

# ЕЛЕКТРОНІКА, РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.37

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.5.72851

М.Ю. Ільченко, М.М. Кайденко, С.О. Кравчук

НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

## МОДЕМНЕ ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ SDR-ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ТРОПОСФЕРНИХ СТАНЦІЙ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

**Background.** Modem equipment of tropospheric communication lines is an important component of modern means of telecommunication. The theoretical and practical aspects of choosing a preferred embodiment of modem equipment, taking into account the aggregate indicators of quality.

**Objective.** Presentation of features of the modem equipment construction of new generation tropospheric stations that can provide high data transfer rates with guaranteed quality of service in complex stationary and non-stationary noise inherent in tropospheric channels.

**Methods.** The goal is achieved by using new technical and architectural solutions to build SDR based modem equipment, spectrally efficient modulation types and coding, algorithms of effective adaptation to changing operating conditions. Feasibility of the proposed approaches to the construction of the modem hardware is fulfilled on a prototype of the equipment based on the HSMC ARRadio Daughter Card debugging modules.

**Results.** The features of constructing of modem equipment of troposcatter stations with high data transfer rate are provided. To reach the limiting parameters of such stations the application of modem equipment of new technical and architectural solutions, spectrally efficient modulation types (OFDM plus linear modulation) and error-correcting coding, efficient algorithms of adaptation to changing conditions of work, the SDR technology, frame structures of physical layer was proposed. The configuration variants of modem equipment in relation to the modes of operation of compact troposcatter station were proposed.

**Conclusions.** The proposed ways to improve the effectiveness of modem equipment allow realizing compact troposcatter radiorelay stations with a high rate of data transmission.

**Keywords:** software-defined radio; troposcatter station; modem; adaptation; operation modes.

### Вступ

Незважаючи на те, що тропосферні радіорелейні системи (ТРРС) значно складніші в реалізації, а пропускна здатність їх нижча, ніж у радіорелейних систем (РРС) прямої видимості, завдяки більшій довжині прольотів ТРРС набули досить широкого застосування, особливо у військовій сфері, спеціальними службами, службами порятунку та надзвичайних ситуацій [1–3]. Розгортання тропосферних станцій не висуває складних вимог до рельєфу місцевості. Не потрібно установки високих шогл, необхідних у випадку РРЛ для забезпечення прямої видимості [4, 5].

Основними особливостями тропосферного поширення радіохвиль, пов'язаними з фізичною природою цього явища, є дуже велике загасання радіосигналу на ділянці поширення й завмирання сигналу на вході приймача, які мають селективний за частотою характер. При цьому проявляється ефект багатопроменевості, зумовлений тим, що довжини променів, які проходять через різні ділянки об'єму, де виникає розсіяння, різні.

За таких умов у випадку традиційного підходу для забезпечення стійкого зв'язку доводиться підвищувати енергетичні параметри

обладнання ТРРС через збільшення потужності випромінювання передавачів, використання малошумливих підсилювачів на вході приймачів та застосування антен більших розмірів. Усе це призводить до значного збільшення габаритних розмірів ТРРС та споживаної ними енергії. До недоліків традиційних засобів загоризонтного радіорелейного зв'язку також належать: низька надійність зв'язку в умовах завад; відсутність автоматизованих антенно-щоглових пристроїв; низькі характеристики з електромагнітної сумісності; відсутність уніфікації радіорелейних станцій із системами керування й недостатня ефективність систем функціонального контролю та діагностики.

Одним із кардинальних рішень щодо нівелювання зазначених недоліків традиційних ТРРС при збереженні необхідної завадостійкості в умовах багатопроменевих завмирань є створення ефективних портативних ТРРС нового покоління, основні принципи побудови яких було наведено в [6–10]. Зокрема, зазначається, що станція повинна мати можливість працювати в трьох режимах: тропосферного і дифракційного поширення, прямої видимості. При цьому забезпечується висока вірогідність передачі інформації (у

тропосферному одноантенному режимі  $BER = 10^{-5}$ , у режимі прямої видимості  $BER = 10^{-6}$ ) за високого коефіцієнта готовності радіолінії (0,98). Складні умови зв'язку при тропосферному поширенні вимагають використання багаторівневої адаптації: часової в межах смуги робочих частот (адаптивна модуляція і кодування); частотної, яка передбачає вибір оптимальної робочої частоти й оптимальної смуги робочих частот; просторової, яка передбачає використання багатоантенної техніки і технології MIMO (Multiple Input – Multiple Output); міжрівневої, що передбачає оптимальне використання адаптивної модуляції та кодування і технології гібридного автоматичного запиту на повторну передачу даних HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request).

Реалізація портативних TTPC нового покоління потребує відповідного високоефективного спеціалізованого каналотвірного обладнання, основою якого є програмований модемний пристрій [11]. Він дає змогу застосувати більш ефективні методи формування й обробки сигналів при прийомі з метою зменшення відношення сигнал/шум на вході приймача, за якого забезпечуються виконання норм на якісні показники каналів і досить висока пропускна здатність.

На сьогодні низка зарубіжних компаній представили свої розробки таких малогабаритних TTPC. Так, компанія TeleCommunication Systems Achieves Unprecedented Performance спільно з компанією Comtech Systems створили TTPC "TCS 3T". Використовуючи 500-ватний твердотільний підсилювач потужності SSPAs (Solid-State Power Amplifiers) компанії Comtech, станція забезпечує швидкість передачі даних до 50 Мбіт/с на відстань 160 км. Компанія Raytheon розробила TTPC BLOS-T (Beyond Line of Sight – Troposcatter Communications) C-band [12]. Відмінною рисою таких TTPC є застосування високоефективних підсилювачів потужності нового покоління та модемних пулів, які дали змогу забезпечити швидкість передачі даних до десятків мегабіт за секунду. Явний успіх таких розробок продемонстрував зростання значення модемного обладнання для побудови конкурентоспроможних високоефективних TTPC. Тут особливого значення набуло модемне обладнання, створюване на базі технології програмованого радіо SDR (Software Defined Radio). Модем став виконувати функції не тільки каналотвірного обладнання, а й системного хаба багатоантен-

ної TTPC. Однак поки що роботи, які б представляли принципи створення такого модемного обладнання TTPC, нам не відомі.

