

О. О. Коваленко¹, В. М. Почерняєв², С. О. Івко¹

¹ Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна

² Національна академія Служби безпеки України, Київ, Україна

МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖИННОГО ДОСТУПУ З ПАРЦІАЛЬНИМ СПЕКТРАЛЬНИМ КОДУВАННЯМ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ ВУЗЛОВИХ ЦИФРОВИХ ТРОПОСФЕРНИХ СТАНЦІЙ

Анотація. Предмет. Модифікований метод неортогонального множинного доступу з парціальним спектральним кодуванням абонентських сигналів для мобільної вузлової цифрової тропосферної станції. **Мета.** Аналітично обґрунтувати формування та розділення кількох абонентських сигналів у спільному часово-частотному ресурсі тропосферного каналу. **Завдання.** Визначити структурно-функціональну схему формування групового сигналу та розділення абонентських сигналів, формалізувати математичний опис парціального спектрального кодування, дослідити використання ортогональних поліномів для синтезу частотних вагових функцій, а також перевірити отримані аналітичні залежності шляхом схемотехнічного моделювання. **Методи.** Застосовано аналітичний опис сигнальних перетворень, з-перетворення, частотний аналіз цифрових фільтрів, розклад вагових функцій за ортогональними поліномами та схемотехнічне моделювання часткового випадку передатної функції. **Результати.** Запропоновано формувати для кожного абонентського сигналу індивідуальний спектрально-енергетичний профіль як додаткову ознаку його розділення після неортогонального суміщення. Отримано аналітичні співвідношення для передатних функцій парціальних каналів обробки, спектрально-енергетичних профілів і частотних вагових функцій. Показано можливість застосування поліномів Лежандра, Чебишова та Гегенбауера для керування формою профілів. Результати схемотехнічного моделювання підтвердили отримані аналітичні залежності формування спектрально-енергетичних профілів для розглянутого часткового випадку. **Висновки.** Запропонований підхід визначає сигнально-алгоритмічну основу багатокористувацького фізичного рівня тропосферної станції та створює передумови для підвищення ефективності використання частотного ресурсу і стійкості розділення абонентських сигналів.

Ключові слова: неортогональний множинний доступ; парціальне спектральне кодування; мобільна вузлова цифрова тропосферна станція; тропосферний канал; послідовне усунення інтерференції; фільтр з кінцевою імпульсною характеристикою; ортогональні поліноми.

1. Вступ

1.1 Актуальність тематики

У сучасних тропосферних станціях зв'язку спостерігається перехід від спеціалізованих систем великої потужності до цифрових транспортних систем із програмно визначуваними радіомодемами, адаптивним кодуванням і модуляцією, підтримкою інтернет-протоколу, твердотільними підсилювачами потужності, частотним або поляризаційним рознесенням і зменшеними масогабаритними параметрами. Розвиток цього напрямку зумовлений потребою в організації позагоризонтного зв'язку (Beyond-Line-of-Sight, BLOS) без обов'язкової залежності від супутникової або кабельної інфраструктури [1–3].

Тропосферні системи зв'язку доцільно застосовувати як альтернативні або резервні засоби за відсутності, пошкодження або економічної недоцільності використання волоконно-оптичної інфраструктури, а також за обмеженого доступу до супутникового ресурсу [4, 5]. Повідомлення про застосування засобів радіоелектронної боротьби для порушення роботи супутникових мереж під час російсько-української війни [6] додатково підтверджують необхідність резервування супутникових каналів альтернативними BLOS-засобами. За таких умов тропосферний зв'язок може забезпечувати підвищення стійкості системи управління та підтримання пропускну здатності транспортного сегмента мережі.

Тенденцію розвитку цифрових адаптивних систем зв'язку в межах прямої видимості (Line-of-Sight, LOS) і поза її межами (BLOS) підтверджують характеристики сучасних серійних тропосферних станцій [1–3], наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики тропосферних станцій

Станція	Швидкість передавання даних, Мбіт/с	Режим радіолінії / мережева топологія
Comtech COMET	до 60	LOS, BLOS / PtP
Cubic GATR	до 210	LOS, BLOS / PtP
Ultra I&C Archer	до 180	BLOS / H&S

Традиційно тропосферний зв'язок організовують за топологією «точка–точка» (Point-to-Point, PtP) або за ланцюговою топологією з проміжною ретрансляцією [1–3]. Водночас для побудови вузлових мереж може застосовуватися топологія «центр–абонентські станції» (hub-and-spoke, H&S) [4]. За взаємодією вузлів така топологія є функціонально близькою до схеми «точка–багатоточка» (Point-to-Multipoint, PtMP), оскільки один центральний вузол взаємодіє з кількома віддаленими абонентськими станціями. Проте H&S не є тотожною PtMP на фізичному рівні, оскільки зв'язки «центр–абонентська станція» можуть реалізовуватися як сукупність незалежних PtP-радіоліній, кожна з яких використовує окремий апаратний або часово-частотний ресурс.

Топологія PtMP визначає мережеву конфігурацію, але сама по собі не встановлює механізму одночасного використання спільного часово-частотного ресурсу кількома абонентськими станціями. Реалізація такого режиму потребує відповідного методу множинного доступу та сигнально-алгоритмічних засобів формування і розділення абонентських сигналів на фізичному рівні.

У проаналізованих відкритих описах серійних тропосферних систем недостатньо розкрито реалізацію багатостанційного доступу, за якого вузлова станція одночасно обслуговує кілька абонентських станцій у спільному часово-частотному ресурсі [1–4].

У [7] запропоновано концепцію мобільної вузлової цифрової тропосферної станції (МВЦТРС), апаратна структура якої забезпечує можливість роботи в кінцевому, проміжному та вузловому режимах і створює передумови для організації зв'язку за топологією PtMP. Зазначене технічне рішення визначає апаратно-структурну основу функціонування станції у вузловому режимі. Проте воно не визначає сигнально-алгоритмічного способу формування групового сигналу та розділення сигналів кількох абонентських станцій у спільному часово-частотному ресурсі.

Додаткову складність реалізації багатостанційного доступу та розділення абонентських сигналів створюють відмінності умов поширення радіохвиль на окремих тропосферних напрямках, що спричиняють неоднакові амплітудно-фазові спотворення, частотно-селективні завмирання та різні рівні потужності прийнятих сигналів [8, 9]. За таких умов вузлова станція має забезпечувати не лише комутацію або ретрансляцію трафіку, а й розділення абонентських сигналів на фізичному рівні.

Отже, дослідження методів спільного використання часово-частотного ресурсу та розділення абонентських сигналів у МВЦТРС є актуальними.

