

МАЛОГАБАРИТНА ТРОПОСФЕРНА РАДІОРЕЛЕЙНА СТАНЦІЯ

**Кравчук С.О., Кайденко М.М., Кравчук І.М.,
Роскошний Д.В., Руренко О.Г.**

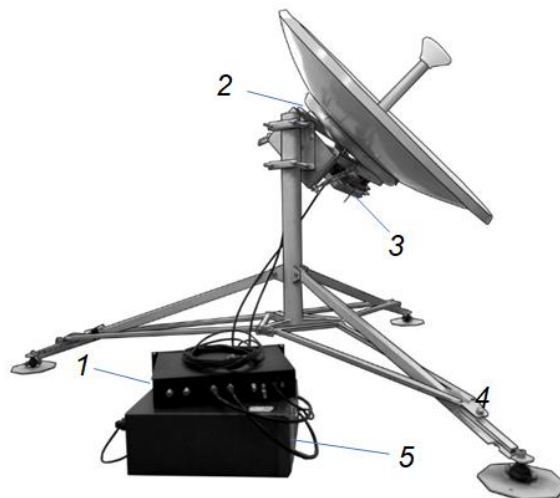
*Навчально-науковий інститут телекомунікаційних
систем КПІ ім. І. Сікорського, Україна
E-mail: sakravchuk@ukr.net*

SMALL RADIO RELAY STATION OF OVER-THE-HORIZON COMMUNICATION

Малогабаритну ТРРС НТУУ.464465.001 створено по блочно-модульному принципу на базі єдиних уніфікованих конструкцій, розроблених з використанням сучасної мікроелектронної елементної бази та програмно-визначуваних систем.

Основними складовими станції є наступні (рис. 1): антенно-поворотний пристрій (АПП); блок приймально-передавальний (БПП); модемний пристрій (МП); блок живлення; кабелі (високочастотний, живлення і сигналізації); пристрій контролю та управління дистанційний (мобільний гаджет).

Рис. 1.
Малогабаритна ТРРС:
1 - модемний пристрій;
2 - антенно-поворотний пристрій;
3 - блок приймально-передавальний;
4 - бухта кабелів;
5 - блок живлення



Малогабаритна станція має наступні технічні характеристики:

1. Діапазон робочих частот 4,4 ... 5,0 ГГц.
2. Максимальна швидкість приймання/передачі цифрового інформаційного потоку до 8 Мбіт/с.
3. Інформаційний інтерфейс 10/100/1000 Base-T, наявні порти з можливістю інкапсуляції зовнішнього потоку конвертора E1 (G.703) в Ethernet.
4. Протокол та інтерфейс передачі даних IP (TCP/IP), Ethernet.
5. Дальність радіолінії при коефіцієнті готовності не гірше 0,98 і коефіцієнті бітових помилок не гірше 10^{-6} на швидкості передачі цифрового потоку:
 - 512 кбіт/с складає до 110 км,
 - 2,048 Мбіт/с - до 85 км.

6. Час розгортання і входження в зв'язок ТРРС складає не більше 15 хв.
7. Автоматичне дискретне (з кроком 1 дБ) регулювання вихідної потужності - не менш 30 дБ.
8. Вбудована система функціонального контролю без випромінювання в ефір.
10. Управління ТРРС здійснюватися дистанційно на віддаленні не більше 100 м.

Умови роботи ТРРС істотно відрізняються від умов роботи радіорелейної станції прямої видимості. В тропосферному каналі виникають складні замирання (частотно-селективні, швидкі та повільні замирання), які носять добовий та сезонний характер. Для компенсації завад, що виникають, додатково до традиційних методів боротьби з ними (висока потужність передавача та використання каналних еквалайзерів) в даній ТРРС застосовується багаторівнева адаптація до зміни умов роботи станції.

В станції використовується чотири рівні адаптації: частотна, модуляції і кодування, просторова (в двоканальному режимі роботи з просторовим рознесенням) та на МАС-рівні.

