

DOI: 10.20535/kpissn.2024.1-4.317380

УДК 621.396.74

М.Ю. Ільченко, С.В. Капштик, Т.М. Наритник*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Відповідальний автор: t.narytnyk@ukr.net

МЕТОД ПРОТИДІЇ БАГАТОПРОМЕНЕВОСТІ У ТРОПОСФЕРНОМУ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ СКЛАДЕНИХ СИГНАЛІВ У БАЗИСІ УОЛША

Проблематика. У сучасних телекомунікаціях для організації зв'язку на далекі відстані використовують системи тропосферного зв'язку. Ці системи дозволяють організувати зв'язок за межами прямої видимості. Важливим фактором, який потрібно враховувати у цих системах, є багатоприменість, яка зумовлена фізичним принципом, що покладений в основу функціонування тропосферних систем. Для подолання негативного впливу цього фактора застосовують рознесений прийом та широкосмугові сигнали. Утім, широкосмугові сигнали використовують надмірну смугу частот і характеризуються низьким значенням спектральної ефективності.

Мета дослідження. Розроблення методу подолання негативного впливу багатоприменості за рахунок застосування складених сигналів у базисі Уолша.

Методика реалізації. Паралельні складені сигнали забезпечують пакетне передавання одночасно групи сигналів, що побудовані на основі повної системи взаємно ортогональних функцій Уолша–Адамара. Кожний сигнал передає один біт інформації, але паралельне передавання пакета взаємно ортогональних сигналів дозволяє уникнути зниження швидкості передавання інформації у системі. Для протидії впливу багатоприменості до складеного сигналу додаються пілот-сигнали, такими пілот-сигналами обирають окремі функції Уолша–Адамара із кращими авто- та взаємно кореляційними властивостями. До переваг складених сигналів у базисі Уолша–Адамара відносять їх спектральну ефективність, що значно перевищує спектральну ефективність широкосмугових сигналів.

Результати дослідження. У роботі описано метод формування складеного сигналу в базисі Уолша–Адамара із пілот-сигналами й наведено функціональну схему приймального пристрою, що забезпечує додетекторне складення сигналів із чотирьох незалежних каналів рознесеного приймання. Визначено залежність спектральної ефективності складених сигналів від розмірності використаного базису Уолша–Адамара. Застосування пілот-сигналів дозволяє забезпечити синхронне складення сигналів, прийнятих із чотирьох незалежних рознесених каналів прийому.

Висновки. Запропоновані технічні рішення з використанням складених сигналів у базисі Уолша дають можливість створювати системи тропосферного зв'язку, що забезпечують роботу в умовах багатоприменості, спектральна ефективність яких значно перевищує цей показник для систем, які використовують сигнали типу М-последовності, що дозволяє збільшити швидкість передавання інформації на однаковій смузі частот або підвищити їх завадостійкість, використовуючи додатково завадостійке кодування за умови фіксованої швидкості передавання інформації.

Ключові слова: тропосферний радіозв'язок; багатоприменість; спектральна ефективність; методи рознесеного приймання; широкосмуговий сигнал; ортогональні сигнали; пілот-сигнали; базис Уолша; функції Уолша–Адамара; сигнали типу М-последовності; приймальний пристрій, швидкість передавання інформації; завадостійке кодування.

Вступ

У системах тропосферного зв'язку важливим фактором, що впливає на показники якості, надійності зв'язку та пропускної здатності системи, є багатоприменість. Природа багатоприменості

полягає у принципі перевипромінювання радіосигналу в межах спільного об'єму, утвореного передавальним і приймальним променями тропосферної радіолінії. Щоб мінімізувати вплив негативного фактора багатоприменості, у системах та обладнанні тропосферного зв'язку

Пропозиція для цитування цієї статті: М.Ю. Ільченко, С.В. Капштик, Т.М. Наритник, “Метод протидії багатоприменості у тропосферному зв'язку на основі застосування складених сигналів у базисі Уолша”, *Наукові вісті КПІ*, № 1–4, с. 18–25, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.317380

Offer a citation for this article: M.Yu. Ilchenko, S.V. Kapshtyk, T.M. Narytnyk, “Method for increasing the spectral efficiency of troposcatter communication based on the use of composite signals in the Walsh basis”, *KPI Science News*, no. 1–4, pp. 18–25, 2024. doi: 10.20535/kpissn.2024.1-4.317380

ку застосовують методи рознесеного приймання та використання сигналів із спеціальними характеристиками [1–7].