### Постановка задачі

Метою роботи є представлення особливостей побудови модемного обладнання тропосферних станцій нового покоління, які зможуть забезпечувати високу швидкість передачі інформації з гарантованою якістю в умовах складних стаціонарних і нестаціонарних завад, властивих тропосферним каналам. Поставлена мета досягається застосуванням нових прогресивних технічних і архітектурних рішень щодо побудови модемного обладнання, спектрально-ефективних видів модуляції та кодування, ефективних алгоритмів адаптації до постійно змінюваних умов роботи.

### Особливості конфігурування обладнання тропосферної станції нового покоління

#### *Варіанти конфігурації обладнання станції.*

Сучасна тропосферна станція повинна мати можливість функціонування в трьох режимах:

- непрямой видимості з використанням тропосферного розсіювання радіохвиль. У цьому режимі забезпечується максимальна дальність зв'язку за максимальної потужності роботи. Швидкість передачі інформації мінімальна (від сотень кілобіт за секунду до 2 Мбіт/с) унаслідок наявності глибоких частотно-селективних завмирань, включаючи завмирання добового і сезонного характеру;

- непрямой видимості з використанням дифракційного розсіювання на завадах. У цьому режимі може бути забезпечена дальність зв'язку до 70 км за максимальної потужності роботи. Швидкість передачі інформації середня (до 4–8 Мбіт/с) унаслідок непрямой видимості та неможливості використовувати багатопозиційну модуляцію;

- прямої видимості. В цьому режимі за низької потужності передавача забезпечується максимальна швидкість передачі інформації (до 20 Мбіт/с), дальність зв'язку визначається високою підйому антени станції.

Залежно від режиму роботи станції для забезпечення максимальної пропускної здатності можуть бути використані різні варіанти конфігурації обладнання або різні варіанти комплектації станції. Загальну структурну схему станції тропосферного зв'язку зображено на рис. 1.

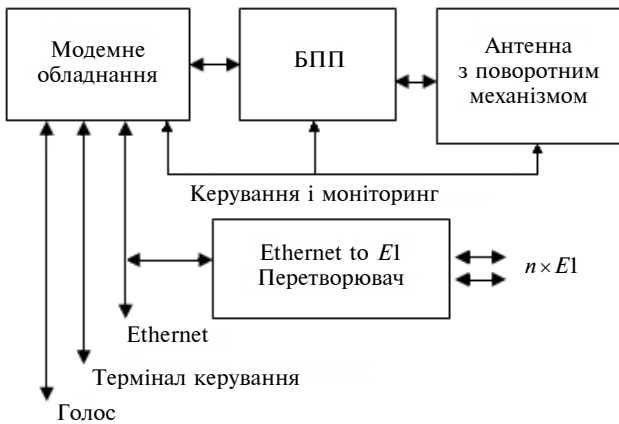


Рис. 1. Загальна структура станції тропосферного зв'язку

Найпростіший варіант конфігурації станції – *одноканальна станція з одним блоком приймально-передавальним (БПП) і однієї антеною*. Такий варіант має єдину перевагу – вартість – і може бути використаний тільки в режимі прямої видимості, оскільки в інших режимах не може забезпечити гарантованої якості зв'язку.

Двоканальна станція з поляризаційною розв'язкою каналів передбачає використання двох БПП, двоканального модема й однієї антенної системи з поляризатором. У цій конфігурації потенційна швидкість передачі інформації може бути збільшена у два рази порівняно з одноканальною. За такої конфігурації забезпечення гарантованої якості зв'язку в тропосферному режимі також утруднене.

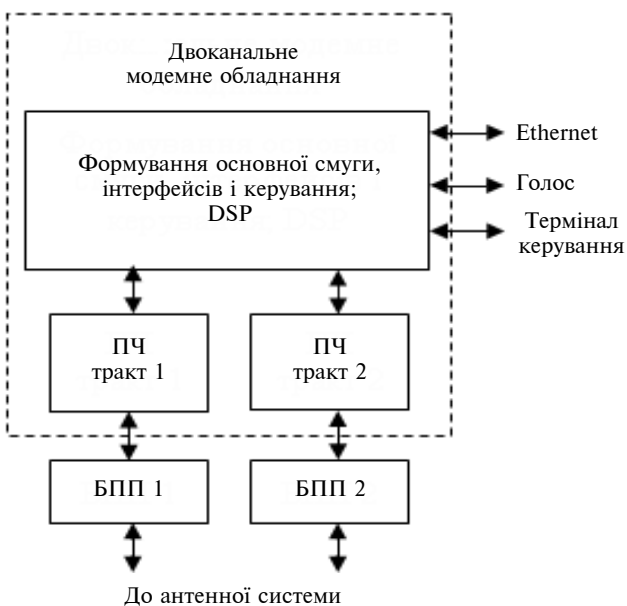


Рис. 2. Загальна структура обладнання станції для двоканальних конфігурацій (DSP – Digital Signal Processor, цифровий сигнальний процесор; ПЧ – проміжна частота)

Двоканальна станція з просторовою розв'язкою каналів передбачає використання двох БПП, двоканального модема й антенної системи з двома антенами. Швидкість передачі інформації може бути в декілька разів вищою, ніж у випадку одноканальної конфігурації; при цьому використовується технологія МІМО. Станція може працювати у всіх зазначених режимах, забезпечуючи при цьому гарантовану якість зв'язку.