1.2 Аналіз літературних джерел і визначення проблеми

У системах радіозв'язку багатостанційний доступ традиційно реалізують за допомогою ортогонального множинного доступу (Orthogonal Multiple Access, OMA). У праці [10] систематизовано принципи частотного, часового та кодового розподілу ресурсів між абонентами. У [11] розглянуто теоретичні основи багатокористувацьких систем зв'язку та умови розділення сигналів у приймачі. Ортогональне виділення ресурсів спрощує приймання, однак потребує розподілу доступної смуги частот, часу або кодового простору між абонентами. У зазначених працях не розглянуто одночасне передавання кількох абонентських сигналів у спільному часово-частотному ресурсі тропосферного каналу.

У [12] запропоновано концепцію неортогонального множинного доступу (Non-

Orthogonal Multiple Access, NOMA) з розділенням за потужністю (Power-Domain NOMA, PD-NOMA). Метод передбачає суміщення сигналів кількох абонентів у спільному ресурсі з різними рівнями потужності та їх розділення за допомогою процедури послідовного усунення інтерференції (Successive Interference Cancellation, SIC). Водночас розглянуте рішення орієнтоване на стільниковий радіодоступ і не передбачає формування індивідуальних частотнозалежних спектрально-енергетичних профілів як додаткової ознаки розділення сигналів.

У технічному звіті 3GPP [13] систематизовано результати дослідження NOMA для систем радіодоступу 5G New Radio (NR), зокрема структури передавачів, процедури приймання, складність багатокористувацького детектування та можливі сигнальні послідовності. Проте цей документ визначає загальні підходи для мереж NR і не встановлює методу NOMA, адаптованого до частотно-селективного тропосферного каналу та вузлової топології МВЦТРС.

У роботі [14] наведено класифікацію методів NOMA з розділенням за потужністю та кодом, проаналізовано принципи їх передавання і приймання, а також основні напрями практичної реалізації. У методах NOMA з кодовим розділенням (Code-Domain NOMA, CD-NOMA) розділення користувачів забезпечується спеціальними кодовими книгами або розрідженими сигнальними структурами, тоді як у PD-NOMA основною ознакою є різниця рівнів потужності. Однак у [14] не розглянуто використання керованої форми спектрально-енергетичного профілю як додаткової ознаки розділення абонентських сигналів.

У [15] NOMA подано як узагальнений підхід, за якого кілька користувачів обслуговуються в одному ресурсному блоці, а їх сигнали розрізняються за потужнісними, кодовими або іншими ознаками. Авторами визначено проблеми розподілу ресурсів, багатокористувацького детектування та практичної реалізації. Проте питання формування спектральних ознак абонентських сигналів засобами цифрових фільтрів із кінцевою імпульсною характеристикою (KIX) та їх використання під час SIC не досліджено.

У [16] розглянуто розвиток NOMA до концепції множинного доступу наступного покоління (Next Generation Multiple Access, NGMA), яка передбачає гнучке поєднання NOMA з багатоантенними системами та іншими технологіями фізичного рівня. У цій роботі також визначено необхідність урахування складності приймача та практичних обмежень реалізації. Водночас не запропоновано структурно-функціонального рішення для багатостанційного доступу в тропосферній PtMP-системі та не розглянуто синтез індивідуальних спектральних профілів користувачів.

У [17] виконано критичний аналіз сучасного стану NOMA та показано, що переваги неортогонального доступу залежать від умов застосування, способу групування користувачів, складності приймача та затримки обробки. Це вказує

на необхідність окремого обґрунтування сигнальних ознак і алгоритму розділення для кожної конкретної системи. Проте в [17] не розглянуто розділення сигналів за їхніми спектрально-енергетичними профілями сигналів у частотно-селективному тропосферному каналі.

У [18] проаналізовано поєднання багатонесучих форм сигналів із методами множинного доступу та визначено їхні переваги й обмеження, однак не розглянуто формування індивідуальних спектрально-енергетичних профілів абонентських сигналів. У [19] запропоновано вдосконалену схему NOMA для зменшення міжабонентської інтерференції та пікового фактора, проте розділення сигналів не ґрунтується на керованому спектральному зважуванні. У [20] проаналізовано ймовірність символної помилки в системах NOMA із SIC, але не враховано частотно-селективний тропосферний канал і спектральні ознаки абонентських сигналів. Отже, ці роботи доповнюють аналіз відомих підходів, але не вирішують задачу парціального спектрального кодування для МВЦТРС.

Аналіз джерел [10–20] показав, що відомі методи ОМА передбачають ортогональний розподіл ресурсів, PD-NOMA використовує переважно відмінності рівнів потужності, а CD-NOMA – кодові книги або спеціальні сигнальні структури. У проаналізованих працях не визначено структурної та математичної реалізації NOMA для МВЦТРС, у якій частотнозалежні спектрально-енергетичні профілі абонентських сигналів формуються засобами цифрової КІХ-фільтрації та використовуються як додаткові ознаки їх розділення.

Таким чином, невирішеною залишається проблема розроблення структурно-функціонального та математичного методу формування й розділення кількох абонентських сигналів у спільному часово-частотному ресурсі МВЦТРС з урахуванням частотно-селективних спотворень тропосферного каналу.

1.3 Мета і завдання дослідження

Мета роботи полягає в аналітичному обґрунтуванні формування та розділення кількох абонентських сигналів у спільному часово-частотному ресурсі тропосферного каналу на основі модифікованого методу неортогонального множинного доступу з парціальним спектральним кодуванням для МВЦТРС, що функціонує за топологією PtMP. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- визначити структурно-функціональну схему формування групового сигналу та розділення абонентських сигналів;
- формалізувати математичний опис парціального спектрального кодування в z -області на основі цифрової КІХ-фільтрації;
- дослідити можливість використання ортогональних поліномів для синтезу частотних вагових функцій парціальних каналів обробки;
- перевірити отримані аналітичні залежності формування спектрально-енергетичних профілів шляхом схематичного моделювання для розглянутого часткового випадку передатної функції.

2. Матеріали і методи дослідження

Об'єктом дослідження є процеси формування групового сигналу та розділення абонентських сигналів у спільному часово-частотному ресурсі МВЦТРС. Предметом дослідження є модифікований метод NOMA з парціальним спектральним кодуванням абонентських сигналів.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що індивідуальні спектрально-енергетичні профілі абонентських сигналів, сформовані засобами цифрової КІХ-фільтрації, можуть використовуватися як додаткові сигнальні ознаки під час їх розділення процедурою SIC.

