

ВИЗНАЧЕННЯ СИГНАЛЬНО-КОДОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ 6G

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто способи досягнення підвищеної ефективності телекомунікаційної радіосистеми 6G на основі запропонованої оптимальної сигнально-кової конструкції із врахуванням вимог для високоточного сканування та високошвидкісного передавання даних.

Ключові слова: телекомунікаційна система передавання, схема модуляції, метод мультиплексування, поза-смугове випромінювання, доплерівський зсув, штучний інтелект, наднадійна система передавання з малою затримкою.

Abstract

Ways to achieve increased efficiency of the 6G telecommunication radio system based on the proposed optimal signal-code design, taking into account the requirements for high-precision scanning and high-speed data transmission, are considered.

Keywords: telecommunication transmission system, modulation scheme, multiplexing method, out-of-band radiation, Doppler shift, artificial intelligence, ultra-reliable low-delay transmission system.

Вступ

Форма сигналу та схема модуляції для стільникового зв'язку в основному враховують такі вимоги: широкий спектр варіантів використання, включаючи eMBB, mMTC та URLLC; висока ефективність використання спектру для задоволення експоненційно зростаючого трафіку даних у сценаріях використання eMBB; досить широке охоплення; уніфікована структура для низхідного, висхідного та прямого каналів, добре сумісна з MIMO для високої ефективності використання спектру; єдина структура побудови для низьких та високих частот; низька складність, простота впровадження та хороша енергоефективність. Кожна форма сигналу має свої переваги та недоліки, тому не існує такого варіанту, який перевершить всі інші форми сигналу відповідно до зазначених вище вимог [1].

Метою роботи є визначення оптимальної форми сигналу та схеми модуляції для стільникового зв'язку із врахуванням високої ефективності використання спектру, єдиної структури побудови для низьких та високих частот, простоти впровадження та хорошої енергоефективності.

Результати дослідження

Форми сигналів в системах 6G та схеми модуляції повинні відповідати вимогам до сценаріїв використання, телекомунікаційних пристроїв та спектру, які мають відношення до форми хвилі та схеми модуляції, що передбачає проектування та впровадження різних конструкцій телекомунікаційної системи.

Враховуючи дуже високу робочу частоту телекомунікаційних систем 6G, ключовими вимогами є низький PAPR для покриття, висока стійкість до радіочастотних спотворень (наприклад, фазового шуму), низька складність для широкосмугових операцій та сумісність із MIMO. При цьому, особливістю каналу передавання даних є великі втрати на трасі з розрідженим розсіюванням [2].

Основними вимогами для супутникового зв'язку є низький PAPR для покриття та низька складність для енергозбереження. При цьому, особливістю супутникового каналу передавання є великі втрати на трасі через великі відстані та високу швидкість руху супутника [3].

Основними вимогами для зв'язку малого радіусу дії є висока пропускна здатність (наприклад, сумісність із MIMO) та стійкість до радіочастотних спотворень. При цьому, в каналах переважає пряма видимість (LOS) з плоскою частотною характеристикою [4].

Основними вимогами до недорогих телекомунікаційних пристроїв є низький PAPR, низька складність з метою енергозбереження та висока надійність. При цьому, функціональна особливість каналу залежить від сценаріїв застосування. Наприклад, для вузькосмугових сценаріїв з широким покриттям каналів характерна відносно плоска частотна характеристика [5].

Основними вимогами до телекомунікаційних засобів із високою мобільністю є висока стійкість до ефекту Доплера та сумісність із MIMO. При цьому, канали передавання вибіркові за часом або двічі вибіркові через ефект Доплера.

Ключовими вимогами для наднадійних систем передавання з малою затримкою (URLLC) є наднизька затримка та висока надійність (наприклад, сумісність із MIMO). При цьому, функціональна особливість каналу передавання залежить від сценаріїв застосування [6].

На додаток до згаданих раніше вимог з боку зв'язку ключовими вимогами з боку сканування є точність оцінки та висока роздільна здатність, особливо при радіочастотних спотвореннях (наприклад, помилка синхронізації часу/частоти, фазовий шум та нелінійність). Особливістю каналу для системи ISAC є високі втрати на трасі при двосторонньому скануванні та можливість спільного використання багатопробіжних бездротових каналів із комунікаціями [7].