Завданням частотної адаптації є вибір оптимальної з точки зору пропускної здатності смуги частот в діапазоні робочих частот станції в умовах наявності тривалих частотно-селективних замирань (тривалість замирань 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) в обраній смузі частот максимальної ширини. При грубій оцінці вибирається найменш піддана тривалим частотно-селективним замиранням смуга частот, яка може бути менше максимальної. Груба оцінка здійснюється за допомогою сканування на етапі початкової ініціалізації і при необхідності вибору нової смуги частот в 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 пропускною здатністю. Частотна адаптація в робочому режимі здійснюється за наявності більш ніж одного каналу, який може працювати як незалежний.

Алгоритм початкової ініціалізації передбачає сканування діапазону частот кадрами мінімальної довжини, які складаються з трьох кадрів преамбули, один з яких використовується для синхронізації, а по двом іншим здійснюється оцінка АЧХ тракту, після передачі кадру сканування здійснюється пауза довжиною один кадр для переходу на іншу несучу частоту. Смуга частот, яка використовується при початковому скануванні 7 МГц. За результатами сканування визначаються смуги частот, в яких замирання є мінімальними. В визначених смугах частот максимально можливої ширини здійснюється повторне сканування кадрами мінімальної довжини (1 мс), які включають преамбулу і пакети псевдовипадкових даних

для оцінки енергетичних характеристик (відношення сигнал/шум SNR) та завадостійкості. Для сканування використовується профіль з BPSK (Binary Phase-Shift Keying) модуляцією та максимальною коригуючою спроможністю завадостійкого коду. Завадостійкість визначається за показниками FEC (Forward Error Correction) декодера. Оптимальною вважається смуга з максимальним SNR та мінімальним BER. При початковій ініціалізації одночасно з вибором оптимальної смуги виключаються смуги частот, я яких присутні сигнали від інших радіозасобів, в тому числі інших станцій тропосферного зв'язку.

Алгоритм частотної адаптації в режимі основної роботи відрізняється від режиму початкової ініціалізації тим, що оцінка АЧХ всього діапазону частот не здійснюється, виконується оцінка SNR та BER з використанням кадрів базової тривалості (5 мс). Вибір необхідної смуги робочих частот здійснюється за результатами роботи алгоритму початкової ініціалізації. Оскільки завмирання в тропосферному каналі носять в тому числі і добовий характер інформація про АЧХ в діапазоні робочих частот оновлюється з періодичністю не менше ніж 6 годин.

Перевагою застосування в станції режиму частотної адаптації і можливості встановлювати крок сітки частот з точністю менше 1 кГц дозволяє працювати без попереднього частотного планування і «жорсткого» закріплення сітки робочих частот.

Адаптивна модуляція та кодування (АМК) здійснюється тільки після частотної адаптації; оцінки стану каналу, отримані при АМК, використовуються в якості необхідних для точної частотної адаптації. Адаптивна модуляція та кодування відносяться до методів, в яких одночасно можуть змінюватись декілька параметрів каналу, при цьому одночасно змінюються як параметри модуляції, так і параметри завадостійкого кодування, а також використовується адаптація по потужності.

В якості показника стану каналу для адаптивної модуляції та кодування використовується середнє співвідношення сигнал/шум на інтервалі одного кадру даних та його статистичні характеристики, що вимірюється приймачем. При цьому параметри фізичного рівня (модуляція та завадостійке кодування) групуються в профілі передачі, кожен з яких визначає пропускну спроможність каналу та захищеність. Використовується п'ять профілів передачі один з модуляцією BPSK, швидкістю кодування $\frac{1}{2}$ та розширенням спектру кодом Баркера, чотири інших використовують QPSK модуляцію зі швидкістю кодування приблизно $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{7}{8}$.

Послідовність дій при використанні SNR наступна:

- в приймачі здійснюється оцінка інформації про стан каналу шляхом вимірювання SNR на інтервалі вікна оцінювання, який складає довжину кадру;
- інформація про SNR, яка враховує всі види спотворень, перетворюється в BER інформацію для кожного потенціального режиму припускаючи, що канал був АБГШ;

- по визначеному BER обирається режим, який буде оптимальним у відповідності до вибраного критерію (максимальна пропускна спроможність, максимальна достовірність передачі, максимальна енергетична ефективність)
- інформація про обраний режим передається на передавач;
- передавач змінює профіль на оптимальний.

В якості алгоритму для адаптивної модуляції та кодування використовується оригінальний нелінійний модифікований алгоритм на основі нечіткого висновку. Використання цього алгоритму дозволило збільшити пропускну спроможність станції в середньому на 15-20% у порівнянні з використанням лінійного алгоритму адаптивної модуляції та кодування.

Просторова адаптація полягає в виборі оптимальних параметрів налаштування антенної системи (азимут та кут місця), вона можлива тільки за наявності двоантенної системи з незалежними антенами і автоматичним регулюванням по кутам, в протилежному випадку вона полягає тільки в початковому виборі кутів. Просторова адаптація здійснюється незалежно від інших видів адаптації шляхом використання кожного просторового каналу як незалежного, при цьому загальна пропускна спроможність станції зростає максимально в два рази.

Адаптація на MAC рівні здійснюється незалежно від інших видів адаптації та полягає в повторній передачі неправильно прийнятого пакету даних. Максимальна кількість повторних передач пакету обмежується максимально допустимою затримкою пакету, яка є регульованим параметром і не перевищує 500 мс.

Приймально-передавальний блок. Потреба у створенні компактного малогабаритного ППБ, який водночас повинен бути досить потужним (мати високі рівні потужності на випромінювання), привела до максимальної інтеграції всіх функціональних вузлів ППБ в єдину технологічну конструкцію з використанням найсучаснішої елементної бази і новітніх матеріалів. Така конструкція ППБ складається з двох функціонально пов'язаних між собою модулів: базового модуля дуплексора активного (ДПА) та змінного модуля підвищувальних і понижувальних конверторів (ППК) із системою керування ППБ.

Основні характеристики ППБ наступні:

- 1 Діапазон робочих частот, МГц, по піддіапазонам:
нижній – 4435...4555;
верхній – 4705...4825.
- 2 Максимальна вихідна потужність передавача на антенному фланці, Вт - 110.
- 3 Рівень вихідного сигналу ПЧ L -діапазону на прийом, мВт - 0,2...0,5.
- 4 Глибина автоматичного регулювання підсилення приймача, дБ – 35.
- 5 Відносний рівень побічних складових немодульованих спектрів вхідного сигналу на передачу та вихідного сигналу на прийом, дБн – мінус 67.

6 Коефіцієнт шуму приймального тракту відносно антенного фланцю, дБ – 3,2.

Зовнішній вигляд ППБ наведено на рис. 2.



Рис. 2. Зовнішній вигляд ППБ



Рис. 3. Зовнішній вигляд модемного пристрою (з права на ліво: роз'єм типу WTY0122 з кнопкою «Живлення 220В», DN 3 - управління, *N* типу - сигнал ПЧ RX1, *N* типу - сигнал ПЧ TX1, *N* типу - сигнал ПЧ RX2, *N* типу - сигнал ПЧ TX2)

Модемний пристрій. Модемний пристрій забезпечує модуляцію, демодуляцію, формування інформаційних, голосових і службових потоків даних по радіо- і проводовому інтерфейсах, багаторівневу адаптацію станції до постійно змінюваних умов роботи, синхронізацію, вибір режимів роботи станції, управління станцією та її окремими блоками, моніторинг стану станції та ін.

Модемний пристрій представляє собою повнофункціональний двоканальний модемний модуль, який будується на базі передових технологій програмовано керованого радіо SDR (Software defined Radio) спільно з технологією системи на чіпі SoC (System-on-a-Chip). Даний варіант модемного пристрою орієнтований на використання в станціях не тільки при одноканальному режимі роботи, а й при двоканальному режимі з поляризаційним чи просторовим рознесенням. Зовнішній вигляд модемного пристрою представлено на рис. 3.

Спільне використання технологій SDR і SoC при створенні модемного обладнання тропосферної станції забезпечило наступні переваги:

- можливість подальшої модернізації без зміни апаратної платформи шляхом використання декількох програмних профілів для завантаження конфігурації станції в залежності від обраного режиму роботи;
- використання високої проміжної частоти (ПЧ) у порівнянні з традиційними рішеннями, формування сітки робочих частот та вибір робочої частоти безпосередньо в модемі, а не в блоці приймально-передавальному, що дозволяє підвищити швидкість переходу з частоти на частоту при застосуванні режиму частотної адаптації;
- фільтрація з використанням комбінації програмно реконфігурованих цифрових та аналогових фільтрів основної селекції, що дозволило створити модемний пристрій, який може використовуватись в широкому діапазоні частот, який обмежуються лише частото залежними

узгоджувальними елементами (максимальний діапазон від 70 МГц до 6 ГГц);

- компромісний розподіл ресурсів для реалізації високошвидкісних і низькошвидкісних процесів цифрової обробки сигналів, алгоритмів прийняття рішення і алгоритмів керування між процесорними ядрами і FPGA;
- реалізація режиму адаптації по частоті (вибір несучої частоти та смуги пропускання) з швидкою зміною частоти несучої і смуги пропускання за рахунок використання цифрових синтезаторів частоти і набору програмно керованих аналогових і цифрових фільтрів основної селекції з заданими профілями налаштування коефіцієнтів;
- реалізація режиму адаптивної модуляції і кодування з швидкою зміною профілю, реалізованого на FPGA, і алгоритму прийняття рішення, реалізованого на процесорі типу ARM;
- реалізація MAC-рівнів проводового і безпроводового інтерфейсів були реалізовані на одному високопродуктивному кристалі, що дозволило забезпечити необхідну швидкодію;
- протоколи роботи модемного обладнання та станції були програмно реалізовані на мовах високого рівня, що дозволили скоротити терміни розробки обладнання;
- управління роботою модемного обладнання та станції здійснюється з використанням єдиної операційної системи на базі Linux.

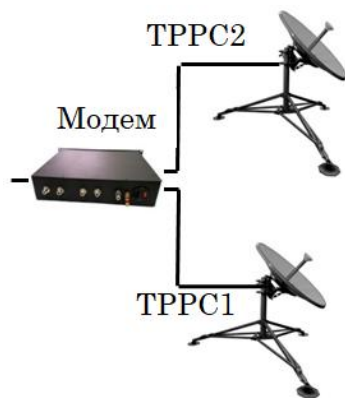


Рис. 4.
Конфігурація ТРРС
для рознесеного
прийому/передачі

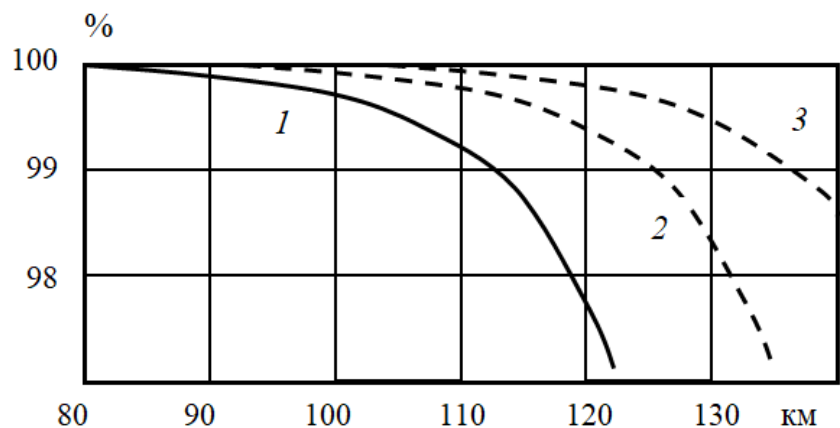


Рис. 5. Коефіцієнт готовності зв'язку (128 кбіт/с):
1 – реалізована система; 2 – здвоєна антенна
реалізована система; 3 – діаметр антен системи (п.
2) збільшено до 2 м

Система ТРРС може конфігуруватись для рознесеного прийому (передачі) або просторово-часового мультиплексування МІМО, як представлено на рис. 4. Коефіцієнт готовності зв'язку при передачі даних зі швидкістю 128 кбіт/с в залежності від відстані між ТРРС представлено на рис. 5.