Двоканальна станція з незалежними каналами. Така конфігурація відрізняється від попередніх можливістю роботи кожного з каналів як незалежних. Кожен канал має свої несучу частоту і смугу пропускання. Конфігурація може вибиратися програмно і використовуватися як додатковий варіант настройки станції для інших двоканальних конфігурацій. У тропосферному режимі така конфігурація дає змогу здійснювати адаптацію станції як за робочою частотою, так і за смугою пропускання без переривання зв'язку. Структуру обладнання станції для випадку двоканальних конфігурацій показано на рис. 2.

Багатоканальна станція з двома просторовими (поляризаційними) каналами і до чотирьох частотних каналів у кожному просторовому. Така конфігурація станції передбачає використання двох БПП і до чотирьох модемних модулів. Кожен модемний модуль використовується як незалежний частотний канал зі своєю частотою, пропускну здатністю і системою часової адаптації. У тропосферному режимі багатоканаль-

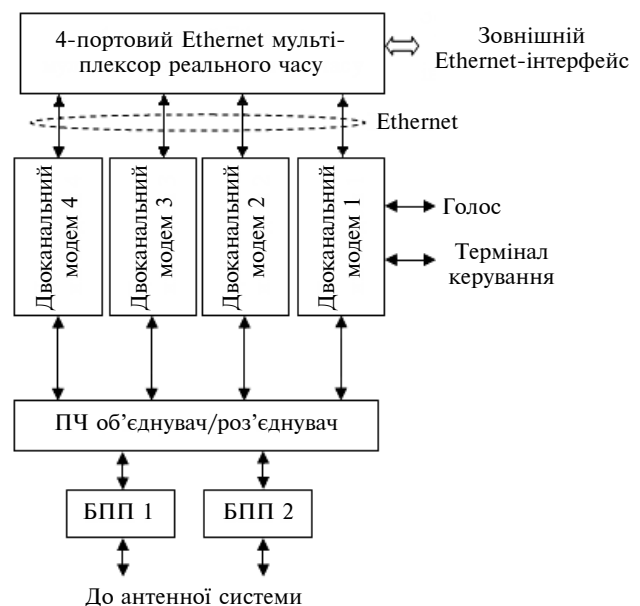


Рис. 3. Загальна структура обладнання станції для багатоканальної конфігурації

на станція забезпечує максимальну пропускну здатність до 80 Мбіт/с з гарантованою якістю зв'язку. Один із частотних каналів використовується як тестовий для частотної адаптації станції. Структуру обладнання станції для багатоканальної конфігурації показано на рис. 3. Порівняно з двоканальною конфігурацією в модемному обладнанні додається блок об'єднання/розділу каналів і комутатор реального часу (Real Time Ethernet Switch) для об'єднання Ethernet-потоків кожного частотного каналу. Голосовий канал, канали керування і контролю станції завжди підтримуються в інформаційному потоці першого модемного каналу.

**Структура модемного обладнання сучасної тропосферної станції.** Модемне обладнання є найважливішою частиною тропосферної станції. Воно забезпечує модуляцію, демодуляцію, формування інформаційних, голосових і службових потоків даних по радіо- і проводомому інтерфейсах, багаторівневу адаптацію станції до постійно змінюваних умов роботи, синхронізацію, вибір режимів роботи станції, керування станцією та її окремими блоками, моніторинг стану станції тощо.

Модемне обладнання являє собою повнофункціональний двоканальний модемний модуль, який будується на базі технології програмованого радіо SDR (Software Defined Radio) спільно з технологією "система на чіпі" – SoC (System-on-a-Chip). Базова структура модемного модуля станції показана на рис. 4.

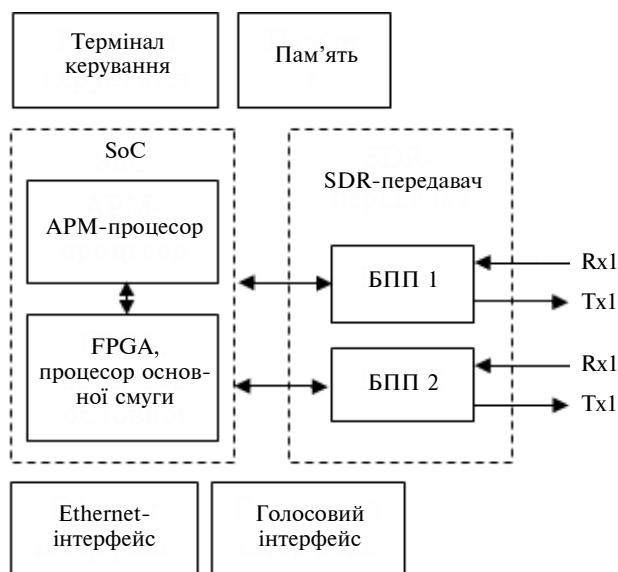


Рис. 4. Базова структура модемного модуля тропосферної станції

SDR-прийомо-передавач, що складається з двох ідентичних модулів, виконує функції двоканального приймача, передавача і генератора, а також загального керування модулем і обміну із зовнішніми пристроями. До функцій приймача, який будується за схемою з прямим перетворенням, належать: малощумливий підсилювач, схема автоматичного регулювання підсилення, IQ-демодулятор, аналоговий фільтр нижніх частот, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), цифровий фільтр основної селекції. До функцій передавача, який будується за схемою з прямим перетворенням, належать: вихідний підсилювач, IQ-модулятор, аналоговий фільтр нижніх частот, цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), цифровий фільтр для позбавлення від побічних випромінювань. Як генератор використовується керований опорний генератор із температурною компенсацією; генерація проміжних частот відбувається із залученням цифрових синтезаторів частоти, незалежних для приймача і передавача. Крім того, модуль має вбудовану систему керування, контролю стану модуля, а також інтерфейс обміну з процесором основної смуги і зовнішнім керуючим пристроєм.

Модуль SoC складається з блоку FPGA (Field-Programmable Gate Array) і двох ARM (Acorn RISC Machine) процесорів.

На FPGA реалізується двоканальний процесор основної смуги (Baseband Processor), який виконує функції: обміну з АЦП/ЦАП SDR-модуля, OFDM модулятора/демодулятора, *mapper/demapper*, кодера/декодера з прямою корекцією помилок, формування керуючих сигналів частотної синхронізації, фазового та часового синхронізатора, перемикача/деперемикача, формувача кадрів, скремблера/дескремблера, оцінки середнього відношення сигнал/шум SNR (Signal-to-Noise Ratio), модуля адаптивної модуляції та кодування, обміну з ARM-процесорами за допомогою DMA (Direct Memory Access) буфера.

На базі ARM-процесора під керуванням операційної системи Linux реалізуються MAC (Media Access Control) рівень безпроводового інтерфейсу і MAC-рівень проводомого інтерфейсу та взаємодія між ними, обмін із Baseband Processors, алгоритми AMC (Adaptive Modulation and Coding) і частотної адаптації та керування режимами адаптації, підтримка протоколів обміну із зовнішніми пристроями, керування приймачем і антеною системою, загальне керування станцією, підтримка каналу голосового зв'язку, формування групового потоку даних, керуючий інтер-

фейс користувача, забезпечення взаємодії із зовнішнім терміналом керування.

До складу модема також входять модулі апаратних інтерфейсів Ethernet, контрольних і керуючих інтерфейсів, голосового зв'язку, а також оперативної і довготривалої (flash) пам'яті.

**Використання технології SDR.** Спільне використання технологій SDR і SoC забезпечує такі можливості щодо створення модемного обладнання сучасної тропосферної станції:

- використання декількох профілів для завантаження конфігурації станції залежно від вибраного режиму роботи;

- компромісний розподіл ресурсів для реалізації високо- та низькошвидкісних процесів цифрової обробки сигналів, алгоритмів прийняття рішення і алгоритмів керування міжпроцесорними ядрами та FPGA;

- реалізація режиму адаптації за частотою зі швидкою зміною частоти несучої та смуги пропускання за рахунок використання цифрових синтезаторів частоти і набору програмно керуваних аналогових і цифрових фільтрів основної селекції із заданими профілями настроювання коефіцієнтів;

- реалізація режиму адаптивної модуляції та кодування із швидкою зміною профілю, реалізованого на FPGA і процесорі типу ARM під керуванням системи прийняття рішення;

- забезпечення можливості керування одночасно двома незалежними каналами і реалізації режиму просторової адаптації;

- реалізація MAC-рівня провідного і безпроводного інтерфейсів на одному високопродуктивному кристалі, що дає змогу забезпечити необхідну швидкодію;

- програмна реалізація протоколів роботи модемного обладнання та станції мовами високого рівня, що дає змогу прискорити процес розробки;

- підтримка програмних інтерфейсів роботи з периферійним обладнанням та необхідних протоколів передачі даних;

- керування роботою модемного обладнання і станції з використанням єдиної операційної системи на базі Linux;

- прискорення процесу розробки за рахунок програмної реалізації протоколів роботи модемного обладнання та станції мовами високого рівня, а також внутрішньосхемної симуляції (HIL Simulation) впроваджуваних рішень.

## Характеристики модемного обладнання

**Модуляція і завадостійке кодування.** Забезпечення високошвидкісної передачі інформації, високої спектральної ефективності за високої достовірності передачі в тропосферних каналах вимагає правильного вибору виду модуляції та завадостійкого кодування.

Для систем, які працюють в умовах, близьких до каналу з адитивним гаусовим шумом (АБГШ) (режим прямої видимості між станціями), достатньо використовувати багатопозиційну модуляцію і завадостійкі коди з високою швидкістю кодування. У разі тропосферного каналу наявність багатопробеневого поширення радіохвиль і частотно-селективних завмирань вимагає використання OFDM-модуляції спільно з лінійною багатопозиційною модуляцією, високоефективними кодами з прямою корекцією помилок і системою адаптації на основі зміни швидкості модуляції та кодування.

OFDM-модуляція, яка використовується в модемному обладнанні, передбачає використання 256 піднесучих, з яких інформаційними є 192, і захисного інтервалу з можливістю зміни його тривалості (1/4, 1/8, 1/16 і 1/32) для боротьби з міжсимвольною інтерференцією. Відстань між піднесучими  $\Delta f_c$  змінюється залежно від смуги робочих частот. На підставі аналізу отриманих і переданих символів на пілотних піднесучих здійснюється оцінка комплексного коефіцієнта передачі каналу для роботи каналного еквалайзера, фазових та частотних зрушень для схем синхронізації.

Кожна піднесуча модулюється з використанням квадратурної модуляції. Для тропосферного і дифракційного режимів використовуються модуляції BPSK, QPSK, QAM16, QAM64, а для режиму прямої видимості – QAM256. Як завадостійке кодування з прямою корекцією помилок використовуються каскадні коди (згортковий код і код Ріда–Соломона) з різними швидкостями. Опціонально можуть бути використані блокові турбокоди (Turbo Product Codes).

**Особливості вибору профілів передачі для адаптивної модуляції і кодування.** Для ефективної роботи в умовах нестаціонарного каналу використовується адаптивна модуляція і кодування (АМК), що є однією зі складових механізму каналної адаптації. Для роботи АМК як основні енергетичні оцінки стану каналу використовуються: ефективне відношення сигнал/шум

(SNR) на інтервалі OFDM-символу; дисперсія ефективного SNR, виміряна на інтервалі інформаційного кадру. Як додаткова оцінка може бути використана оцінка коефіцієнта помилок BER (Bit Error Rate). Алгоритм роботи системи АМК будується на базі оригінального високоефективного алгоритму нечіткого виведення [13].

Застосування АМК для систем з однією несучою і для систем з OFDM, незважаючи на схожість принципів, має низку відмінностей, що виникають унаслідок властивостей OFDM-сигналів. Тому були враховані такі особливості вибору параметрів завадостійкого коду і швидкості модуляції, що впливають із властивостей OFDM-сигналів [14]:

- мінімальною одиницею, в межах якої швидкість модуляції та параметри завадостійкого коду повинні бути сталими, є OFDM-символ, тому адаптація можлива з дискретністю до одного символу;

- OFDM-символ у частотній області складається з піднесучих, кількість  $N$  яких визначається розмірністю перетворення Фур'є і, відповідно, кратна степеню 2;

- за своїм призначенням поднесучі діляться на піднесучі даних  $N_{data}$ , пілотні  $N_{pilot}$  і нульові  $N_{zeros}$ ; використовується  $N = 256$ , при цьому  $N_{data} = 192$ ;

- символна швидкість у межах OFDM-символу завжди однакова (не залежить від швидкості модуляції) і однозначно залежить від  $N_{data}$ ;

- обмеження на символну швидкість і, відповідно, на розмір блоку кодованих даних призводить до обмеження кількості варіантів застосовуваних блокових кодів, найбільш оптимальними є перфоровані коди.

Використання як основної оцінки ефективного SNR накладає такі вимоги при виборі параметрів завадостійкого коду і швидкості модуляції:

- при виборі параметрів завадостійкого коду і швидкості модуляції необхідно максимізувати відстань між сусідніми профілями (різниця в SNR), яка повинна по можливості бути однаковою для всіх профілів;

- мінімальна відстань між профілями визначається досяжною точністю оцінки SNR;

- кількість профілів передачі вибирається виходячи з мінімальної відстані між профілями;

- коди з прямою корекцією помилок, які використовуються, повинні ефективно виправляти як одиночні, так і блокові помилки.

Для забезпечення працездатності каналу зв'язку в тропосферному режимі додатково вводиться режим передачі з підвищеною завадостійкістю. Особливістю цього профілю є використання мінімальної смуги частот, BPSK-модуляції і прямого розширення спектра із застосуванням коду Баркера довжиною 13, що має мінімальний рівень бічних пелюсток автокореляційної функції. Цей профіль використовується тільки для передачі службових і голосових потоків даних.

**Частотна адаптація.** Частотна адаптація використовується в тропосферному режимі. Завданням частотної адаптації є вибір оптимальної з точки зору пропускну здатності смуги частот у діапазоні робочих частот станції в умовах наявності тривалих частотно-селективних завмирань (тривалість завмирань перевищує тривалість кількох кадрів) і завад (структурованих і неструктурованих). Використовуються два етапи адаптації: початковий вибір частоти і адаптація в робочому режимі станції. Оцінка стану каналу зв'язку здійснюється за допомогою аналізу амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) наскрізного тракту передачі (груба оцінка) у вибраній смузі частот максимальної ширини (7 МГц). При грубій оцінці вибирається найменш піддана тривалим частотно-селективним завмиранням смуга частот, яка може бути менша за максимальну. Груба оцінка здійснюється за допомогою сканування на етапі початкової ініціалізації і за необхідності вибору нової смуги частот у робочому режимі. Для точної оцінки додатково до аналізу АЧХ здійснюється аналіз енергетичних характеристик і завадостійкості каналу для базового профілю передачі. Вибирається смуга з максимальним енергетичним запасом і максимальною пропускну здатністю. Частотна адаптація в робочому режимі здійснюється за наявності більш ніж одного каналу, який може працювати як незалежний.

Взаємодія з іншими видами адаптації:

- часова адаптація (адаптивна модуляція і кодування) здійснюється тільки після частотної адаптації; оцінки стану каналу, отримані при АМК, використовуються як необхідні для точної частотної адаптації;

- просторова адаптація може бути поєднана з частотною адаптацією в разі використання кожного просторового каналу як незалежного.

Наявність у станції режиму частотної адаптації та можливості встановлювати крок сітки частот з точністю до 10 кГц дає змогу працю-

вати без попереднього частотного планування і “жорсткого” закріплення сітки робочих частот.

**Структура кадрів фізичного рівня і швидкості передачі.** У станції використовуються режим частотного дуплексу FDD (Frequency Division Duplex) і кадрова структура передачі даних. Кадри прямого і зворотного каналів ідентичні. Кожен кадр містить преамбулу, заголовок кадру FCH (Frame Control Header) і пакети даних (DL or UL burst).

Фізичний рівень для режимів тропосферного і дифракційного поширення базується на використанні OFDM-модуляції. Тривалість кадру може варіюватися залежно від умов роботи станції з набору 1, 2, 5, 10 мс. Базовою є тривалість кадру 5 мс.

У табл. 1 наведені параметри OFDM-символу, швидкості передачі та кількості символів для цієї тривалості фрейму при різних смугах сигналу і тривалості циклічного префікса 1/8.

Фізичний рівень для режиму прямої видимості базується на використанні лінійної модуляції. Можливі два варіанти тривалості фрейму: 1 і 2 мс. У табл. 2 наведені швидкості передачі та кількість фреймів для тривалості фрейму 1 мс

за двох варіантів смуги сигналу й індексу заокруглення (roll-off factor) 0,25.

**Дослідження прототипу модемного обладнання.** Для реалізації зазначених вище особливостей модемного обладнання на сьогодні проводяться експериментальні дослідження прототипу такого обладнання на базі налагоджувальних модулів HSMC ARRadio Daughter Card. На базі такого модуля було реалізовано двоканальний SDR Transmitter і SoCKit – the Development Kit, на основі якого була реалізована система на кристалі і також периферійне устаткування. Зовнішній вигляд макета прототипу модемного обладнання показаний на рис. 5.