Для побудови математичної моделі прийнято, що K абонентських сигналів одночасно передаються у спільному часово-частотному ресурсі. Кожен сигнал обробляється в окремому парціальному каналі, частотна характеристика якого формує індивідуальний спектрально-енергетичний профіль. У частотній області спектр групового сигналу $X(\Omega)$ визначено співвідношенням:

$$X(\Omega) = \sum_{k=1}^K X_k(\Omega),$$

де $X_k(\Omega) = S_k(\Omega)H_k(e^{j\Omega})$ – спектр k -го сигналу після парціального спектрального кодування; k – індекс парціального каналу обробки; $S_k(\Omega)$ – спектр сигналу до кодування; $H_k(e^{j\Omega})$ – частотна характеристика k -го парціального кодера.

Тропосферний канал подано узагальнено як лінійний частотно-селективний канал з адитивним шумом, у якому груповий сигнал зазнає частотно-залежних амплітудно-фазових спотворень.

Парціальне спектральне кодування формалізовано як цифрову КІХ-фільтрацію. Передатну функцію k -го парціального каналу обробки задано у вигляді:

$$H_k(z) = \sum_{m=0}^{L_k-1} h_k[m]z^{-m}, \quad (1)$$

де $h_k[m]$ – коефіцієнти імпульсної характеристики КІХ-фільтра; L_k – довжина КІХ-фільтра, тобто кількість коефіцієнтів його імпульсної характеристики; m – індекс відліку імпульсної характеристики.

Частотна характеристика фільтра визначається підстановкою $z = e^{j\Omega}$ у (1), а спектрально-енергетичний профіль абонентського сигналу, сформований відповідним парціальним каналом обробки, задається як:

$$W_k(\Omega) = |H_k(e^{j\Omega})|^2, \quad (2)$$

де $\Omega \in [\Omega_{\min}; \Omega_{\max}]$ – нормована кутова частота, рад/відлік; $\Omega_{\min}, \Omega_{\max}$ – нижня та верхня межі досліджуваного частотного інтервалу відповідно. Отже, форма профілю $W_k(\Omega)$ безпосередньо визначається функцією $H_k(z)$, заданою у (1).

Для керованого синтезу частотних вагових функцій використано їх скінченне апроксимаційне подання за системою ортогональних базисних функцій:

$$w_k(x) = d_k \sum_{r=0}^{M-1} c_{k,r} g_r(x), \quad (3)$$

де $w_k(x)$ – частотна вагова функція k -го парціального каналу обробки; d_k – нормувальний коефіцієнт; $c_{k,r}$ – коефіцієнти ортогонального розкладу; $g_r(x)$ – базисні ортогональні функції; r – індекс базисної функції; M – кількість членів скінченного розкладу; $x \in [-1;1]$ – нормована частотна змінна.

Для переходу від поліноміального подання частотної вагової функції до частотної характеристики КІХ-фільтра змінну x пов'язано з нормованою кутовою частотою Ω лінійним відображенням:

$$x(\Omega) = \frac{2\Omega - \Omega_{\max} - \Omega_{\min}}{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}.$$

Для першої зони Найквіста $\Omega \in [0;\pi]$ це співвідношення набуває вигляду:

$$x = \frac{2\Omega}{\pi} - 1.$$

Поліноміальну функцію $w_k(x)$ розглянуто як бажану дійсну частотну вагову функцію k -го парціального каналу. Бажану комплексну частотну характеристику лінійно-фазового КІХ-фільтра задано співвідношенням:

$$H_{k,d}(e^{j\Omega}) = w_k(x(\Omega))e^{\frac{-j\Omega(L_k-1)}{2}},$$

а відповідний спектрально-енергетичний профіль визначається:

$$W_{k,d}(\Omega) = |w_k(x(\Omega))|^2.$$

У загальній постановці коефіцієнти імпульсної характеристики $h_k[m]$ можуть бути визначені методом найменших квадратів шляхом мінімізації відхилення частотної характеристики КІХ-фільтра від $H_{k,d}(e^{j\Omega})$ на дискретній частотній сітці з урахуванням умови симетрії коефіцієнтів. Тип поліноміального базису, кількість членів розкладу M і довжина фільтра L_k можуть бути обрані за критерієм мінімуму похибки апроксимації.

Як базисні функції розглянуто поліноми Лежандра, Чебишова та Гегенбауера. Вибір типу базису, порядку поліномів і коефіцієнтів розкладу визначає форму частотної вагової функції та відповідного спектрально-енергетичного профілю.

Структурно-функціональну реалізацію методу досліджено шляхом аналізу послідовності сигнальних перетворень під час формування групового сигналу та розділення абонентських сигналів. Процедурі послідовного усунення інтерференції розглянуто на структурному рівні як послідовне оцінювання, реконструкцію та віднімання внесків окремих абонентських сигналів із прийнятого групового сигналу.

Вхідними параметрами аналітичної моделі є кількість парціальних каналів, коефіцієнти та довжини імпульсних характеристик КІХ-фільтрів, тип і порядок ортогонального поліноміального

базису, коефіцієнти розкладу та нормувальні коефіцієнти. Розрахунковими величинами є передатні функції парціальних каналів, їх частотні характеристики, частотні вагові функції та спектрально-енергетичні профілі абонентських сигналів.

Для перевірки отриманих аналітичних залежностей виконано схемотехнічне моделювання часткового випадку КІХ-фільтра з двома ненульовими відліками імпульсної характеристики у модулі Circuit Design програмного середовища Ansys Electronics Desktop (AEDT) 2025 R2. Передатну функцію реалізовано сумуванням прямої складової сигналу та його затриманої копії з фазовим зсувом 180° . Фізичну затримку визначено як

$$\tau_p = pT_d = \frac{p}{f_d},$$

де p – затримка, виражена кількістю відліків; T_d – період дискретизації, с; f_d – частота дискретизації, Гц.

Частотний аналіз виконано засобами Linear Network Analysis в діапазоні 0–40 МГц для значень цілочисельного параметра затримки $p = 1$ і $p = 2$. Спектрально-енергетичний профіль визначали як квадрат модуля коефіцієнта передавання схемної моделі та зіставляли з відповідною аналітичною залежністю.

Статистичні методи не застосовували, оскільки дослідження має аналітичний і схемотехнічний характер. Проведене моделювання перевіряє лише розглянутий частковий випадок передатної функції та не охоплює повної багатокористувацької моделі, впливу похибок оцінювання каналу, залишкової інтерференції й похибок синхронізації, а також не передбачає оцінювання показників ефективності модифікованого методу.