В обладнанні передавальних/приймальних засобів станцій тропосферного зв'язку зазвичай використовують рознесення сигналів за частотою та у просторі. Щоб підвищити ефективність рознесеного приймання, в обох випадках використовують сигнали складної форми, зокрема сигнали, побудовані на основі M -последовностей, укорочених M -последовностей і сегментів M -последовностей [4–9]. Реалізація алгоритмів кореляційної обробки сигналів, що надходять із різних каналів приймання, дозволяють забезпечити підвищення якості приймання, компенсуючи (або враховуючи) відносну затримку приймання, що виникає в різних каналах. Попри високу ефективність використання такого методу компенсації багатопроменевості, цей підхід має певні недоліки, зокрема, до недоліку належить його низька спектральна ефективність. Цей недолік взагалі характерний для більшості систем, в яких використовують принцип розширення спектру сигналу з використанням розширювальних последовностей. Отже, підвищення ефективності тропосферного зв'язку методом формування складених сигналів у базисі Уолша в умовах відомих частотних обмежень та обмежень на потужність передавача є актуальним завданням.

Метод формування і приймання складених сигналів у тропосферному каналі з багатопроменевістю

У пошуках методів і засобів забезпечення ефективності тропосферних систем зв'язку і приймання в умовах багатопроменевості доцільно розглянути можливість використання паралельних складених сигналів, що побудовані у базисі ортогональних двійкових функцій Уолша [10–12]. Систему ортогональних функцій Уолша використовують у системах і засобах радіозв'язку. Зокрема, у стандарті стільникового зв'язку IS-95, який в Україні поширився у форматі CDMA-стільникового зв'язку, у прямому та зворотному каналах використовували сигнали, побудовані на базі функцій Уолша.

Функції Уолша є двійковими функціями, що набувають значення -1 або $+1$. До переваг функцій Уолша можна віднести їх ортогональність. Для обчислення лінійної комбінації функцій Уолша використовують добре відомі й відпрацьовані алгоритми дискретного та швидкого

перетворення. Зважаючи на двійковий характер функцій Уолша, в алгоритмах дискретного та швидкого перетворення використовують тільки операції з цілими або дійсними числами. Загальновідомо, що виконання операції швидкого перетворення з дійсними числами не передбачає операцій комплексного множення і потребує в чотири рази менше елементарних операцій множення порівняно з алгоритмами Фур'є.

Використання двійкових функцій Уолша дозволяє забезпечити паралельне, тобто одночасне передавання пакета двійкових символів завдовжки N . Розмірність N визначає базис системи функцій Уолша й зазвичай набуває значення $N = 2^n$. Пакет із N інформаційних двійкових символів надходить на вхід формувача паралельного складеного сигналу. Кожний інформаційний біт здійснює двійкову модуляцію однієї із функцій Уолша–Адамара. Усі модульовані функції Уолша складаються, і таким чином формується багаторівневий складений сигнал, що передає пакет N інформаційних бітів. Складений сигнал, побудований у базисі функцій Уолша–Адамара, визначають таким чином:

$$S(t) = \sum_{i=0}^N c_i(t) w_i(t).$$

У наведеному виразі $c_i(t)$ – двійкові символи пакета інформації, що здійснює модуляцію функцій Уолша–Адамара; $w_i(t)$ – функції Уолша–Адамара розмірності N .

Таким чином, метод протидії багатопроменевості у тропосферному зв'язку на основі застосування складених сигналів у базисі Уолша буде складатись із такої последовності кроків.

1. *Формування пакета інформаційних символів, до якого додано символи пілот-сигналів.*

З метою подолання впливу багатопроменевості до інформаційного пакета додаються пілот-сигнали, такими сигналами обирають кілька функцій Уолша–Адамара $w_i(t)$. Кількість функцій Уолша–Адамара, які використовують як пілот-сигнали n , визначається розмірністю базису Уолша $N = 2^n$ і є показником степеня 2.

2. *Формування складеного сигналу у базисі Уолша–Адамара.*

Відомо, що функції Уолша і сигнали, побудовані на їх основі, є ортогональними на інтервалі тривалості сигналу T . Утім, кожна із цих функцій поступається за своїми авто- і взаємно кореляційними властивостями M -последовностям і похідним від них. Вибираючи функції Уолша, що будуть використовуватись як

пілот-сигнали, особливу увагу приділяють їх періодичним авто- та взаємно кореляційним властивостям. Саме ці показники впливають на ефективність оцінювання відносної затримки, що виникає у каналах тропосферного зв'язку унаслідок впливу багатоприменовості.