Виходячи з цих вимог, при проектуванні систем 6G слід враховувати енергетичні фактори, деякі з яких вже були розглянуті у технічному звіті [1] для NR за межами 52,6 ГГц. Очікується, що ефективність підсилювачів потужності на високих частотах знизиться, а деякі варіанти використання (наприклад, супутниковий зв'язок) чутливі до споживаної потужності. Тому необхідно використовувати насамперед сигнали з низьким PAPR, щоб мінімізувати погіршення ефективності підсилювачів потужності. Крім того, деякі транзистори з високою рухливістю електронів у ТГц-діапазоні не можуть забезпечувати безперервну передачу енергії, що зумовлює використання дискретної форми сигналу [2]. Динамічні діапазони аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) визначають границі можливого розширення робочої смуги пропускання, що призводить до збільшення труднощів у забезпеченні великої ефективної кількості бітів (ENOB) в АЦП/ЦАП при заданій потужності споживання. Але для пристосування до сигналів основної смуги частот з більш високим PAPR, передавальному ЦАП потрібно забезпечити більш високий ENOB. Крім того, недорогі пристрої можуть використовувати ЦАП/АЦП із низьким значенням ENOB. Ці чинники необхідно враховувати, оскільки вони залежать від форми хвилі і схем модуляції [8].

Весь радіотракт проектується та налаштовується відповідно до вимог радіосигналу, таких як спектральна маска випромінювання, коефіцієнт витоку по сусідньому каналу, внутрішньосмугове та поза-смугове випромінювання модульованого сигналу та величина вектора помилок. Форми сигналів та схеми модуляції повинні відповідати цим вимогам, щоб забезпечувати відповідні характеристики якості внутрішньосмугового сигналу та мінімізувати перешкоди у сусідньому каналі та вплив на сигнали у сусідніх каналах. Ширина займаної смуги сигналу та захисна смуга для даної смуги пропускання каналу визначають використання частоти, що критично для досягнення високої пропускної спроможності (наприклад, для зв'язку на малих відстанях).

Враховуючи високу швидкість передачі даних та високу частоту дискретизації на фоні використання недорогих високочастотних кінцевих пристроїв або енергочутливого супутникового зв'язку, при розробці методів генерації/модуляції та прийому/демодуляції сигналу необхідно дотримуватись компромісу між складністю обладнання та характеристиками каналу зв'язку. Відмінності в особливостях використання та розподілу частот у різних країнах можуть вимагати підтримки різних смуг пропускання. Отже, під час проектування слід враховувати гнучкість спектра [9].

Стійкість до зсуву за часом і частотою і фазовим шумом зумовлено наявністю набагато вищого зміщення несучої частоти і фазового шуму з недосконалими підсилювачами потужності і кварцовими генераторами та більш критичні для високих частот. Крім того, при збільшенні несучої частоти та відносної швидкості руху збільшуються доплерівський зсув та розсіювання. Для недорогих пристроїв, на додаток до зміщення частоти і фазового шуму (залежно від робочої частоти), також слід враховувати зсув часу, оскільки для них може бути доступна тільки груба синхронізація шкали часу. Для реалізації сканування з високою роздільною здатністю потрібно накопичення сигналів, яке залежить від когерентності сигналів відлуння. Таким чином, фазовий шум є основним фактором, що впливає на роботу багатофункціональної телекомунікаційної системи [6].

Технологія МІМО є хорошим способом підвищення ефективності використання спектру. Зв'язок у міліметровому та ТГц-діапазонах може підтримувати як мінімум МІМО 2×2 з двома поляризаціями, навіть для каналів чистої прямої видимості. Отже, нові форми сигналів мають бути легко розширені до операцій МІМО з розумною складністю.

Найбільшою проблемою є суперечність між ключовими показниками ефективності (КРІ) для забезпечення процесу зв'язку та процесу сканування. В галузі зв'язку основними завданнями є максимальне підвищення ефективності використання спектра та позасмугового випромінювання (ООВЕ). Однак при здійсненні вимірювання дальності та доплерівського зсуву оптимальна форма сигналу спрямована на досягнення максимальної роздільної здатності та точності оцінки.

З урахуванням вимог та результатів досліджень, можна запропонувати деякі ефективні рекомендації щодо визначення оптимальної сигнально-кової конструкції для телекомунікаційної системи підвищеної ефективності. Два перспективні способи можуть знизити PAPR без шкоди для ефективності використання спектру: використання багаточастотних сигналів з передовими методами зменшення PAPR та сигнали з однією несучою з передовими методами модуляції. Більш того, оптимізовані для штучного інтелекту (ШІ) демодулятори можуть сприяти зменшенню PAPR.

Орієнтовані на недорогі пристрої форми сигналів призначені для вузькосмугових сценаріїв, в яких складність обробки невисока для забезпечення енергозбереження. Також бажано забезпечити стійкість до обмеження, що створюється недорогим телекомунікаційним обладнанням (наприклад, зміщення за часом і частотою). Прикладом є двопозиційна модуляція/демодуляція, яку легко реалізувати, якщо робоча швидкість передачі даних і швидкість доступу відповідають вимогам конкретного сценарію. З іншого боку, у міліметровому/терагерцовому діапазоні сигнали розраховані на дуже широку смугу пропускання. Зокрема, для уникнення високого енергоспоживання бажано використовувати просту форму сигналу на основі вирівнювальних кодів [3].