Як керуюча використовувалася операційна система Linux. У процесі випробувань також задіяно пакет інженерних розрахунків Matlab R2015b для програмно-апаратного моделювання (Hardware-in-the-Loop Simulation, HIL) рішень, що розробляються. Для проведення програмно-апаратного моделювання як вихідні дані покладалися характеристики заводостійкості різних профілів передачі, які визначаються в стандарті IEEE 802.16–2009 для режиму OFDM із використанням каскадних кодів з прямою корекцією помилок та різних видів модуляції.

Таблиця 1. Параметри OFDM-символу і швидкості передачі

Ширина смуги, МГц	Тривалість OFDM-символу, мс	Частота дискретизації, мс	Символьна швидкість, МБод/с	Бітова швидкість для QAM64, Мбіт/с	Кількість OFDM-символів/кадрів
1,25	0,2	1,44	0,96	5,76	25
1,5	0,1674	1,72	1,1467	6,88	29
1,75	0,1440	2,0	1,333	8,0	34
2,5	0,1	2,88	1,92	11,52	50
3,0	0,0837	3,44	2,2933	13,76	59
3,5	0,072	4,0	2,6667	16,0	69
3,75	0,0667	4,32	2,88	17,28	75
4,5	0,0558	5,16	3,44	20,64	89
5,0	0,05	5,76	3,84	23,04	100
5,25	0,048	6,0	4,0	24,0	104
6,0	0,0419	6,88	4,5867	27,52	119
7,0	0,036	8,0	5,3333	32,0	138

Таблиця 2. Швидкості передачі і кількість фреймів

Ширина смуги, МГц	Символьна швидкість, МБод/с	Бітова швидкість, Мбіт/с, для		Кількість PSS*/кадр
		QAM16	QAM256	
20	16	64	128	4000
28	22,4	89,6	179,2	5600

\* PSS – primary synchronization signal.

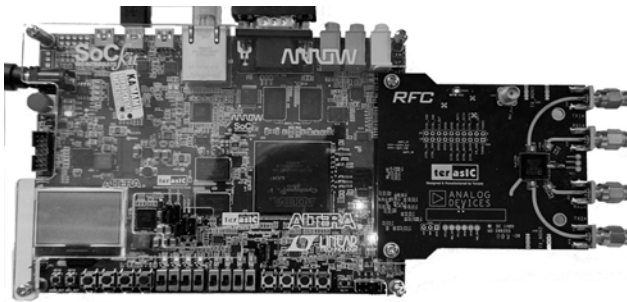


Рис. 5. Зовнішній вигляд макета налагоджувального модуля модемного обладнання

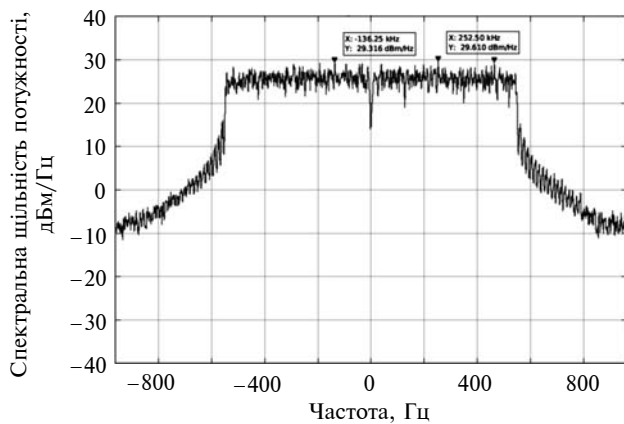


Рис. 6. Спектр сигналу з OFDM-модуляцією в основній смузі частот

На рис. 6 показаний спектр сигналу в основній смузі частот, який було отримано в процесі програмно-апаратного моделювання.

На основі характеристик завадостійкості і розроблених алгоритмів адаптивної модуляції та кодування було проведено моделювання роботи в режимі адаптації до зміни умов роботи станції для каналів з АБГШ, повільними релеєвськими, частотно-селективними релеєвськими та райсівськими завмираннями. Як адаптацію використано АМК, за якої, залежно від умов роботи в каналі, змінювались вид модуляції та швидкість завадостійкого кодування. Як основну оцінку стану каналу використано оцінку середнього відношення сигнал/шум на інтервалі OFDM-кадру, його математичне сподівання та дисперсію на інтервалі кадру даних. Додатковою оцінкою слугувала оцінка середнього коефіцієнта бітових помилок на інтервалі кадру даних. Моделювання здійснювалось для параметрів профілів передачі, визначених у [IEEE 802.16–2009] у режимі OFDM для смуги робочих частот 3,5 МГц. Для моделювання завмирань унаслідок багатопроменевості використовувалась модель з багатовідвідною лінією затримки та незалежними

завмираннями в кожному багатопроменевому каналі, які мали релеєвський або райсівський розподіл. На рис. 7 показано отримані в результаті моделювання залежності нормалізованої пропускної здатності каналу  $C/C_0$  від відношення сигнал/шум для різних видів завмирань у каналі.