Разом із тим у системі ортогональних функцій Уолша є кілька функцій, періодичні авто- і взаємно кореляційні характеристики яких наближаються до характеристик М-последовностей. Ці функції і сигнали, що їм відповідають, можна використовувати як пілот-сигнали для синхронізації складених сигналів, які надходять із різних каналів приймання, обладнаних у станції тропосферного зв'язку.

Процедуру формування складеного сигналу, що побудований у базисі Уолша–Адамара, можна описати з використанням операції множення матриці-стовпця, що містить символи інформаційного повідомлення, на квадратну матрицю Уолша–Адамара H_N розмірністю $N \times N$. На рис. 1 показано процедуру формування складеного сигналу у базисі Уолша–Адамара з пілот-сигналами.

Зображена на рис. 1 процедура формування складеного сигналу є результатом об'єднання кількох схем. Зокрема, операція множення матриці-стовпця на матрицю Адамара – це звичайна операція, яку використовують у системах кодування; формування матриці-стовпця методом об'єднання пакета інформаційних символів і пакета символів пілот-сигналу – це операція, аналогічна формуванню OFDM-сигналу в системах 4G, 5G; амплітудне обмеження сигналу – це операція, яку широко використовують у системах радіозв'язку для підвищення потужності радіосигналу, тому цю схему в такому вигляді запропоновано вперше.

На вхід пристрою формування складеного сигналу надходить пакет інформаційних символів завдовжки $N-n$:

$$C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_{N-n}\},$$

де $c_1, c_2, c_3, \dots, c_{N-n}$ – інформаційні символи передаваного пакета інформації.

Для використання як пілот-сигналів у базисі Уолша обрано n функцій Уолша–Адамара, що відповідають вимогам мінімальних бокових викидів періодичних їх авто- та взаємно кореляційних функцій. Номери обраних функцій у базисі Уолша, що впорядкований з використанням матриць Адамара, включені до пакета символів пілот-сигналів завдовжки n :

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}.$$

Символи z_j , що входять до складу пакета Z , не змінюються. Умовно можна вважати, що для символів z_j виконується умова

$$z_j = 1, j = \overline{1, n}.$$

Пакети інформаційних символів C і символів пілот-сигналів Z формують матрицю-стовпець розмірністю $1 \times N$. Слід зауважити, що символи пілот-сигналів розміщуються у структурі матриці-стовпця відповідно до номерів обраних функцій Уолша, що будуть використані як пілот-сигнали. Сформована таким чином матриця-стовпець є вихідним масивом для формування складеного сигналу (див. рис. 1). Матрицю-стовпець множать на квадратну матрицю H_N розмірністю $N \times N$. Матриця H_N є матрицею Адамара, що впорядковує систему функцій Уолша розмірності N .

Для формування складеного сигналу у базисі Уолша–Адамара можна використовувати



Рис. 1. Процедура формування складеного сигналу у базисі Уолша–Адамара

алгоритм оберненого швидкого перетворення, в основі побудови якого покладено алгоритм «метелика». Сформований таким чином складений сигнал являє собою матрицю-рядок завдовжки N :

$$S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_k, \dots, s_{N-1}, s_N\}.$$

У наведеній формі кожний символ матриці-рядка s_i визначає амплітуду складеного сигналу S на k -му часовому інтервалі тривалістю Δt . В аналоговій формі сформований складений сигнал має вигляд

$$\begin{aligned} S(t) &= \sum_{i=1}^N s_i(t) w_i(t) = \\ &= \sum_{i=1}^{N-n} c_i(t) w_i(t) + \sum_{j=1}^n z_j w_j(t). \end{aligned}$$

Складений сигнал $S(t)$ являє собою суму двох складових: групу сигналів, що передають інформаційні символи $c_i(t)w_i(t)$, та групу пілот-сигналів $z_j w_j(t)$. Відсутність у позначенні символа пілот-сигналу z_j параметра часу t означає, що ці символи є незмінними.

