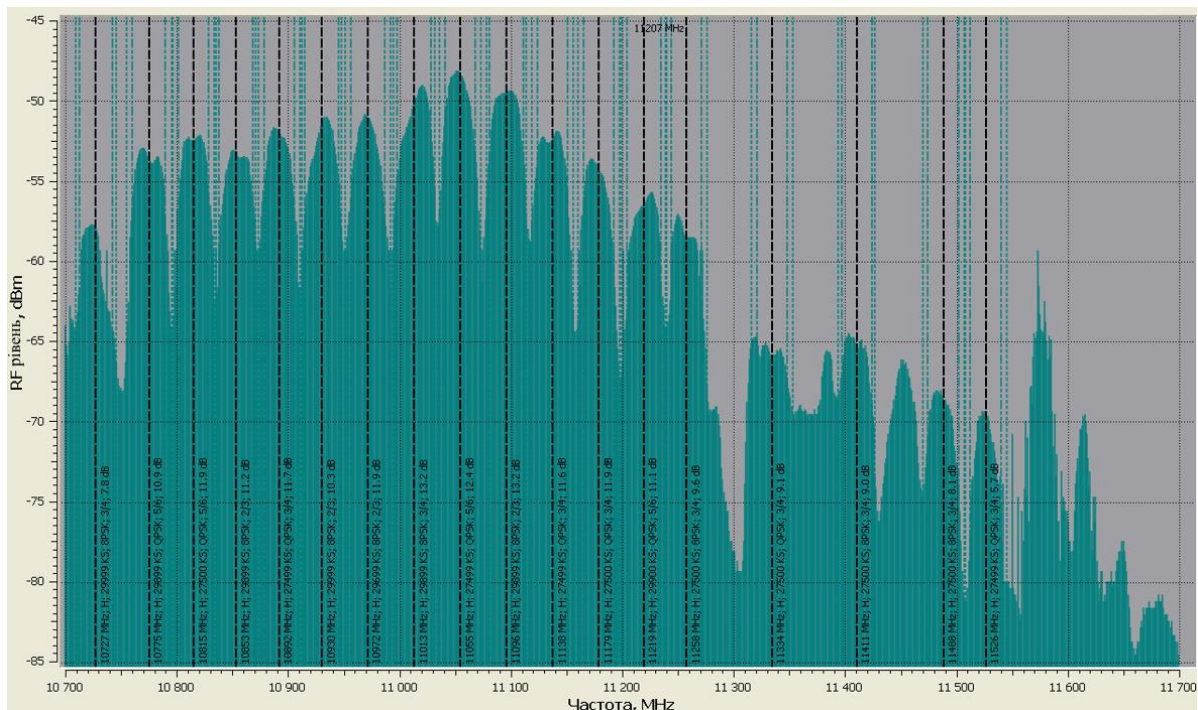


Рис. 13. Груповий сигнал стандартів DVB-S/S2 від супутника Hot Bird (13E), що передавався через прийомопередавач терагерцового діапазону на виході приймача

Вказаний груповий сигнал на виході супутникового конвертору мав смугу проміжних частот 0,977 – 1,95 ГГц та складався з 22-х сигналів з швидкістю $V = 27,5$ Мсимв/с, з яких половина передається у стандарті DVB-S, а інша половина у стандарті DVB-S2. Загальна швидкість передачі групового сигналу складала біля 1,3 Гбіт/с. Успішність передавання через прийомопередавач терагерцового діапазону групового сигналу з широкою смугою частот (майже 1 ГГц) з одного боку підтверджує його працездатність, а з іншого – закладає основи для дослідження можливості передавання в терагерцовому діапазоні надшикоросмугових імпульсних сигналів (UWB) з подальшою оцінкою спотворень таких сигналів в часовій області.

Варто також відзначити, що результати теоретичних розрахунків, представлені в роботі [12], показують, що досліdnий зразок прийомопередавача здатний забезпечувати передачу сигналу із загальною пропускну здатністю каналу зв'язку до 1,2 Гбіт/с при значенні ймовірних бітових помилок BER на рівні 10^{-6} з теоретичною дальністю зв'язку в межах 1 км без використання підсилювача потужності в передавачі та малошумливого підсилювача в приймачі терагерцового діапазону.

Висновки

Розроблений перетворювач частоти сигналу цифрового телебачення стандарту DVB-S дозволив авторам роботи отримати головний науковий результат – він допоміг підтвердити факт працездатності всіх вузлів досліdnого зразка прийомопередавача терагерцового діапазону при передаванні через нього сигналу стандарту DVB-S з цифровою модуляцією та створив можливість для вимірювання зміни основних параметрів сигналу DVB-S при його передаванні через вказаний прийомопередавач, на основі яких можна говорити про малий рівень спотворень та шумів, що діють на сигнал в цьому прийомопередавачі.

Вказана розробка прийомопередавача телекомунікаційної системи фіксованого зв'язку терагерцового діапазону для України є новітньою, оскільки на даний час в Україні є розробки тільки окремих напівпровідникових елементів та пристроїв, здатних працювати в довгохвильовій частині цього діапазону. Завершених розробок телекомунікаційних систем для передачі високошвидкісних даних в терагерцовому діапазоні, які знаходяться в комерційній експлуатації, поки що немає.

Використання телекомунікаційних систем фіксованого радіозв'язку терагерцового діапазону та перехід на малі стільники (мікростільники, піко- та фемтостільники) є одним з ефективних рішень для побудови транспортних мереж мобільного зв'язку наступних поколінь. Отже час не стоїть на місці і розвиток безпроводових телекомунікаційних систем продовжується, маючи головною тенденцією перехід в більш високочастотні діапазони радіохвиль, в першу чергу в міліметровий та терагерцовий, в яких є можливість задовольнити необхідний клієнтський попит на пропускну здатність в мережах стільникового мобільного зв'язку 4G та 5G. При цьому варто відзначити, що завдяки науково-технічним здобуткам в галузі мікроелектроніки, що були досягнуті в світі в останні десять років в першу чергу в області розробки

напівпровідникових пристроїв (підсилювачі, змішувачі, синтезатори частот, фільтри) міліметрового та терагерцового діапазону, за останні п'ять років на телекомунікаційному ринку світу з'явилася значна кількість виробників радіорелейного обладнання міліметрового діапазону, яке при комерційній експлуатації забезпечує пропускну здатність радіоствола з шириною смуги радіочастот 250 МГц при модуляції 256-QAM до 2,6 Гбіт/с [13] при дальності дії радіосистеми біля 5 км. Отже можна з певністю стверджувати, що поява радіорелейного обладнання терагерцового діапазону з гігабітними пропусковими здатностями вже не за горами.

На базі розроблених вітчизняними вченими технічних рішень представляється доцільним і перспективним в подальшому дослідження можливості створення системи радіозв'язку терагерцового діапазону частот на основі імпульсних надшироко-смужових сигналів, що забезпечить необхідну якість надвисокошвидкісного терагерцового каналу передачі при оптимальних значеннях енергетичного ресурсу лінії радіозв'язку, а також практичну відсутність можливості виявлення і несанкціонованого доступу до інформації, що передається.

Список літератури:

1. Новости ВПК: РТИ ведет принципиально новые разработки в области обработки информации [Электронный ресурс] – 2014г. – Режим доступа http://vpk.name/news/118789_rti_vedet_principialno_novyie_razrabotki_v_oblasti_obrabotki_informacii.html.
2. Frenzel L. Миллиметровые волны раздвинут границы будущего беспроводных технологий. Часть 1. – 2014. – Вып. 24. – С. 25-29.
3. Frenzel L. Подавление низкочастотных помех в системах автоматического управления. Часть 2. – 2014. – Вып. 24. – С. 30-33.
4. Ilchenko M.Ye, Narytnik T.N., Fisun A.I., Belous O.I. Terahertz range telecommunication systems // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011.– Vol. 70, Issue 16. – P.1477-1487.
5. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Шелковников Б.Н., Христенко В.И. Радиотелекоммуникационные системы терагерцового диапазона // Электроника и связь.– 2011. – №3. – С. 205-210.
6. Нарытник Т.Н., Домрачева Е.А., Казимиренко В.Я. Анализ эффективности использования миллиметрового диапазона электромагнитных волн для передачи данных // Матеріали Восьмої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій». – К.: НТУУ«КПІ», 2014. – С. 134-136.
7. Ильченко М.Ю. Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи широкосмужового радіодоступу. – К.: Наукова думка, 2009. – 312 с.
8. Генко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. – К.: «ЕКИО», 2009. – 672 с.
9. Ericsson Mobility Report [Electronic resource] – November 2016p. – Access mode: <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2016/ericsson-mobility-report-november-2016.pdf>.
10. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Радзиховский В.Н., Кузьмин С.Е., Лутчак А.В. Проектирование передающего и приемного радиотрактов радиорелейных систем терагерцового диапазона // Электросвязь. – 2016. – №2. – С. 42-49.

11. Наритник Т.М., Авдеєнко Г.Л., Набока Б.Ю. Дослідження багатоканальних сигналів цифрового телебачення DVB-S при їх передаванні по приймально-передавальному тракту терагерцового діапазону // Цифрові технології. – 2016. – № 19. – С. 26-33.

12. Наритник Т.Н., Набока Б.Ю., Авдеєнко Г.Л. Дослідження передавання радіосигналу цифрового телебачення стандарту DVB-S з використанням радіоканалу терагерцового діапазону // Матеріали десятої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій». – К.:НТУУ «КПІ», 2016. – С.134-136.

13. Ватсон-Телеком: ALCOMA AL80GE [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://watson-telecom.ru/radiodostup/ppc/alcoma-al80ge.html>.