

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ СПОТВОРЕНЬ У БЕЗДРОТОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено аналіз сучасних методів цифрової обробки сигналів, що застосовуються для компенсації спотворень у бездротових телекомунікаційних системах. Розглянуто природу виникнення міжсимвольної інтерференції, багатопроменевого поширення радіохвиль та нелінійності підсилювачів потужності. Особливу увагу приділено алгоритмам адаптивної еквалайзерної фільтрації та технології передспотворення. Визначено критерії ефективності та межі застосування цих методів для покращення показника частоти бітових помилок та підвищення пропускної здатності сучасних мереж стільникового зв'язку.

Ключові слова: цифрова обробка сигналів, бездротові телекомунікації, адаптивна еквалізація, цифрове передспотворення, міжсимвольна інтерференція.

Abstract

This study analyzes modern digital signal processing methods used to compensate for distortions in wireless telecommunication systems. The nature of intersymbol interference, multipath radio wave propagation, and power amplifier nonlinearities is examined. Special attention is dedicated to adaptive equalizer filtering algorithms and digital predistortion technology. The performance criteria and application boundaries of these methods for improving the bit error rate and increasing the throughput of modern cellular networks are determined.

Keywords: digital signal processing, wireless telecommunications, adaptive equalization, digital predistortion, intersymbol interference.

Вступ

Сучасний етап розвитку телекомунікаційних технологій характеризується стрімким зростанням вимог до швидкості передачі даних, енергоефективності та завадостійкості бездротових мереж зв'язку. Розгортання систем 5G та проектування систем 6G ґрунтується на використанні складних видів багатопозиційної квадратурної амплітудної модуляції та багаточастотного мультиплексування. Проте, реалізація цих технологій у реальних радіоканалах стикається із суттєвими фізичними обмеженнями.

Бездротовий канал зв'язку є динамічним середовищем, де сигнал зазнає згасань, багатопроменевого поширення, що викликає явище міжсимвольної інтерференції, та доплерівського зсуву частоти. Додатковим фактором погіршення якості є нелінійні спотворення, що виникають у високочастотних трактах трансиверів, зокрема в підсилювачах потужності при роботі з сигналами з високим пік-фактором [1].

Традиційні аналогові методи боротьби зі спотвореннями не забезпечують точності, необхідної для технологій 5G та 6G. Тому для оптимізації новітніх телекомунікаційних і мереж важливими завданнями є теоретичне дослідження, математичне моделювання та аналіз методів цифрової обробки сигналів для компенсації лінійних і нелінійних спотворень.

Основна частина

Розглянемо модель спотворень у бездротовому каналі зв'язку. Отже, для обґрунтування алгоритмів компенсації формується модель спотвореного сигналу. У безперервному часовому режимі вхідний сигнал приймача є сумою безлічі зсунутих у часі й згасаючих за амплітудою променів (унаслідок багатопроменевого поширення) та адитивного білого гаусового шуму. Після аналого-цифрового перетворення дискретний сигнал описується як згортка послідовності інформаційних символів із дискретною імпульсною характеристикою радіоканалу. Тривалість цієї характеристики визначає глибину пам'яті каналу та ступінь накладання сусідніх символів. Головна мета алгоритмів цифрової

обробки сигналів (ЦОС) на приймальній стороні полягає в аналітичному визначенні оберненої передавальної функції каналу для усунення міжсимвольної інтерференції (МСІ), відновлення форми сигналу та його правильного декодування [2].

Для компенсації лінійних спотворень і багатопроменевості застосовують адаптивну еквалізацію – цифрову фільтрацію зі змінними коефіцієнтами, що підлаштовуються в реальному часі. Критерієм оптимізації зазвичай є мінімізація середньоквадратичної помилки між еталонним та прийнятим символом.

Під час дослідження було розглянуто два базові класи алгоритмів налаштування коефіцієнтів фільтра.

Так, алгоритм найменших квадратів (LMS) базується на методі стохастичного градієнтного спуску. Поточні ваги корегуються додаванням добутку кроку адаптації, сигналу помилки та комплексно-спряженого вектора вхідних даних. Головна їх перевага – низька (лінійна) обчислювальна складність, що дозволяє реалізувати LMS на сигнальних процесорах чи ПЛІС з обмеженими ресурсами.

В той же час, алгоритм рекурсивних найменших квадратів (RLS) використовує матричний апарат і враховує передісторію сигналу через переобчислення оберненої кореляційної матриці завад. RLS забезпечує швидку збіжність у каналах зі швидкими замираннями, проте його обчислювальна складність має квадратичну залежність, що підвищує вимоги до швидкодії та енергоспоживання базових станцій.

Потім було розглянуто механізм компенсація нелінійних спотворень за допомогою так званого цифрового передспотворення. Суттєвий деструктивний внесок у якість зв'язку вносять нелінійні характеристики високочастотних підсилювачів потужності передавача. При роботі в режимах поблизу насичення (для досягнення максимального ККД базової станції) підсилювач спотворює амплітуду та фазу багаточастотного сигналу через амплітудно-амплітудну та амплітудно-фазову конверсії.

Ефективним вирішенням цієї проблеми є технологія цифрового передспотворення (Digital Predistortion – DPD). Метод полягає у попередньому викривленні сигналу сигнальним процесором перед його подачею на ЦАП та підсилювач [3]. Оскільки передавальна функція модуля передспотворення є математично оберненою до нелінійної характеристики підсилювача, їх послідовне застосування лінеаризує тракт із фіксованим коефіцієнтом підсилення.