3. Результати розробки та дослідження модифікованого методу неортогонального множинного доступу з парціальним спектральним кодуванням

3.1 Структурно-функціональна схема модифікованого методу NOMA

Структурною основою реалізації запропонованого методу є базова конфігурація МВЦТРС [7], наведена на рис. 1. Антенна система станції містить фазовану антенну решітку (ФАР) і діаграмоформувальну схему (ДФС). Приймальна частина базової конфігурації має два приймачі (Прм 1, Прм 2) та гетеродин (Гет), а передавальна – передавач (Прд).

До складу модема входять суматор (Σ) і модулятор (М), а каналоутворювальна апаратура (КУА) містить апаратуру багатостанційного доступу (АБД), комутатор каналів (К) і мультиплексор-демультиплексор (М-Д).

Базова конфігурація має два приймальні та один передавальний тракт надвисоких частот (НВЧ). Такий склад відповідає мінімальній апаратній побудові вузлової станції. У розгорнутих конфігураціях кількість приймальних і

передавальних НВЧ-трактів може бути збільшена відповідно до кількості одночасно обслуговуваних

тропосферних напрямків, вимог до рознесення, резервування та пропускної спроможності.

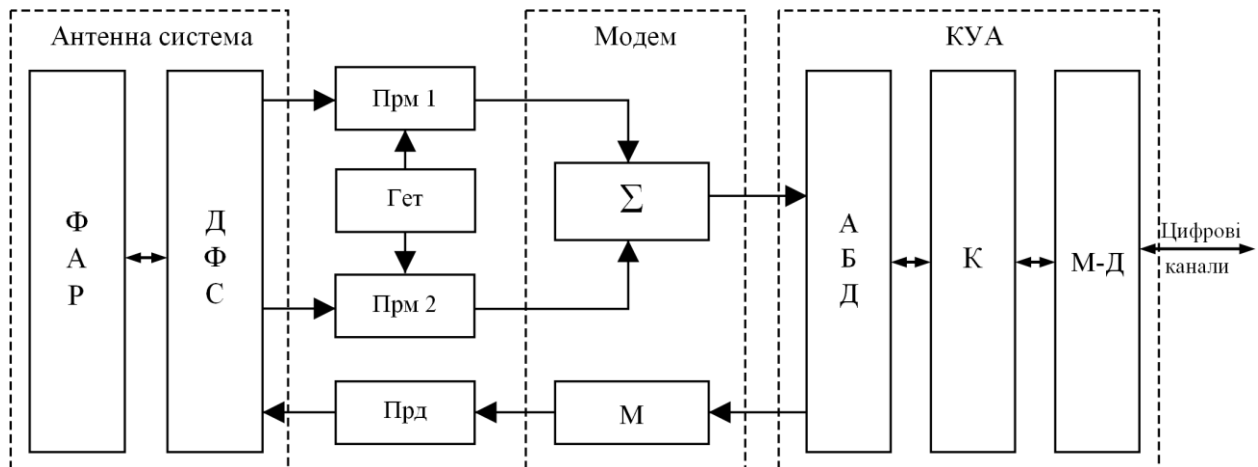


Рис. 1. Базова структурна схема МВЦТРС із двома приймальними та одним передавальним НВЧ-трактами

У запропонованій реалізації функції парціального спектрального кодування та розділення абонентських сигналів виконуються засобами АБД і цифрового модема. Узагальнену схему модифікованого методу NOMA наведено на рис. 2.

На рис. 2 використано такі позначення: C_k – парціальний спектральний кодер k -го каналу обробки; ЗШПРФ – блок зворотного швидкого

перетворення Фур'є; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; М – модулятор; НК – еквівалентний неперервний тропосферний канал; ДМ – демодулятор; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ПУІ – блок послідовного усунення інтерференції; ШПФ – блок швидкого перетворення Фур'є; D_k – декодер k -го парціального каналу обробки.

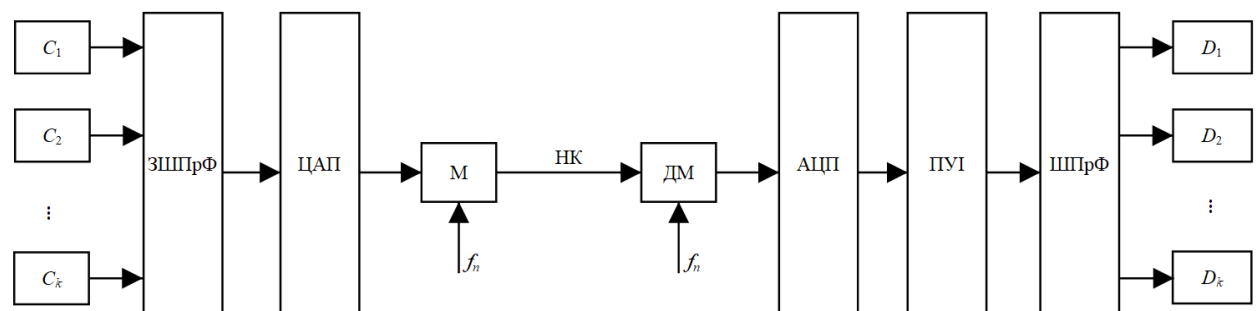


Рис. 2. Схема неортогонального множинного доступу на основі парціального спектрального кодування та послідовного усунення інтерференції

У передавальному тракті кожен абонентський сигнал надходить до відповідного парціального спектрального кодера C_k , у якому виконується цифрова КІХ-фільтрація. Така фільтрація формує для кожного абонентського сигналу індивідуальний спектрально-енергетичний профіль із заданим розподілом потужності в межах робочої смуги частот. Після цього сигнали сумуються, а сформований груповий спектр за допомогою ЗШПРФ перетворюється на груповий цифровий сигнал. Далі він надходить на ЦАП, переноситься на несучу частоту f_n і передається через НК, у якому зазнає амплітудно-фазових спотворень та частотно-селективних завмирань.

У приймальному тракті прийнятий сигнал після проходження через НК демодулюється в блоці ДМ, перетворюється в цифрову форму за допомогою АЦП та надходить до блока ПУІ. Блок ПУІ разом із ШПФ і декодерами D_k утворює ітераційний контур розділення сигналів: після оцінювання чергового абонентського сигналу його внесок реконструюється

та віднімається від прийнятого групового сигналу. Отже, структурно-функціональна реалізація доповнює апаратну основу МВЦТРС механізмом формування групового сигналу та розділення абонентських сигналів у спільному часово-частотному ресурсі. Індивідуальні спектрально-енергетичні профілі використовуються як додаткові сигнальні ознаки поряд із рівнями прийнятої потужності та можуть ураховуватися під час послідовного усунення інтерференції.

3.2 Аналітичні залежності парціального спектрального кодування

Математичну модель парціального спектрального кодування задано співвідношеннями (1)–(3) у розділі 2. Аналіз співвідношень (1) і (2) показує, що спектрально-енергетичний профіль k -го абонентського сигналу безпосередньо визначається коефіцієнтами та довжиною імпульсної характеристики відповідного КІХ-фільтра.

Зміна параметрів КІХ-фільтра забезпечує формування відмінних частотнозалежних профілів абонентських сигналів без розподілу робочої смуги на неперекривні частотні канали. Після неортогонального суміщення форма профілю може використовуватися як додаткова ознака під час оцінювання та реконструкції сигналів у процедурі SIC.

Поширені частотні вагові функції будують на основі тригонометричних складових, зокрема $\cos^2(\Omega)$ та $\sin^2(\Omega)$ [21, 22]. Для узагальненого керування формою профілів використано скінченний розклад (3) за системою ортогональних базисних функцій. Такий запис дає змогу формувати сімейство вагових функцій шляхом вибору типу базису, порядку функцій, коефіцієнтів розкладу та нормувального коефіцієнта.

3.3 Синтез частотних вагових функцій на основі ортогональних поліномів

Для синтезу частотних вагових функцій парціальних каналів обробки доцільно використовувати ортогональні поліноми, зокрема поліноми Чебишова I та II роду, Лежандра, а також поліноми Гегенбауера [23]. Надалі використовуватимемо такі позначення: $T_n(x)$ – поліном Чебишова I роду; $U_n(x)$ – поліном Чебишова II роду; $P_n(x)$ – поліном Лежандра; $C_n^{(\alpha)}(x)$ – поліном Гегенбауера з параметром α . Тут n – порядок полінома; α – параметр, що визначає конкретне сімейство поліномів Гегенбауера.

Використання ортогональних поліномів дає змогу формувати різні частотні вагові функції парціальних каналів обробки шляхом вибору типу базису, порядку поліномів і коефіцієнтів ортогонального розкладу.

Для ілюстрації властивостей поліноміальних базисів розглянуто поліноми порядків $n = 1, \dots, 5$. Використання невисоких порядків обмежує кількість членів розкладу та зменшує обчислювальну складність формування частотних вагових функцій.

Для узагальненого подання та можливості синтезу поліномів Чебишова I роду довільного порядку $n \geq 1$ може бути використано співвідношення:

$$T_n(x) = \frac{n}{2} \sum_{s=0}^q (-1)^s \frac{(n-s-1)!}{s! (n-2s)!} (2x)^{n-2s}, \quad (4)$$

де $q = \lfloor n/2 \rfloor$, s – індекс підсумовування.

Поліноми $T_n(x)$ для $n = 1, \dots, 5$, отримані з (4), мають вигляд:

$$\begin{aligned} T_1(x) &= x, \\ T_2(x) &= 2x^2 - 1, \\ T_3(x) &= 4x^3 - 3x, \\ T_4(x) &= 8x^4 - 8x^2 + 1, \\ T_5(x) &= 16x^5 - 20x^3 + 5x. \end{aligned}$$

Поліноми Чебишова II роду можуть бути задані рекурентним співвідношенням:

$$U_{n+1}(x) = 2xU_n(x) - U_{n-1}(x), \quad n \geq 1. \quad (5)$$

Поліноми $U_n(x)$ для $n = 1, \dots, 5$, отримані з (5), мають вигляд:

$$\begin{aligned} U_1(x) &= 2x, \\ U_2(x) &= 4x^2 - 1, \\ U_3(x) &= 8x^3 - 4x, \\ U_4(x) &= 16x^4 - 12x^2 + 1, \\ U_5(x) &= 32x^5 - 32x^3 + 6x. \end{aligned}$$

Поліноми $T_n(x)$ ортогональні з ваговою функцією:

$$\rho_T(x) = (1 - x^2)^{-1/2},$$

а поліноми $U_n(x)$ – з вагою:

$$\rho_U(x) = (1 - x^2)^{1/2}.$$

Поліноми Лежандра порядку $n \geq 1$ можуть бути задані рекурентним співвідношенням:

$$(n+1)P_{n+1}(x) = (2n+1)xP_n(x) - nP_{n-1}(x), \quad (6)$$

Поліноми $P_n(x)$ для $n = 1, \dots, 5$, отримані з (6), мають вигляд:

$$\begin{aligned} P_1(x) &= x, \\ P_2(x) &= \frac{3x^2 - 1}{2}, \\ P_3(x) &= \frac{5x^3 - 3x}{2}, \\ P_4(x) &= \frac{35x^4 - 30x^2 + 3}{8}, \\ P_5(x) &= \frac{63x^5 - 70x^3 + 15x}{8}. \end{aligned}$$

Поліноми $P_n(x)$ утворюють ортогональну систему з ваговою функцією:

$$\rho_P(x) = 1.$$

Поліноми Гегенбауера є параметричним сімейством ортогональних поліномів. За умови $\alpha > -\frac{1}{2}$, $\alpha \neq 0$ вони можуть бути задані формулою:

$$C_n^{(\alpha)}(x) = \sum_{s=0}^q (-1)^s \frac{\Gamma(\alpha + n - s)}{\Gamma(\alpha)s!(n-2s)!} (2x)^{n-2s}. \quad (7)$$

Із (7) для $n = 1, 2, 3$ отримуємо:

$$\begin{aligned} C_1^{(\alpha)}(x) &= 2\alpha x, \\ C_2^{(\alpha)}(x) &= 2\alpha(\alpha+1)x^2 - \alpha, \\ C_3^{(\alpha)}(x) &= \frac{4}{3}\alpha(\alpha+1)(\alpha+2)x^3 - 2\alpha(\alpha+1)x. \end{aligned}$$

Поліноми вищих порядків визначаються безпосередньо за співвідношенням (7).

Поліноми Гегенбауера утворюють ортогональну систему з ваговою функцією:

$$\rho_\alpha(x) = (1 - x^2)^{\alpha-1/2}, \quad \alpha > -1/2, \quad \alpha \neq 0.$$

Зв'язки між поліномами Гегенбауера, Лежандра та Чебишова II роду визначаються таким чином:

$$C_n^{(1/2)}(x) = P_n(x), \quad (8)$$

$$C_n^{(1)}(x) = U_n(x). \quad (9)$$

Зв'язок між поліномами Гегенбауера та Чебишова I роду отримується у граничному випадку $\alpha \rightarrow 0$ через нормовану форму:

$$\tilde{C}_n^{(0)}(x) = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{C_n^{(\alpha)}(x)}{\alpha} = \frac{2}{n} T_n(x), \quad n \geq 1. \quad (10)$$

Наведені співвідношення (8)–(10) показують, що поліноми Лежандра та Чебишова можуть розглядатися як окремі випадки або граничні форми поліномів Гегенбауера.

Це дає змогу використовувати єдиний параметризований базис для синтезу частотних вагових функцій парціальних каналів обробки.

Отже, поліноми $T_n(x)$, $U_n(x)$, $P_n(x)$ та $C_n^{(\alpha)}(x)$ можуть використовуватися як ортогональні базисні функції $g_r(x)$ у (3) для апроксимаційного подання частотної вагової функції $w_k(x)$.

Вибір типу поліноміального базису, порядку поліномів і коефіцієнтів $c_{k,r}$ дає змогу формувати різні частотні вагові функції парціальних каналів обробки та керувати спектрально-енергетичними профілями відповідних абонентських сигналів.

3.4 Схемотехнічна перевірка аналітичних залежностей для часткового випадку передатної функції

Загальна передатна функція КІХ-фільтра k -го парціального каналу обробки задана у (1). Для ілюстративного аналізу форми спектрально-енергетичного профілю можна розглядати окремий клас КІХ-фільтрів із двома ненульовими відліками імпульсної характеристики:

$$H_{k,p}(z) = 1 - z^{-p}, \quad p \geq 1, \quad (11)$$

де p – затримка у відліках між двома ненульовими коефіцієнтами імпульсної характеристики. Така

передатна функція є частковим випадком (1), для якого ненульовими є лише коефіцієнти $h_{k,p}[0] = 1$ та $h_{k,p}[p] = -1$, а для інших значень m виконується $h_{k,p}[m] = 0$.

Після підстановки $z = e^{j\Omega}$ у (11) отримуємо частотну характеристику фільтра $H_{k,p}(e^{j\Omega})$, а відповідний спектрально-енергетичний профіль задається як:

$$W_{k,p}(\Omega) = |H_{k,p}(e^{j\Omega})|^2 = |1 - e^{-jp\Omega}|^2 = 4\sin^2\left(\frac{p\Omega}{2}\right).$$

Оскільки максимальне значення спектрально-енергетичного профілю $W_{k,p}(\Omega)$ в розглянутому частотному інтервалі дорівнює 4, нормований профіль $\tilde{W}_{k,p}(\Omega)$, значення якого належать інтервалу $[0;1]$, визначається як:

$$\tilde{W}_{k,p}(\Omega) = \frac{W_{k,p}(\Omega)}{4} = \sin^2\left(\frac{p\Omega}{2}\right).$$

Аналіз наведеної залежності показує, що параметр p визначає кількість і положення екстремумів спектрально-енергетичного профілю в межах першої зони Найквіста. Для $p = 1$ нормований профіль монотонно зростає від нуля до одиниці, а для $p = 2$ досягає максимуму за значення $\Omega/\pi = 0,5$ та нульові значення на межах досліджуваного інтервалу.

За методикою, наведеною в розділі 2, у модулі Circuit Design програмного середовища AEDT 2025 R2 виконано схемотехнічне моделювання часткового випадку КІХ-фільтра для $p = 1$ і $p = 2$.

Отримані нормовані спектрально-енергетичні профілі зіставлено з аналітичними залежностями на рис. 3.

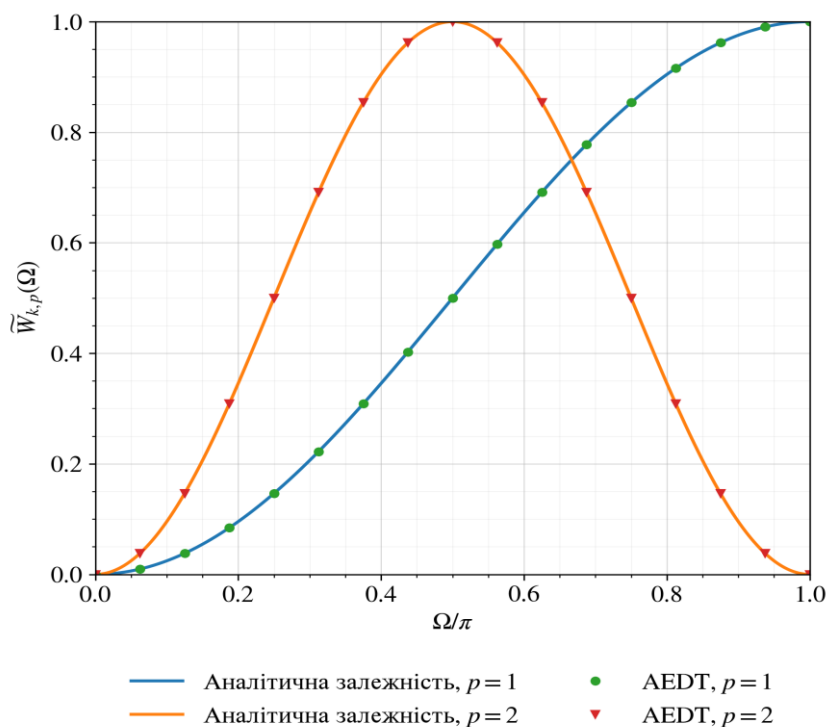


Рис. 3. Нормовані спектрально-енергетичні профілі

Зіставлення на рис. 3 демонструють узгодження змодельованих та аналітично визначених профілів для $p = 1$ і $p = 2$. Це підтверджує отриману залежність між параметром затримки КІХ-фільтра та формою спектрально-енергетичного профілю в межах розглянутого часткового випадку.

4. Обговорення результатів

Запропонована структурно-функціональна схема модифікованого методу NOMA визначає послідовність формування групового сигналу та розділення абонентських сигналів у спільному часово-частотному ресурсі МВЦТРС.

Особливістю схеми є введення парціальних спектральних кодерів і декодерів, які формують та використовують індивідуальні спектрально-енергетичні профілі абонентських сигналів. Це доповнює апаратну структуру МВЦТРС, наведену на рис. 1, сигнально-алгоритмічним механізмом багатостанційного доступу, реалізацію якого подано на рис. 2.

Співвідношення (1)–(3) встановлюють зв'язок між коефіцієнтами імпульсної характеристики КІХ-фільтра, його частотною характеристикою та спектрально-енергетичним профілем абонентського сигналу. Отже, зміна коефіцієнтів і довжини КІХ-фільтра дає змогу формувати відмінні частотнозалежні профілі без поділу робочої смуги на неперекривні частотні канали. Це забезпечує можливість використання форми спектрального розподілу енергії як додаткової ознаки під час оцінювання, реконструкції та послідовного усунення абонентських сигналів.

Подання частотних вагових функцій за системами ортогональних поліномів дає змогу параметрично керувати формою спектрально-енергетичних профілів шляхом вибору типу базису, порядку поліномів і коефіцієнтів розкладу. Співвідношення (8)–(10) показують, що поліноми Лежандра та Чебишова можуть розглядатися як окремі випадки або граничні форми поліномів Гегенбауера. Це дає змогу використовувати параметризований поліноміальний базис для синтезу частотних вагових функцій парціальних каналів обробки.

Схемотехнічне моделювання двовідлікового КІХ-фільтра, заданого співвідношенням (11), показало практичний збіг змодельованих та аналітично визначених нормованих спектрально-енергетичних профілів. Отриманий результат пояснюється безпосереднім зв'язком між параметром затримки p , частотною характеристикою КІХ-фільтра та положенням екстремумів профілю.

На відміну від PD-NOMA [12, 14, 15], де основною ознакою розділення сигналів є різниця рівнів потужності, у запропонованому методі додатково використовується форма частотнозалежного спектрально-енергетичного профілю. На відміну від CD-NOMA [14, 15], де розділення користувачів забезпечується кодовими книгами або спеціальними сигнальними структурами, запропонований підхід формує сигнальні ознаки засобами цифрової КІХ-фільтрації.

Таким чином, відмінністю запропонованого методу є поєднання неортогонального суміщення сигналів, керованого спектрального зважування та процедури SIC у структурі МВЦТРС. Запропонований метод дав змогу визначити принципи структурно-функціональної реалізації багатостанційного доступу, формалізувати парціальне спектральне кодування як цифрову КІХ-фільтрацію та сформулювати математичну основу синтезу частотних вагових функцій. Практичне значення результатів полягає в можливості програмної реалізації парціальних спектральних кодерів і декодерів у цифровому модемі МВЦТРС. Зміна коефіцієнтів КІХ-фільтрів створює передумови для адаптації спектрально-енергетичних профілів до характеристик окремих тропосферних напрямків.

Запропонований метод слід застосовувати з урахуванням таких обмежень:

- у роботі не задано параметричної або статистичної моделі тропосферного каналу;

- не досліджено вплив похибок оцінювання каналу та синхронізації сигналів, а також залишкової інтерференції після SIC;

- не визначено допустимий ступінь перекриття спектрально-енергетичних профілів і граничну кількість одночасно обслуговуваних абонентських станцій. Крім того, практичне застосування запропонованого підходу потребує частотної еквалізації та реконструкції внесків окремих сигналів у приймальному тракті.

Недоліком проведеного дослідження є відсутність повної багатокористувацької моделі та кількісного порівняння запропонованого методу з OMA, PD-NOMA і CD-NOMA за однакових початкових умов. Схемотехнічна перевірка охоплює лише частковий випадок КІХ-фільтра з двома ненульовими відліками імпульсної характеристики. Тому можливе підвищення спектральної ефективності та стійкості розділення сигналів слід розглядати як обґрунтовану передумову, а не як кількісно підтверджену перевагу.

Подальший розвиток дослідження доцільно спрямувати на розроблення алгоритму розрахунку коефіцієнтів ортогонального розкладу та критеріїв вибору поліноміального базису, дослідження впливу кількості абонентських сигналів, ступеня перекриття профілів, порядку КІХ-фільтрів і похибок оцінювання каналу на якість розділення. Наступним етапом дослідження мають бути моделювання повної багатокористувацької системи в частотно-селективному тропосферному каналі та порівняння модифікованого методу з OMA, PD-NOMA і CD-NOMA за спектральною ефективністю, імовірністю бітової помилки, відношенням сигналу до суми інтерференції та шуму, рівнем залишкової інтерференції після SIC й обчислювальною складністю приймача.

5. Висновки

У статті розроблено та аналітично описано модифікований метод неортогонального

множинного доступу з парціальним спектральним кодуванням для МВЦТРС, що функціонує за топологією PtMP. Визначено структурно-функціональну схему формування групового сигналу та розділення абонентських сигналів у спільному часово-частотному ресурсі.

Парціальне спектральне кодування формалізовано як цифрову КІХ-фільтрацію. Встановлено, що коефіцієнти та довжина імпульсної характеристики КІХ-фільтра визначають форму спектрально-енергетичного профілю абонентського сигналу. Це дає змогу використовувати частотно-залежний профіль як додаткову сигнальну ознаку під час розділення неортогонально суміщених сигналів.

Показано можливість використання поліномів Лежандра, Чебишова та Гегенбауера як ортогональних базисних функцій для параметричного синтезу частотних вагових функцій парціальних каналів обробки. Вибір поліноміального базису, порядку поліномів і коефіцієнтів розкладу визначає форму відповідного спектрально-енергетичного профілю.

Для розглянутого часткового випадку КІХ-фільтра результати схематичного моделювання за $p = 1$ і $p = 2$ узгоджуються з аналітично визначеними нормованими спектрально-енергетичними профілями. Це підтверджує отриману залежність між параметром затримки КІХ-фільтра та формою профілю в межах розглянутого часткового випадку.