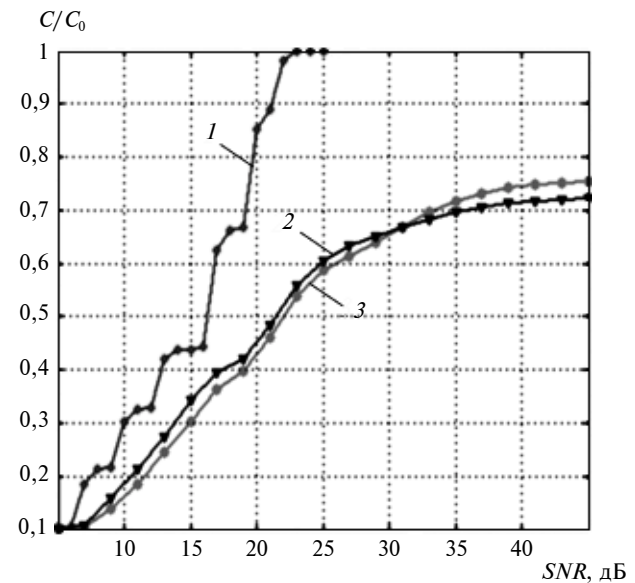


Рис. 7. Залежність нормалізованої пропускної здатності каналу  $C/C_0$  від відношення сигнал/шум для різних видів завмирань у каналі: 1 – АБГШ і повільні релеєвські завмирання; 2 – частотно-селективні райсівські; 3 – частотно-селективні релеєвські

Проведені дослідження прототипу демонструють можливість реалізації запропонованих підходів до побудови високоефективного модемного обладнання для тропосферних радіорелейних станцій нового покоління.

## Висновки

Представлено особливості побудови модемного обладнання тропосферних станцій на основі технології SDR з високою швидкістю передачі інформації та гарантованою якістю. Для досягнення граничних параметрів таких станцій запропоновано застосування в модемному обладнанні нових технічних і архітектурних рішень, спектрально-ефективних видів модуляції (OFDM плюс лінійна модуляція) і завадостійкого кодування, структури кадрів фізичного рівня та MAC-рівнів, ефективних оригінальних алгоритмів багаторівневої адаптації до постійно змінюваних умов роботи. Визначені варіанти конфігурації модемного обладнання відповідно до режимів роботи малогабаритної тропосферної станції.



Запропоновані рішення щодо побудови модемного обладнання та конфігурації сучасних тропосферних станцій дадуть змогу досягти швидкості передачі даних у тропосферному каналі десятки мегабіт за секунду при гарантуванні заданого коефіцієнта помилок.

Проведені програмно-апаратні дослідження прототипу модемного обладнання показали ефективність запропонованих підходів до побудови високоефективного модемного обладнан-

ня для малогабаритних тропосферних радіорелейних станцій нового покоління та продемонстрували можливість його реалізації на базі надсучасних технологій SDR спільно з технологіями “система на чіпі” – SoC.

Подальші дослідження будуть направлені на відпрацювання алгоритмів частотної та багаторівневої адаптації в умовах тропосферного розсіювання.

### Список літератури

1. Носков В.И., Савинов А.Ю., Храповицкий И.А. Технологии и решения для операторских и корпоративных сетей связи. – К.: Лира-К, 2010. – 294 с.
2. Freeman R.L. Radio System Design for Telecommunications. – 3rd ed. – John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 880 p.
3. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. – К.: Наукова думка, 2008. – 328 с.
4. Slusar V.I., Masesov M.O. Ideology of horizon radiorelay special stations building // Proc. VITI “KPI”. – 2010. – № 2. – P. 114–120.
5. Roda G. Troposcatter Radio Links. – Norwood, MA: Artech House Publishers, 1988.
6. Rong-hai L., Xiang-ning R., Ying L. Summarization of new developments of digital troposcatter transmission technology // Radio Commun. Technol. – 2007. – 33, № 3. – P. 8–11.
7. Peng L., Feng S. Key technology of new generation troposphere scatter communication system // J. Jinling Institute of Technology. – 2007. – 23, № 2. – P. 18–21.
8. Ільченко М.Е., Слюсар В.И., Нарытник Т.Н. Направления создания тропосферных станций нового поколения // Цифрові технології. – 2014. – № 16. – С. 8–18.
9. Кравчук С.О. Принципи створення портативних тропосферних радіорелейних станцій // Матер. 9-ї Міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми телекомунікацій”, 21–25 квітня, 2015 р., Київ. – К.: НТУУ “КПІ”, 2015. – С. 254–256.
10. Кравчук С.О. Портативна тропосферна радіорелейна станція зв’язку // Матер. 10-ї Міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми телекомунікацій”, 19–22 квітня, 2016 р., Київ. – К.: Хімджест, 2016. – С. 305–307.
11. Проектирование модема современных тропосферных радиорелейных станций / А.Г. Войтенко, Н.Н. Кайденко, С.А. Кравчук, Т.Н. Нарытник // Матер. КрыМиКо’2013, 8–13 сентября 2013 г., Севастополь. – Севастополь: Вебер, 2013. – С. 326–327.
12. Unkauf F. The next generation of troposcatter systems // Raytheon Technology Today. – 2007. – Iss. 3. – P. 9–10.
13. Kaydenko N. Adaptive modulation and coding in a broadband wireless access systems // Матер. КрыМиКо’2013, 8–13 сентября 2013 г., Севастополь. – Севастополь: Вебер, 2013. – С. 275–276.
14. Kaydenko N. Features choice of the modulation parameters and the error-correcting coding for optimal adaptive modulation systems with wireless broadband with OFDM // Proc. 8th Int. Sci. Conf. “Modern Challenges in Telecommunications”, 2014. – P. 141–143.

### References

1. V.I. Noskov et al., *Technologies and Solutions for Carrier and Enterprise Networks*. Kyiv, Ukraine: Lira-K, 2010 (in Russian).
2. R.L. Freeman, *Radio System Design for Telecommunications*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
3. M.Y. Ilchenko and S.O. Kravchuk, *Modern Telecommunication Systems*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 2008 (in Russian).
4. V.I. Slusar and M.O. Masesov, “Ideology of horizon radiorelay special stations building”, *Proc. VITI “KPI”*, no. 2, pp. 114–120, 2010 (in Russian).
5. G. Roda, *Troposcatter Radio Links*. Norwood, MA: Artech House Publishers, 1988.
6. L. Rong-hai et al., “Summarization of new developments of digital troposcatter transmission technology”, *Radio Commun. Technol.*, vol. 33, no. 3, pp. 8–11, 2007.
7. L. Peng and S. Feng, “Key technology of new generation troposphere scatter communication system”, *J. Jinling Institute of Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 18–21, 2007.
8. M.Ye. Ilchenko et al., “The directions of new generation tropospheric station construction”, *Tsyfrovі Tekhnolohiyi*, iss. 16, pp. 8–18, 2014 (in Russian).
9. S.O. Kravchuk, “Principles for creating portable tropospheric radio relay stations”, in *Proc. 9th Int. Sci. Conf. “Modern Challenges in Telecommunications”*, April 21–25, 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 254–256 (in Russian).