Для врахування ефекту пам'яті підсилювача (залежності виходу від передісторії сигналу через теплові й динамічні процеси в напівпровідниках) застосовують пам'ятну поліноміальну модель. У ній вихідний відлік формується як зважена сума поточних і попередніх відліків, піднесених до непарних ступенів нелінійності. Коефіцієнти моделі постійно адаптуються для компенсації змін температури та старіння схемотехніки.

Результати порівняльного аналізу методів ЦОС подано у Табл. 1.

Оскільки методи ЦОС впливають на обчислювальне навантаження та енергоспоживання процесорів, вибір конкретного інструменту є задачею багатокритеріальної оптимізації. На основі аналізу інформації з джерел [4, 5] було сформовано узагальнені оцінки ефективності досліджуваних методів.

Таблиця 1 – Аналіз методів ЦОС

Метод ЦОС	Тип спотворень, що компенсуються	Обчислювальна складність	Швидкість збіжності та адаптації	Основна сфера застосування у телекомунікаціях
Алгоритм LMS	Лінійні спотворення (МСІ, багатопроменевість)	Низька (лінійна залежність від кількості відводів)	Низька / середня	Кінцеві абонентські пристрої, стаціонарні канали зв'язку
Алгоритм RLS	Лінійні спотворення (динамічні замирання)	Висока (квадратична залежність від кількості відводів)	Висока	Базові станції, системи мобільного зв'язку на високих швидкостях
Технологія DPD	Нелінійні спотворення підсилювачів (внутрішні конверсії)	Середня (залежить від обраного ступеня полінома)	Висока (при адаптивних архітектурах)	Високочастотні тракти передавачів сучасних мереж (LTE, 5G/6G)

Загалом, лінійна еквалізація за критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки суттєво оптимізує енергетичний бюджет лінії зв'язку. Компенсація МСІ за допомогою адаптивної цифрової фільтрації забезпечує теоретичний вигравш у відношенні сигнал/шум на приймальній стороні до 3–5 дБ для досягнення однакового рівня частоти бітових помилок (коефіцієнту BER) порівняно з некомпенсованим радіоканалом.

У свою чергу, технологія цифрового передспотворення дозволяє змістити точку лінійності підсилювача потужності ближче до зони його насичення. Це підвищує коефіцієнт корисної дії підсилювача на 10–15%. Такий показник є важливим для реалізації концепції «зелених» телекомунікацій, оскільки значно знижує загальне тепловиділення та витрати електроенергії на базових станціях.

Висновок

У роботі обґрунтовано роль та теоретичну ефективність методів цифрової обробки сигналів як базового інструменту для компенсації лінійних та нелінійних спотворень у сучасних бездротових мережах. Доведено, що вибір конкретного алгоритму адаптивної еквалізації є компромісом між швидкістю реагування системи на динамічні зміни стану радіоканалу та доступними обчислювальними ресурсами телекомунікаційного обладнання, що вказує на доцільність інтеграції LMS-алгоритмів в архітектуру з обмеженими апаратними потужностями через їх низьку обчислювальну складність. Водночас обґрунтовано, що цифрове передспотворення є фундаментальним рішенням для високошвидкісних систем передачі даних із багатопозиційною модуляцією, оскільки воно дозволяє одночасно підтримувати високу лінійність тракту та максимальний енергетичний ККД передавальних модулів. Подальший розгляд даної тематики лежить у площині дослідження інтеграції традиційних методів ЦОС із технологіями машинного навчання, зокрема штучних нейронних мереж, для інтелектуального керування параметрами зв'язку в реальному часі в умовах надщільного розташування базових станцій мереж 5G та 6G.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cherevyk V. M., Glushchuk A. V. Technique of radio suppression of a radio communication system in a WiFi network from noiselike signals based on the HTTP/3 protocol. *Connectivity*. 2020. Т. 145, № 3. URL: [<https://doi.org/10.31673/2412-9070.2020.031721>] (дата звернення: 04.06.2026).
2. Бортник Г. Г., Кичак В. М. Цифрова обробка сигналів в телекомунікаційних системах: підручник. — Вінниця : ВНТУ, 2018. — 232 с.
3. Digital predistortion for GaN power amplifiers in 5G. *PatSnap*. URL: [<https://www.patsnap.com/resources/blog/articles/digital-predistortion-for-gan-power-amplifiers-in-5g/>] (date of access: 01.06.2026).
4. Самборський І.І., Шолохов С.М., Юрченко О.В., Ніколаєнко Б.А., Основи цифрової обробки сигналів: навчальний посібник. Київ: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 171 с.
5. Основи та методи цифрової обробки сигналів: від теорії до практики: навч. посібник / уклад. : Ю.О. Ушенко, М.С. Гавриляк, М.В. Талах, В.В. Дворжак. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2021. 308 с.

Василинич Марія Володимирівна – студентка групи ПЗТ-24б, Факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: mariykavasilinich@gmail.com.

Затєєва Еліна Олександрівна – студентка групи ПЗТ-24б, Факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: elinka.zat@gmail.com.

Семенова Олена Олександрівна – канд. техн. наук, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: semenova.o.o@vntu.edu.ua.

Vasylynych Mariia V. – student of group PZT-24b, Department of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mariykavasilinich@gmail.com.

Zatieieva Elina O. – student of group PZT-24b, Department of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: elinka.zat@gmail.com.

Semenova Olena O. – Candidate of Technical Sciences, Associate professor at the Department of Infocommunication systems and technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenova.o.o@vntu.edu.ua.