Практичне значення результатів полягає в

можливості програмної реалізації парціальних спектральних кодерів у цифровому модемі МВЦТРС і використання сформованих профілів під час розділення абонентських сигналів. Водночас кількісне підвищення спектральної ефективності та стійкості розділення в межах проведеного дослідження не підтверджено.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення алгоритму розрахунку коефіцієнтів ортогонального розкладу, моделювання повної багатокористувацької системи та порівняння модифікованого методу з ОМА, PD-NOMA і CD-NOMA за показниками ефективності.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів, зокрема фінансового, авторського чи іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження або результати, опубліковані в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Comtech (2024), *COMET Data Sheet*, technical data sheet, available at: https://comtech.com/wp-content/uploads/2024/07/Comet-Data-Sheet_19224.pdf
- Cubic (2023), *GATR 2.4m Troposcatter Data Sheet*, technical data sheet, available at: https://www.cubic.com/sites/default/files/2023-02/Cubic_Datasheet_GATR_Troposcatter.pdf
- Ultra I&C (2025), *Archer Troposcatter Terminals Data Sheet*, technical data sheet, available at: https://www.ultra-ic.com/media/caboizyk/archer-datasheet-july2025_web.pdf
- Spectra Group (UK) Limited (n.d.), *Over The Horizon Communications Networks*. Retrieved June 17, 2026, available at: <https://spectra-group.co.uk/tropo/>
- Sarbu, A., Alexandrescu, D., and Galben, C. (2025), "Prospects of troposcatter systems in military communication networks", *International Conference Knowledge-Based Organization*, vol. 31, no. 3, pp. 142–148, doi: <https://doi.org/10.2478/kbo-2025-0090>
- Colom Piella, G., and Marzal Ruano, C. (2025), "Has Russian Electronic Warfare Underperformed in the Ukrainian Conflict?", *Journal of Strategic Security*, vol. 18, no. 4, pp. 78–95, doi: <https://doi.org/10.5038/1944-0472.18.4.2369>
- Почерняєв В. М., Повхліб В. С., Наритник Т. М. Мобільна вузлова цифрова тропосферна станція: пат. 126206 Україна: МПК H04B 7/04, H04B 7/0413. № а202001674; заявл. 10.03.2020; опубл. 31.08.2022, Бюл. № 35.
- ITU-R (2025), *Recommendation ITU-R P.617-6: Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems*, International Telecommunication Union, Geneva, available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.617-6-202509-I/en>
- Shao, J., Liu, Z., Liu, Y., and Xie, T. (2024), "Performance Analysis of Troposphere Scattering Communication Channel with Chirp-BOK Modulation", *Entropy*, vol. 26, no. 12, article 1052, doi: <https://doi.org/10.3390/e26121052>
- Goldsmith, A. (2005), *Wireless Communications*, Cambridge University Press, Cambridge, 644 p., doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841224>
- Tse, D., and Viswanath, P. (2005), *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, Cambridge, 564 p., doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807213>
- Saito, Y., Kishiyama, Y., Benjebbour, A., Nakamura, T., Li, A., and Higuchi, K. (2013), "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access", *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–5, doi: <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2013.6692652>
- 3GPP (2018), *3GPP TR 38.812, version 1.0.0: Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR*, technical report, 3rd Generation Partnership Project, available at: <https://www.3gpp.org/dynareport/38812.htm>
- Dai, L., Wang, B., Ding, Z., Wang, Z., Chen, S., and Hanzo, L. (2018), "A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294–2323, doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2835558>

15. Ding, Z., Lei, X., Karagiannidis, G. K., Schober, R., Yuan, J., and Bhargava, V. K. (2017), "A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181–2195, doi: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725519>
16. Liu, Y., Zhang, S., Mu, X., Ding, Z., Schober, R., Al-Dhahir, N., Hossain, E., and Shen, X. (2022), "Evolution of NOMA Toward Next Generation Multiple Access (NGMA) for 6G", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 4, pp. 1037–1071, doi: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3145234>
17. Makki, B., Chitti, K., Behravan, A., and Alouini, M.-S. (2020), "A Survey of NOMA: Current Status and Open Research Challenges", *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 179–189, doi: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.2969899>
18. Kebede, T., Wondie, Y., Steinbrunn, J., Belay, H. B., and Kornegay, K. T. (2022), "Multi-Carrier Waveforms and Multiple Access Strategies in Wireless Networks: Performance, Applications, and Challenges", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 21120–21140, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3151360>
19. Kazemian, M., Abouei, J., and Anpalagan, A. (2021), "A low complexity enhanced-NOMA scheme to reduce inter-user interference, BER and PAPR in 5G wireless systems", *Physical Communication*, vol. 48, article 101412, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101412>
20. Alkhazzar, A. M. A., and Aghaeinia, H. (2021), "Symbol error rate analysis of non-orthogonal multiple access systems", *Physical Communication*, vol. 46, article 101295, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101295>
21. Harris, F. J. (1978), "On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform", *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, no. 1, pp. 51–83, doi: <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10837>
22. Nuttall, A. H. (1981), "Some Windows with Very Good Sidelobe Behavior", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 29, no. 1, pp. 84–91, doi: <https://doi.org/10.1109/TASSP.1981.1163506>
23. Korn, G. A., and Korn, T. M. (1968), *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1130 p.

Received (Надійшла) 22.06.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.09.2026

Publication date (Дата публікації) 25.09.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

Коваленко Олексій Олександрович – начальник інституту, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна;

Oleksii Kovalenko – Chief of the Institute, Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine;

e-mail: oleksii.kovalenko@viti.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-4087-8770>.

Почерняєв Віталій Миколайович – доктор технічних наук, професор, Національна академія Служби безпеки України, Київ, Україна;

Vitaly Pocherniaiev – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Academy of the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

e-mail: vpochernyayev@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-7130-8668>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603517180>.

Івко Сергій Олександрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник НДУ перспектив розвитку інформаційних систем, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна;

Serhii Ivko – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Research Directorate for Prospective Development of Information Systems, Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine;

e-mail: serhii.ivko@viti.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-8723-9035>.

Modified Method of Non-Orthogonal Multiple Access with Partial Spectral Coding for Mobile Nodal Digital Troposcatter Stations

Oleksii Kovalenko, Vitaly Pocherniaiev, Serhii Ivko

Abstract. Subject. A modified non-orthogonal multiple access method using partial spectral coding of user signals for a mobile nodal digital troposcatter station. **Objective.** To analytically substantiate the generation and separation of multiple user signals in a shared time-frequency resource of a troposcatter channel. **Research tasks.** To define the structural and functional diagram for composite-signal generation and user-signal separation; formulate a mathematical description of partial spectral coding; investigate the use of orthogonal polynomials to synthesize frequency-weighting functions; and verify the derived analytical relationships through circuit-level simulation. **Methods.** The methods included analytical modeling of signal transformations, the z-transform, frequency-response analysis of digital filters, expansion of weighting functions in orthogonal-polynomial bases, and circuit-level simulation for a particular transfer function. **Results.** An individual spectral-energy profile was proposed for each user signal as an additional discriminating feature after non-orthogonal superposition. Analytical expressions were derived for the transfer functions of partial processing channels, spectral-energy profiles, and frequency-weighting functions. Legendre, Chebyshev, and Gegenbauer polynomials were shown to be suitable for controlling the profile shape. Circuit-level simulation confirmed the derived analytical relationships for spectral-energy profile formation in the particular case considered. **Conclusions.** The proposed approach provides a signal-processing and algorithmic foundation for the multiuser physical layer of a troposcatter station and establishes a basis for improving spectrum utilization and the robustness of user-signal separation.

Keywords: non-orthogonal multiple access; partial spectral coding; mobile nodal digital troposcatter station; troposcatter channel; successive interference cancellation; finite impulse response filter; orthogonal polynomials.