10. S.O. Kravchuk, "Portable tropospheric radiorelay stations", *Proc. 10th Int. Sci. Conf. "Modern Challenges in Telecommunications"*, April 19–22, 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 305–307 (in Russian).
11. A.G. Voitenko *et al.*, "Designing the modem of modern tropospheric radiorelay stations", in *Proc. CriMico'2013*, September 8–13, 2013, Sevastopol, Ukraine, pp. 326–327 (in Russian).
12. F. Unkauf, "The next generation of troposcatter systems", *Raytheon Technology Today*, iss. 3, pp. 9–10, 2007.
13. N. Kaydenko, "Adaptive modulation and coding in a broadband wireless access systems", in *Proc. CriMico'2013*, September 8–13, 2013, Sevastopol, Ukraine, pp. 275–276.
14. N. Kaydenko, "Features choice of the modulation parameters and the error-correcting coding for optimal adaptive modulation systems with wireless broadband with OFDM", in *Proc. 8th Int. Sci. Conf. "Modern Challenges in Telecommunications"*, 2014, pp. 141–143.

М.Ю. Ільченко, М.М. Кайденко, С.О. Кравчук

#### МОДЕМНЕ ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ SDR-ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ТРОПОСФЕРНИХ СТАНЦІЙ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

**Проблематика.** Модемне обладнання тропосферних ліній зв'язку є важливим компонентом сучасних засобів телекомунікації. Дослідження теоретичних і практичних аспектів вибору кращого варіанту модемного обладнання з урахуванням сукупних показників якості залишається актуальним.

**Мета досліджень.** Представлення особливостей створення модемного обладнання тропосферних станцій нового покоління, які можуть забезпечувати високі швидкості передачі даних з гарантованою якістю обслуговування в складних умовах стаціонарних і нестационарних завад, які властиві тропосферним каналам зв'язку.

**Методика реалізації.** Поставлена мета досягається за рахунок використання нових технічних і архітектурних рішень щодо створення модемного обладнання на основі технології SDR, спектрально ефективних видів модуляції та кодування, алгоритмів ефективної адаптації до постійно змінюваних умов експлуатації. Можливість реалізації запропонованих підходів до побудови модемного обладнання виконується на прототипі обладнання, створеному на базі налагоджувальних модулів HSMC.

**Результати досліджень.** Представлено особливості побудови модемного обладнання тропосферної станції з високою швидкістю передачі даних. Для досягнення граничних параметрів таких станцій запропоновано застосування в модемному обладнанні нових технічних і архітектурних рішень, спектрально-ефективних видів модуляції (OFDM плюс лінійна модуляція) і завадостійкого кодування, ефективних алгоритмів адаптації до постійно змінюваних умов роботи, технології SDR, структур кадрів фізичного рівня. Запропоновано варіанти конфігурації модемного обладнання стосовно режимів роботи малогабаритної тропосферної станції.

**Висновки.** Запропоновані підходи до підвищення ефективності модемного обладнання дають змогу реалізувати компактні тропосферні радіорелейні станції з високою швидкістю передачі інформації.

**Ключові слова:** програмно-обумовлені пристрої радіозв'язку; тропосферна станція; модем; адаптація; режими роботи.

М.Е. Ільченко, Н.Н. Кайденко, С.А. Кравчук

#### МОДЕМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ НА ОСНОВЕ SDR-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ТРОПОСФЕРНЫХ СТАНЦИЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

**Проблематика.** Модемное оборудование тропосферных линий связи является важным компонентом современных средств связи. Исследование теоретических и практических аспектов выбора лучшего варианта модемного оборудования с учетом совокупных показателей качества остается актуальным.

**Цель исследований.** Представление особенностей создания модемного оборудования тропосферных станций нового поколения, которые могут обеспечивать высокие скорости передачи данных с гарантированным качеством обслуживания в сложных условиях стационарных и нестационарных помех, присущих тропосферным каналам связи.

**Методика реализации.** Поставленная цель достигается за счет использования новых технических и архитектурных решений при создании модемного оборудования на основе технологии SDR, спектрально эффективных видов модуляции и кодирования, алгоритмов эффективной адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации. Возможность реализации предложенных подходов к построению модемного оборудования была показана на прототипе оборудования, который был создан на базе отладочных модулей HSMC.

**Результаты исследований.** Представлены особенности построения модемного оборудования тропосферной станции с высокой скоростью передачи данных. Для достижения предельных параметров таких станций предложено применение в модемном оборудовании новых технических и архитектурных решений, спектрально-эффективных видов модуляции (OFDM плюс линейная модуляция) и помехоустойчивого кодирования, эффективных алгоритмов адаптации к изменяющимся условиям работы, технологии SDR, структуры кадров физического уровня. Предложены варианты конфигурации модемного оборудования по отношению к режимам работы малогабаритной тропосферной станции.

**Выводы.** Предложенные подходы к повышению эффективности модемного оборудования позволяют реализовать компактные тропосферные радиорелейные станции с высокой скоростью передачи информации.

**Ключевые слова:** программно-обусловленные устройства радиосвязи; тропосферная станция; модем; адаптация; режимы работы.

Рекомендована Радою  
Інституту телекомунікаційних систем  
НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського"

Надійшла до редакції  
29 червня 2016 року