Складений сигнал $S(t)$ являє собою випадковий процес із дискретними значеннями, який описують біноміальним розподілом з нульовим середнім або математичним сподіванням. До особливостей функцій Уолша належить рівність кількості інтервалів часу, або тактів, де функція набуває значення $+1$, кількості інтервалів часу, де функція набуває значення -1 . Отже середнє, або математичне сподівання кожної окремої функції та їх сукупності дорівнює 0. Стандартне відхилення для випадкової величини, розподіленої за біноміальним розподілом із рівноймовірним значенням $+1$ та -1 для кожного складового процесу, визначають формулою

$$\sigma_N = 0,5\sqrt{N}.$$

Таким чином, складені сигнали характеризуються великим значенням пік-фактора, який становить

$$K_{\text{пф}} = \frac{N}{\sigma_N} = 2\sqrt{N}.$$

Для скорочення пік-фактора складеного сигналу $S(t)$ у схемі формування складеного сигналу (див. рис. 1) застосовано обмежувач. У результаті двостороннього обмеження амплітуди сигналу на виході обмежувача маємо таку суміш трьох випадкових процесів:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{N-n} c_i(t) w_i(t) + \sum_{j=1}^n z_j w_j(t) + \xi(t).$$

У наведеному виразі процес $\xi(t)$ представляє завади, що описують порушення ортогональності між функціями Уолша, яке виникає у результаті амплітудного обмеження складового сигналу.

З виходу обмежувача сигнал подається до передавача тропосферної радіолінії. Передавання радіосигналів здійснюється у двочастотному режимі на частотах f_{c1} та f_{c2} .

3. *Приймання складених сигналів з чотирьох незалежних каналів.*

На приймальній стороні тропосферної радіолінії для подолання багатопроменевості використовують традиційну схему рознесеного прийому — із двома рознесеними антенами на двох частотах — у результаті досягають чотирикратного рознесення. На рис. 2 подано запропоновану авторами статті функціональну схему приймального пристрою станції тропосферного зв'язку, яка використовує складені сигнали у базисі Уолша–Адамара з пілот-сигналами.

Запропоновану схему розроблено спеціально для ілюстрації методу рознесеного приймання паралельних складених сигналів із чотирьох незалежних каналів в умовах впливу багатопроменевості.

Високочастотні радіосигнали приймають дві антени, далі вони надходять на входи двох малошумних підсилювачів (МШП). З виходу МШП сигнали надходять на входи двох змішувачів. На опорні входи змішувачів надходять сигнали частот f_1 та f_2 від формувача опорних частот. Щоб підвищити стабільність опорних частот, вхід формувача підключений до виходу високостабільного кварцового генератора, який є джерелом високостабільних коливань і міток синхронізації усієї станції тропосферного зв'язку. Частоти на виході формувача опорних частот розраховані таким чином, щоб на виході сформувати сигнали на проміжній частоті $f_{\text{пч}}$, яка є єдиною для усіх каналів обробки сигналів у приймальному пристрої:

$$f_{\text{пч}} = f_{c1} - f_1 = f_{c2} - f_2.$$

Підсилювач проміжної частоти (ППЧ) підсилює сигнал і передає його на вхід аналого-цифрового перетворювача (А/Д).

4. *Обробка у каналі приймання сигналів з використанням узгоджених фільтрів і формування оцінки відносної затримки та визначення відношення «сигнал — шум».*

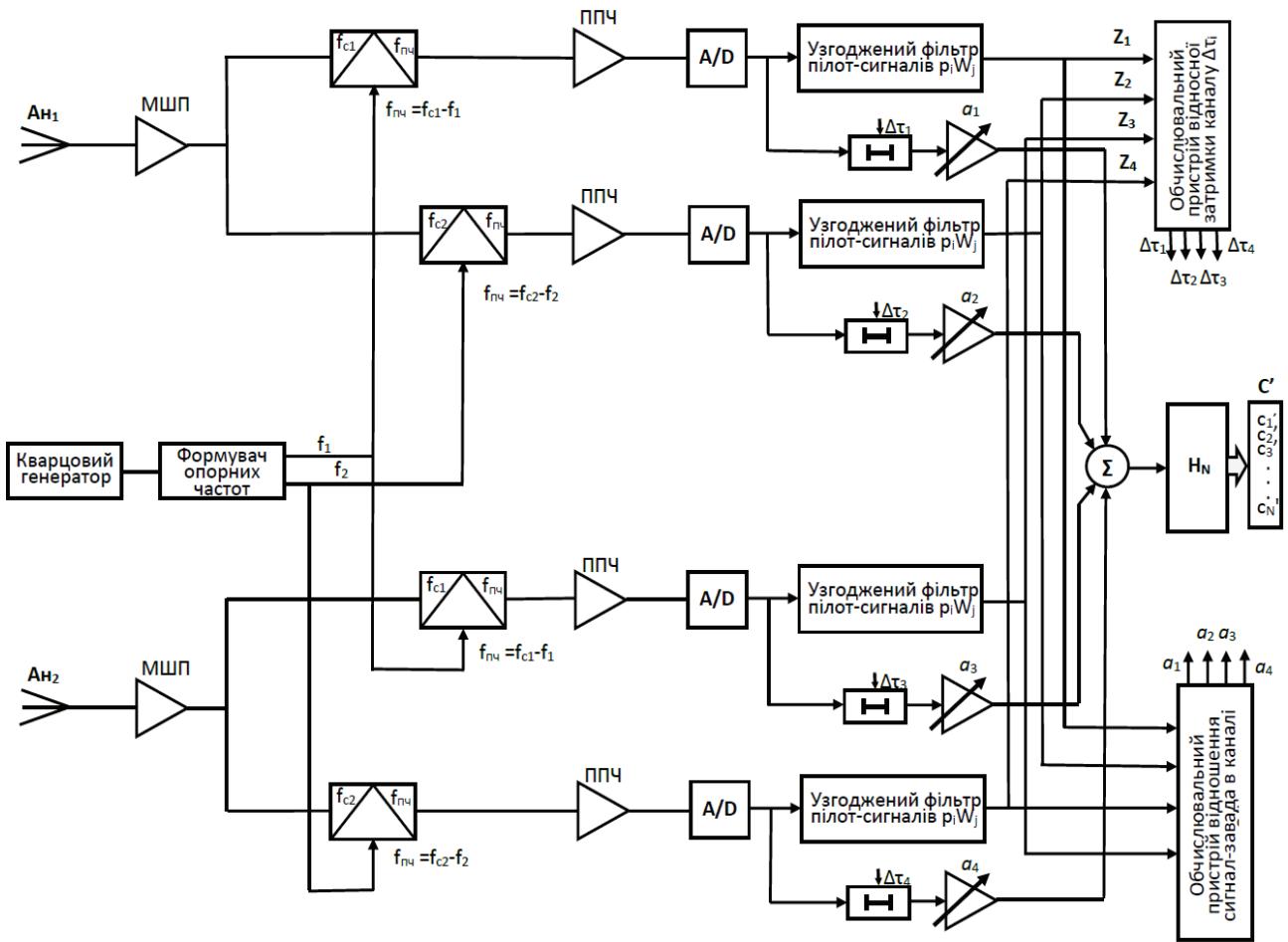


Рис. 2. Функціональна схема приймального пристрою станції тропосферного зв'язку, яка використовує складені сигнали у базисі Уолша-Адамара з пілот-сигналами

На вхід А/D надходить суміш прийнятого складеного сигналу, завади порушення ортогональності та шум:

$$S'(t) = \sum_{i=1}^{N-n} c'_i(t) w_i(t + \tau_i) + \sum_{j=1}^n z'_j w_j(t + \tau_j) + \xi'(t + \tau_l) + n(t).$$

У наведеному виразі c'_i та z'_j – прийняті інформаційні символи і символи пілот-сигналів, ξ' – прийнята реалізація завади порушення ортогональності, $n(t)$ – тепловий шум. Усі складові суміші, що надійшли від передавача тропосферної радіолінії, за винятком теплового шуму, мають однакову затримку τ_b , яка є спільною для обраного каналу приймання і включає затримку на багатопрореневість. Індекс l визначає номер каналу l у випадку чотириканального приймання $l = 1, 4$.

З виходу А/D суміш складеного сигналу, завади і теплового шуму надходить на вхід узгодженого фільтра і керованої лінії затримки. Імпульсна характеристика узгодженого фільтра $h(t)$ налаштована на приймання одночасно n пілот-сигналів, що входять до складеного сигналу. В аналоговій формі прийом складеного сигналу в узгодженому фільтрі можна записати у такому вигляді:

$$Z_l = \int_0^T S'_l(t) h(t - \Delta t) dt = \int_0^T \left(\sum_{i=1}^{N-n} c'_i(t) w_i(t + \tau_i) + \sum_{j=1}^n z'_j w_j(t + \tau_j) + \xi'(t + \tau_l) + n(t) \right) \times h(t - \Delta t) dt.$$

Наведений вираз можна поділити на складові таким чином:

$$Z_l = \sum_{i=1}^{N-nT} \int_0^T c'_i(t) w_i(t + \tau_l) h(t - \Delta t) dt + \\ + \sum_{j=1}^n \int_0^T z'_j w_j(t + \tau_l) h(t - \Delta t) dt + \int_0^T \xi'(t + \tau_l) h(t - \Delta t) dt + \\ + \int_0^T n(t) h(t - \Delta t) dt.$$

За умови забезпечення циклової синхронізації приймання складеного сигналу перша складова у наведеному виразі визначає взаємно кореляційну функцію між функціями Уолша, що передають інформаційні символи, та функціями Уолша, що є пілот-сигналами. Зважаючи на те, що базис Уолша–Адамара побудований ортогональними функціями Уолша, ця складова набуває нульового значення на інтервали тривалості складового сигналу T . Третя і четверта складові визначають вплив завад порушення ортогональності та теплових шумів. Друга складова, яка становить інтерес, може бути подана таким чином:

$$Z'_l = \sum_{j=1}^n \int_0^T z'_j w_j(t + \tau_l) h(t - \Delta t) dt = \sum_{j=1}^n Z'_{l,j}(\tau_l).$$

Функція $Z'_{l,j}(\tau_l)$ є відгуком на виході узгодженого фільтра в l -му каналі приймання на j -й пілот-сигнал, як пілот-сигнал використовують функцію Уолша.

Оцінки з виходів узгоджених фільтрів пілот-сигналів, які формуються в разі виявлення відгуків одразу для усіх n пілот-сигналів, передаються та вхід обчислювального пристрою відносно затримки каналу $\Delta\tau$. Обчислювальний пристрій має чотири входи для чотирьох каналів приймання. Обчислювальний пристрій розраховує відносну затримку надходження оцінки для кожного каналу окремо, взявши за точку відліку момент надходження першої оцінки. На підставі визначених відносних затримок $\Delta\tau_i$ формуються керуючі сигнали для керованих ліній затримок, що входять до складу кожного каналу приймання.

Паралельно оцінки Z_l надходять на входи обчислювального пристрою відношення «сигнал – завада» (див. рис. 2). У цьому пристрої формуються оцінки показника «сигнал – завада» для кожного каналу приймання. У результаті оцінювання пристрій формує чотири сигнали a_i , які визначають вагові коефіцієнти і передаються на керуючі входи каналних підсилювачів.

5. *Оптимальне складання прийнятих сигналів з чотирьох каналів із врахуванням відносно затримки та відношення «сигнал – шум».*

У результаті отримання оцінок відносних затримок та вагових коефіцієнтів на виході суматора формується підсумковий прийнятий складовий сигнал:

$$S'(t) = \sum_{l=1}^4 a_l S'_l(t - \Delta\tau_l).$$

6. *Передавання матриці-рядка прийнятого сигналу для множення на обернену матрицю Адамара для формування пакета прийнятих інформаційних символів.*

Сформований прийнятий складовий сигнал $S'(t)$ подається на вхід матриці Адамара, що здійснює пряме перетворення Уолша–Адамара для визначення прийнятої комбінації інформаційних символів C' :

$$C' = \{c'_1, c'_2, c'_3, \dots, c'_{N-n-1}, c'_{N-n}\}.$$

Прийнята комбінація інформаційних символів містить пакет інформації, що передана одним складеним сигналом у тропосферній системі зв'язку.

Оцінювання спектральної ефективності

Важливим показником ефективності систем тропосферного зв'язку є спектральна ефективність, яку визначають як відношення кількості інформаційних символів (бітів) до одиниці ширини спектру частот 1 Гц. Для систем тропосферного зв'язку, в яких для протидії багатопроменевості використовують сигнали типу М-последовності або її сегменти, спектральну ефективність оцінюють виразом

$$\eta_M = \frac{R_{\text{бит}}}{\Delta F_M} = \frac{R_{\text{бит}}}{m \Delta F_{\text{бит}}} = \frac{1}{m} [\text{біт/Гц}].$$

У наведеному виразі $R_{\text{бит}}$ – швидкість передавання інформації [біт/с]; ΔF_M – ширина смуги частот, потрібна для передавання сигналів типу М-последовності [Гц]; m – довжина М-последовності; $\Delta F_{\text{бит}}$ – смуга частот, потрібна для передавання потоку інформації зі швидкістю $R_{\text{бит}}$ без використання розширювальної М-последовності.

У разі використання складених сигналів кожний біт передається протягом усієї тривалості складеного сигналу $T = N \Delta t$, де T – розмірність ортогонального базису Уолша–Адамара, $N = 2^n$; Δt – тривалість одного символу функції Уолша, $\Delta t = 1 / R_{\text{бит}}$. Смуга частот, потрібна для

передавання складеного сигналу зі швидкістю передавання інформації $R_{\text{біт}}$, становить

$$\Delta F_{\text{cc}} = \frac{1}{\Delta t} = R_{\text{біт}} [\text{Гц}].$$

Відповідно, спектральна ефективність складених сигналів

$$\eta_{\text{cc}} = \frac{R_{\text{біт}}}{\Delta F_{\text{біт}}} = 1 [\text{біт} / \text{Гц}].$$

Цей показник становить ~ 1 біт/Гц і значно перевищує показники для систем, що використовують сигнали типу М-послідовності. Для М-послідовності завдовжки $n = 128$ спектральна ефективність становить $\eta_{M=128} = 1 / 128 = 0,00781$ біт/Гц, а для $n = 512$ цей показник становить $\eta_{M=512} = 1 / 512 = 0,00195$ біт/Гц.

Утім, системи із М-послідовностями забезпечують кращі показники за показником «сигнал – завада». Отриманий виграв у спектральній ефективності дозволяє збільшити швидкість передавання інформації за однакової смуги частот або додатково використовувати завадостійке кодування за фіксованої швидкості передавання інформації.

Висновки

1. Запропонований авторами метод формування складеного сигналу, що побудований у ба-

зисі Уолша–Адамара із пілот-сигналами з використанням операції множення матриці-стовпця, яка містить символи інформаційного повідомлення, на квадратну матрицю Уолша–Адамара розмірністю $N \times N$ може бути взятий за основу для мінімізації впливу негативного фактора багатопроменевості під час створення сучасних тропосферних ліній і мереж зв'язку нового покоління.

2. Розроблена й описана функціональна схема приймального пристрою станції тропосферного зв'язку з використанням традиційної схеми рознесеного приймання – із двома рознесеними антенами на двох частотах, що використовує складені сигнали у базисі Уолша–Адамара із пілот-сигналами, – забезпечує за чотирикратного рознесення частот подолання багатопроменевості.

3. Запропоновані технічні рішення з використанням методу формування складених сигналів у базисі Уолша дають можливість у перспективі створити системи тропосферного зв'язку, спектральна ефективність яких значно перевищує цей показник для систем, які використовують сигнали типу М-послідовності, що дозволяє збільшити швидкість передавання інформації за однакової смуги частот або підвищити їх завадостійкість, використовуючи додатково завадостійке кодування за фіксованої швидкості передавання інформації.

References

- [1] Sposib troposfernogo zviyazku / Patent of Ukraine for a utility model No. 108632, publication date 07/15/2016, Bull. No. 14 with priority from 01/29/2016 / Ichenko M.Yu., Narytnyk T.M., Slyusar V.I.
- [2] Recommendation ITU-R P.617-3 (09/2013). Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems. P Series. Radiowave propagation/© ITU 2013.
- [3] Wave Propagation Models in the Troposphere for Long-Range UHF/SHF Radio Connections. / Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1473256/FULLTEXT02.pdf>
- [4] Ichenko M.Yu., Narytnyk T.M., Slyusar V.I. / Napryamky stvorenniya troposfernykh stanciy novogo pokolinnya//Cyfrovii tekhnologiyi.-2014.- Nom. 16, P.p. 8–18
- [5] Narytnyk T.M., Vetoshko I.P., Semerij S.I., Saiko V.G., Sarapulov S.V. / Analitichniy oglyad suchasnykh tekhnologii troposfernogo ta radioreleynogo zviyazku // Visnyk universytetu «Ukrayina». Seriya - Informatyka, obchyslyvalna tekhnika, kibernetyka, 2019. - # 2 (23). – P.p. 105–120.
- [6] Slyusar V.I., Masesov M.O. / Ideologiya pobudovy perspektivnykh troposfernykh (radioreleynykh) stanciy specialnogo pryznachennya.// Zbirnyk naukovykh prac' VITI NTUU “KPI”. – 2010. – N. 2. – P.p. 114–120.
- [7] Narytnyk T.M. / Analiz elektromagnitnoyi bezpeky suchasnykh troposfernykh radioreleynykh stanciy / Materialy 2-oyi Mizhnarodnoyi nauково-tekhnichnoyi konferenciyi «Problemy elektro-magnitnoyi sumisnosti perspektivnykh bezdrotovykh merezh zviyazku EMS 2016» -s.61-63 m. Xarkiv
- [8] Cyfrovii radiorelejni ta troposferni liniyi zviyazku (osnovy rozrakhunku) / Narytnyk T. M., Pochernyayev V. M., Povxlib V. S./ Odes. nacz. akad. zviyazku im. O. S. Popova. - Odesa : ONAZ im. O. S. Popova, 2019. - 163 s. - ISBN 978-617-582-066-7
- [9] T.N. Narytnyk, V.V. Volkov, Yu.V. Utkin / Radiorelejni i troposferni systemy peredachi / Navch. pos. – 2008. – 349 s.
- [10] Numerical Methods. Using MATLAB. Book · Fourth Edition · 2019 8.4 The Walsh Transforms <https://www.sciencedirect.com/book/9780128122563/numerical-methods>

- [11] Vykorystannya funktsij Uolsha dlya pidvyshhennya energetychnoyi prykhovanosti cyfrovoyi radioliniyi / Andreyev O. V., Dubyna O. F., Nikitchuk T. M., Cyporenko V. V. // Visnyk NTUU «KPI». Radiotekhnika, radioaparotobuduvannya : zbirny`k naukovy`x pracz`. – 2021. – N. 85. – P.p. 27–32. doi: 10.20535/RADAP.2021.85.27-32
- [12] Koduvannya sygnaliv v elektronnykh systemax. Chastyna 3. Sposoby koduvannya sygnaliv: Tom 1. Naturalni, efektyvni ta linijni kody [Elektronnyj resurs] : navch. posib. dlya stud. specialnosti 171 «Elektronika», osvitnoyi programy «Elektronni prylady ta prystroji» / S.V. Denbnoveczkyj, I.V. Melnyk, L.D. Pysarenko / KPI im. Igorya Sikorskogo. – Elektronni tekstovi dani (1 fajl: 6,32 Mbajt). – Kyiv : KPI im. Igorya Sikorskogo, 2021.

M.Yu. Ilchenko, S.V. Kapshtyk, T.M. Narytnyk

METHOD FOR INCREASING THE SPECTRAL EFFICIENCY OF TROPOSCATTER COMMUNICATION BASED ON THE USE OF COMPOSITE SIGNALS IN THE WALSH BASIS

Background. In modern telecommunications, troposcatter communication systems organize long-distance communication. These systems allow communication beyond the line of sight. An important factor that must be considered in these systems is multipath, due to the physical principle underlying the functioning of troposcatter systems. Diversity reception and broadband signals are used to overcome this factor's negative impact. However, broadband signals use an excessive frequency band and are characterized by a low spectral efficiency.

Objective. The Purpose of the paper is to develop a method for overcoming the negative impact of multipath by using composite signals on the Walsh basis.

Methods. Parallel composite signals provide simultaneous packet transmission of a group of signals built based on a complete system of mutually orthogonal Walsh-Hadamard functions. Each signal transmits one bit of information, but the parallel transmission of a packet of mutually orthogonal signals avoids decreasing the system's information transmission rate. To counteract the effect of multipath, pilot signals are added to the composite signal, as individual Walsh-Hadamard functions with better auto- and cross-correlation properties are selected. The advantages of composite signals in the Walsh-Hadamard basis include their spectral efficiency, which significantly exceeds the spectral efficiency of broadband signals. The paper describes a method for forming a composite signal on a Walsh-Hadamard basis with pilot signals and a functional diagram of a receiving device that provides optimal pre-detector addition of signals from four independent diversity reception channels.

Results. The method of forming the composite signal with pilot signals based on the Walsh-Hadamard basis is presented as a functional diagram of a reception device that will ensure optimal detection of composite signals from several independent channels of a separated receiver. The spectral efficiency of the composite signals is shown on the size of the Walsh-Hadamard vicor basis. The introduction of the pilot signals makes it possible to ensure the synchronous composition of signals received from several independent receiving channels.

Conclusions. The proposed technical solutions using composite signals in the Walsh-Hadamard basis make it possible to create troposcatter communication systems that provide operation in multi-path conditions, and the spectral efficiency of which significantly exceeds this indicator for systems using M-sequence signals, which allows increasing in the information transmission rate at the same frequency bandwidth or increasing their noise immunity by using additional noise-resistant coding at a fixed information transmission rate.

Keywords: troposcatter communication; multipath propagation; spectral efficiency; diversity technique; broadband signal; orthogonal signals; pilot signals; Walsh basis; Walsh-Hadamard functions; M-sequence type signals; receiving device; information transmission rate; noise-eliminating coding.

Рекомендована Радою
НН інституту телекомунікаційних систем
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
7 жовтня 2024 року

Прийнята до публікації
6 грудня 2024 року