Сигнал з покращеною частотно-часовою локалізацією підвищить ефективність використання спектру для зв'язку на малих відстанях із високими вимогами до швидкості передачі даних. Він також знизить вимоги до часової синхронізації для доступу до недорогих пристроїв UL. Крім методів фільтрації та віконного перетворення Фур'є, можуть вимагати дослідження інші методи (наприклад, FTN). Крім того, метод URLLC вимагає хорошої локалізації в часі для досягнення відносно короткої тривалості символу та хорошої якості декодування.

Ефективність використання спектру може бути покращена за рахунок використання хорошої частотно-часової локалізації, а подальше підвищення ефективності застосування спектру може бути реалізовано за рахунок використання оптимізованих для ШІ частотних комбінацій та демодуляторів високого порядку, які можуть допомогти покращити форму сигналу за умов розумної складності демодуляції. Для додатків, чутливих до витрат, зумовлених пілот-сигналом, також можна розглянути некогерентну модуляцію і демодуляцію без пілот-сигналу [9].

Для високошвидкісних сценаріїв використання з подвійною селективністю каналів слід розглянути вдосконалені схеми, які відповідають накладним витратам, складності та іншим вимогам (наприклад, низька затримка для чутливих до затримки). За основу можна взяти технологію OFDM із додатковими DMRS для відстеження каналу в системах NR. Традиційні методи, що ґрунтуються на обробці сигналів, такі як відстеження фазового шуму та цифрове попереднє спотворення для компенсації нелінійності підсилювача потужності, викликали великий інтерес в академічних колах. Однак існує значний розрив між реальними та ідеальними показниками.

Висновки

Досліджено методи на основі штучного інтелекту для подальшого скорочення розриву та досягнення майже ідеальних характеристик телекомунікаційних систем на основі оптимальних сигнально-кодових конструкцій. Розглянуто значний обсяг досліджень спрямований на розробку сигналу для систем ISAC та визначено багато можливостей для пошуку форми сигналу, яка забезпечує баланс між гарним зв'язком та параметрами сканування через їх суперечливі вимоги до сигналу. Отже, при розробці форми сигналу необхідно враховувати призначення сигналів ISAC лише для об'єктів сканування, передачі даних з можливістю сканування або для того і іншого рівною мірою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 3GPP, Study on requirements for NR beyond 52.6 GHz, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Report (TR) 38.807, Jan. 2020, version 16.0.0.
2. J. M. Jornet and I. F. Akyildiz, Femtosecond-long pulse-based modulation for terahertz band communication in nanonetworks, IEEE Transactions on Communications, vol. 62, no. 5, pp. 1742–1754, 2014.
3. Васильківський М. В. Оцінювання енергетичних характеристик радіоканалів міліметрового діапазону [Текст] / М. В. Васильківський, О. І. Мельничук, О. В. Стальченко // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)", Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – 2019. – С. 80–81.
4. Васильківський М. В. Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж п'ятого покоління [Текст] / М. В. Васильківський, С. О. Болдинюк // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)", Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – 2019. – С. 68–69.
5. Кичак В. М. Технології надпровідних приймачів терагерцового діапазону [Текст] / В. М. Кичак, М. В. Васильківський // Матеріали тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції "Перспективи телекомунікацій", 15—19 квітня 2019 р. — Київ. — Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". - С. 222-224.
6. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Челоян В.А. Спектральний метод оцінювання джитеру в телекомунікаційних системах. - Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2010, № 2, С. 109-114.
7. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Кичак В.М. Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах: Монографія. - Вінниця: ВНТУ, 2015. - 140 с.
8. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Стальченко О.В. Пристрій аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів. - Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.– 2013, № 2.– С.82-85.
9. Васильківський, М., Нікітович, Д., & Болдирева, О. (2022). Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 5–17. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1>

Варгатюк Ганна Леонідівна — аспірант групи 172-20а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: annaantonuik@gmail.com

Болдирева Ольга Сергіївна — аспірант групи 172-19а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: rtt13bpoludenko@gmail.com

Якубівська Наталія Володимирівна — студент групи ТКС-21мз, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: nakubivska@gmail.com

Науковий керівник: **Васильківський Микола Володимирович** — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Varhatiuk Hanna L. — graduate student of group 172-20a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: annaantonuik@gmail.com

Boldyreva Olha S. — graduate student of group 172-19a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rtt13bpoludenko@gmail.com

Yakubivska Natalia V. — student of TKS-21m group, faculty of information electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: nakubivska@gmail.com

Supervisor: **Vasykivskiy Mykola V.** — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia