

## РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

УДК 621.391

М. В. Васильківський, О. С. Городецька, Б. С. Климчук, В. В. Говорун

СТРАТЕГІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РОЗВИТКУ  
АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ РАДІОМЕРЕЖ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**Анотація.** Розглянуто технології побудови телекомунікаційних систем та мереж на основі технології 6G, які зможуть забезпечити доступ до нових функціональних можливостей та інформаційних послуг з використанням інноваційних бездротових технологій та методів штучного інтелекту. При цьому, інфокомунікаційні системи на основі 6G характеризуються новими функціональними параметрами та пристроями, зокрема новий спектр, нові канали, нові матеріали, нові антени, нові обчислювальні технології та нові кінцеві пристрої з врахуванням можливості одночасного використання ТГц-діапазону для зв'язку та процесу сканування. Робота систем зв'язку та сканування в нових високочастотних діапазонах на основі нових матеріалів та антен базується на застосуванні кремнієвої фотоники, фотонних кристалів, гетерогенних, реконфігурованих, фотоелектричних та плазмонних матеріалів. При цьому, також виникає необхідність використання нових типів антен для діапазонів ТГц частот. Це особливо важливо, оскільки через значні втрати при передачі в ТГц-діапазоні антени істотно відрізняються від звичайних, які підключаються до радіочастотних систем через коаксіальні кабелі або мікросмужкові лінії. Враховуючи, що закон Мура незабаром втратить свою актуальність, здійснено дослідження нових обчислювальних технологій, таких як обчислення на основі структур штучного інтелекту та квантові обчислення. Розглянуто ключові показники ефективності майбутніх телекомунікаційних кінцевих пристроїв у складі інфокомунікаційних радіомереж 6G та визначено їх функціональні можливості. Виконано дослідження архітектури систем терагерцового зв'язку на двох різних підходах побудови апаратного забезпечення: електронного, де радіочастоти множаться до ТГц; та фотонного, де оптичні частоти діляться до ТГц. Визначено, що більшість таких систем та мереж використовуються для зв'язку на малих відстанях усередині приміщень через високе атмосферне згасання в ТГц-діапазоні. Розглянуто передумови досягнення більш високих характеристик за рахунок додавання нових матеріалів в кремнієвий чіп, таких як фотонні кристали, фотоелектричні елементи і плазмові поверхні. В результаті, нові конструкції антени на кристали та в корпусі, поряд із технологією компактних лінз, такий як RIS зможуть забезпечити більш точну реалізацію бажаних характеристик антени, а також зменшити розмір системи. Визначено можливість використовувати нові методи зв'язку та візуалізації, але реалізація терагерцових систем, заснованих на електроніці, оптоелектроніці та фотоніці, залежатиме від сценарію використання та робочих частот.

**Ключові слова:** нанофотодетектор, штучний інтелект, телекомунікаційний пристрій, інфокомунікаційна мережа, каналне кодування, безпроводний зв'язок, машинне навчання, віртуальний пристрій, ключовий показник ефективності.

**Abstract.** Technologies for building telecommunication systems and networks based on 6G technology, which will be able to provide access to new functionality and information services using innovative wireless technologies and artificial intelligence methods, are considered. At the same time, information communication systems based on 6G are characterized by new functional parameters and devices, in particular, a new spectrum, new channels, new materials, new antennas, new computing technologies and new end devices, taking into account the possibility of simultaneous use of the THz range for communication and the scanning process. The operation of communication and scanning systems in new high-frequency ranges based on new materials and antennas is based on the application of silicon photonics, photonic crystals, heterogeneous, reconfigurable, photoelectric and plasmonic materials. At the same time, there is also a need to use new types of antennas for the THz frequency ranges. This is especially important, because due to significant transmission losses in the THz range, antennas are significantly different from conventional antennas that are connected to radio frequency systems via coaxial cables or microstrip lines. Given that Moore's law will soon lose its relevance, research into new computing technologies, such as computing based on artificial intelligence structures and quantum computing, has begun. The key indicators of the effectiveness of future telecommunication terminal devices as part of 6G information communication radio networks are considered and their functional capabilities are determined. The study of the architecture of terahertz communication systems was carried out using two different approaches to the construction of hardware: electronic, where radio frequencies are multiplied up to THz; and photonic, where optical frequencies are divided up to THz. It has been determined that most of such systems and networks are used for communication over short distances inside premises due to high atmospheric attenuation in the THz range. The prerequisites for achieving higher characteristics due to the addition of new materials to the silicon chip, such as photonic crystals, photovoltaic elements and plasma surfaces, are considered. As a result, new on-chip and in-body antenna designs, along with compact lens technology such as RIS, can provide more accurate implementation of the desired antenna characteristics, as well as reduce system size. Opportunities to use new communication and visualization methods have been identified, but implementation of terahertz systems based on electronics, optoelectronics, and photonics will depend on the usage scenario and operating frequencies.

**Key words:** nanophotodetector, artificial intelligence, telecommunication device, information communication network, channel coding, wireless communication, machine learning, virtual device, key performance indicator.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-83-91>.

## Вступ

Накопичений досвід практичного застосування міліметрового діапазону сформував передумови для освоєння ТГц-діапазону – поки що хоча б кількох частотних смуг. Очікується, що комбінація міліметрового та терагерцового діапазонів забезпечить швидкість передачі даних у діапазоні Тбіт/с та доставку зображень з високою роздільною здатністю. З появою нових спектрів, варіантів використання та апаратних технологій (таких як інтелектуальна поверхня) виникла гостра необхідність у розробці оновленої моделі каналу, яка може достатньо точно відображати поширення радіохвиль ТГц-діапазону [1].

Інноваційна структура телекомунікаційних засобів, що використовує одночасно як спільний орбітальний кутовий момент, так і масивну архітектуру МІМО (технологія передачі для 6G), покращує продуктивність системи та забезпечує мультиплікативний вииграш ефективності використання робочого спектра.

Зрештою, оскільки закон Мура скоро перестане діяти, а кремнієва технологія наближається до фізичної межі, передбачається фундаментальний стрибок обчислювальної потужності, який стане наслідком розвитку двох нових концепцій – нейроморфних та квантових обчислень.

### Актуальність

Стрімкий розвиток цифрового зв'язку протягом багатьох років можна охарактеризувати як наслідок значного прогресу в напівпровідникових технологіях. При наближенні до більш високочастотної частини спектру у рамках ТГц-діапазону в значній мірі починають використовуватись сучасні фотонні матеріали. Зокрема фотонні кристали дозволяють виготовляти оптичні компоненти з низькими втратами. Крім того, фотоелектричні матеріали перетворюють світловий потік на електричні сигнали і дозволяють фотодетекторам виконувати ключові функції фотонної системи ТГц-діапазону. Оскільки ТГц-система може бути реалізована на фотонній платформі, при цьому терагерцові хвилі можна генерувати, пропускаючи фотострум через фотопровідну антену (photoconductive antenna, PCA) або електрооптичний кристал. При освітленні лазерними променями на певних частотах в деяких напівпровідникових підкладках, наприклад InP і GaAs, може генеруватися струм фотопровідності, який в подальшому може випромінюватись у простір у вигляді ТГц-хвилі за допомогою антени [2].

Нанопотодетектори мають схожий принцип роботи, з тією різницею, що вони вимірюють фотострум, що генерується, за допомогою схеми, призначеної для візуалізації/зчитування. Завдяки невеликому розміру і низькому енергоспоживанню нанопотодетектори демонструють величезний потенціал застосування в мобільних засобах і пристроях.

Завдяки розсіювачам з ретельно вивіреними формами і відстанями між ними інтелектуальні поверхні, такі як решітки, що відбивають і передають, можуть служити плоскими «відбивачами» або «лінзами». У такі поверхні зазвичай вбудовують компоненти, що реконфігуруються для забезпечення гнучкого підстроювання до різних рівнів освітленості радіохвилями. Метаповерхні підтримують розумну функціональність, забезпечуючи задану користувачем реакцію на певний рівень освітленості. У майбутньому для програмування цієї реакції можна буде використовувати цифровий контролер і такі інтелектуальні поверхні гарантовано забезпечать компактні, високоефективні та недорогі системи зв'язку в ТГц-діапазоні.

### Мета досліджень

Мета статті є дослідження способів підвищення продуктивності телекомунікаційних радіосистем за допомогою інноваційних технічних засобів у складі інфокомунікаційних мереж 6G.

### Постановка задач

Бездротові революції, безумовно, неможливі без розробки передових технологій та революційних застосувань для них. В результаті виникають передумови для появи нового покоління бездротових технологій. Саме це сталося, коли відбулася конвергенція мобільного голосового та цифрового радіозв'язку та коли мобільний інтернет об'єднався з радіочастотною технологією підвищеної пропускної здатності, адаптованою до протоколу IP. Нова мережа 5G покликана зробити бездротовими всі канали зв'язку - як високонавантажені, так і надвисоконадійні, з'єднуючи все, чим ми користуємося, і прискорюючи цифрову трансформацію кожного бізнесу. Спираючись на фундамент 5G, бездротова мережа 6G передбачає повсюдну інтелектуальну революцію. Фактично апаратно-програмне забезпечення на основі 6G буде служити нейронною мережею в масштабі людства і сполучною ланкою між двома світами, фізичним та цифровим [3]. Штучний інтелект (ШІ), що базується на машинному навчанні, стане основою технології 6G, і в цій сфері наше суспільство повністю перейде від підключених людей та підключених речей до підключеного інтелекту. Інакше висловлюючись, бездротова мережа 6G націлена на надання послуги ШІ кожній людині, будинку та бізнесу, що, своєю чергою, призведе до появи загального інтелекту. З точки зору бездротових технологій нам вперше надається можливість відчувати навколишнє середовище та предмети, використовуючи радіохвилі бездротового зв'язку. Таким чином, крім передачі бітів даних, бездротова мережа 6G може служити як мережеві органи почуттів – сенсорів, які отримують знання і великі дані з фізичного світу в реальному часі. Ця отримана інформація не тільки матиме велике значення для покращення передачі даних, але й сприятиме машинному навчанню для служб ШІ. Зрозуміло, це бачення майбутнього є надзвичайно амбітним, а його реалізація суттєво вплине як на наше суспільство, так і на економіку [4]. До того ж бездротову мережу 6G не вдасться створити без застосування революційних технологічних інновацій у галузі зв'язку, обчислень, матеріалів та алгоритмів. Враховуючи сказане, в даній статті розв'язуються такі задачі:

- аналіз апаратного забезпечення радіотехнічного обладнання;
- дослідження сучасних інформаційних систем ТГц-діапазону;
- особливості створення інноваційних телекомунікаційних пристроїв для систем 6G;
- дослідження ефективного каналного кодування радіосигналів в мережах 6G.

### Аналіз апаратного забезпечення радіотехнічного обладнання

Розвиток кремнієвої платформи послужило поштовхом до розвитку фотонних систем [4, 5]. Очікується, що прогрес, досягнутий в області кремнієвої платформи, призведе до того, що в найближчому майбутньому ми станемо свідками більш досконалих компактних і недорогих фотонних і електронних телекомунікаційних пристроїв.

Фотонні інтегральні схеми можуть отримати суттєвий вигравш від використання гетерогенних платформ. Зокрема, з'єднання різних шарів матеріалів III-V на одній матриці дозволяє оптимізувати будову кожного компонента. Іншими словами, для кожного компонента можна вибрати свої оптимальні матеріали та конструкцію, а потім інтегрувати їх на одному кремнієвому кристалі. Інноваційна гетерогенна система «мережа на кристалі» включає повний набір компонентів фотонного зв'язку, зокрема лазери, модулятори і підсилювачі різних стеках шарів III-V [1].

Використовуючи матеріали з властивостями, що електрично змінюються, можна створювати пристрої з підвищеною функціональністю, меншими розмірами та меншими витратами. По суті, різні матеріали, що налаштовуються, використовують для гнучкого і динамічного керування властивостями системи передавання. Наприклад, нанесенням на інтелектуальну поверхню матеріалів, що реконфігуруються і з'єднавши її з цифровою схемою керування можна реалізувати програмовану реконфігуровану інтелектуальну поверхню RIS. Матеріали з фазовим переходом (PCM) реконфігуруються шляхом нагрівання та охолодження, в результаті чого відбувається перемикання між аморфним (ізолюючим) та кристалічним (провідним) станами. Перемикачі PCM швидкі, компактні і мають низькі втрати. У порівнянні з мікроелектромеханічними системами (MEMS), PCM показали кращу надійність та швидкодію на частотах міліметрового діапазону.

Найбільш прямим і очевидним застосуванням фотоелектричної технології, ймовірно, можна вважати сонячні елементи, але при цьому не потрібно ігнорувати CMOS-сенсори, які використовуються в цифрових камерах і багатьох інших додатках. Традиційно для сонячних елементів використовувалися напівпровідникові матеріали, такі як кремній. Згодом для підвищення ефективності фотоперетворення до складу структури було додано метал, що призвело до розробки чутливих фотодетекторів, наприклад, детектора Шоткі. Крім того, було доведено, що застосування нанорозмірних світловловлюючих шарів, таких як металеві наночастинки, збільшує концентрацію світла та розсіювання, що, у свою чергу, збільшує фотоелектричний ефект. Більш того, металеві ґратки також можуть сприяти збудженню поверхневих плазмонних хвиль, тим самим збільшуючи взаємодію між фотонами та електронами.

Фотодетектори на основі фотоелектричних матеріалів мають багато застосувань. Наприклад, квантові точки використовувалися для збільшення поглинання світла під час моніторингу стану здоров'я [6]. При цьому показано, що матриця фотоприймачів на основі вуглецевих нанотрубок [2] може створювати зображення з високою роздільною здатністю. В результаті виготовлено браслет на основі масиву графенових фотодетекторів для моніторингу стану здоров'я [3]. Оскільки потреба у фотонних системах зростає, використання фотоелектричних матеріалів, як і раніше, буде зумовлювати створення компактних, а також високопродуктивних фотонних пристроїв для сучасних радіосистем та мереж.

Плазмонні матеріали використовують енергію світла для генерації резонансних коливань носіїв заряду – плазмонів. При цьому, плазмонні наноструктури використовуються у фотоелектричних пристроях для підвищення ефективності фотоперетворення. Використовуючи ефект збудження на плазмонних метаповерхнях, інтелектуальні багатофункціональні поверхні можуть виконувати функції біосенсорів. При досягненні поглибленого розуміння природи SPP, а також поведінки матеріалів, що підтримують SPP, знайдуться нові цікаві застосування для плазмонних матеріалів.

### Дослідження сучасних інформаційних систем ТГц-діапазону

Отже, система ТГц-діапазону може бути реалізована за допомогою електронного або фотонного підходу. Зокрема, фотонна технологія в основному використовує верхні частоти ТГц-діапазону, електронна технологія може забезпечити рішення в нижніх частотах діапазону. Максимальна частота, на якій може працювати терагерцова електронна схема, залежить від максимальної частоти  $f_{\max}$  транзистора, виготовленого за певним твердотільним техпроцесом.

Розробка різних компонентів ТГц-діапазону, придатних для розміщення на високоінтегрованій платформі, дозволила освоїти безліч пристроїв ТГц-діапазону. Наприклад, платформи на основі SiGe використовувалися у системах для бездротового зв'язку, сканування та візуалізації в ТГц-діапазоні, переважно на частотах нижче 300 ГГц [4]. Крім цього, розвиток технологій матеріалів III-V - наприклад, з використанням InP - показав, що на їх основі можна створювати швидкодійні ТГц-системи. Гетерогенна інтегрована платформа III-V/кремній є перспективним варіантом для створення як комерційних, так і промислових портативних ТГц-систем.

Результати досліджень параметрів та характеристик сучасних систем бездротового зв'язку в діапазоні від 275 ГГц до 450 ГГц показали, що електронна та оптоелектронна технології продемонстрували швидкість передачі даних до 100 Гбіт/с, хоча відстань зв'язку в більшості випадків становить менше двох метрів. Зокрема система передавання на основі технології InP – НЕМТ забезпечує швидкість передачі

даних до 120 Гбіт / с на відстані 9,8 м. Оптиелектронна система, що використовує приймач на основі технології InGaAs HEMT здатна забезпечувати швидкість передачі даних до 100 Гбіт/с на відстані 15 м.

Технологія побудови зображень у ближньому полі в ТГц-діапазоні може подолати фундаментальну дифракційну межу та надати зображення надвисокої роздільної здатності, що відкриває великі перспективи для медичних застосувань, таких як візуалізація біомолекул.

Спектроскопічну візуалізацію в ТГц-діапазоні можна розділити на спектроскопію в часовій області (TDS) і безперервну спектроскопію хвилі (CWS). У TDS генерується імпульс ТГц-діапазону, який спрямовується на зразок матеріалу. Передані або відображені сигнали збираються і потім перетворюються на частотну область. Цей записаний спектр містить унікальний відбиток зразка, який можна використовувати для визначення властивостей матеріалу, з якого складається зразок.

Радіолокаційна візуалізація в ТГц-діапазоні використовує принцип радарного далекоміра і може забезпечити високу роздільну здатність/якість зображення. Попит на радарні датчики в автомобільних системах, охороні здоров'я, мобільних пристроях та інших додатках останнім часом суттєво збільшився – перспективним кандидатом для задоволення таких вимог є кремнієва платформа.

Досягнення технології напівпровідників типу III-V/кремній дозволили виконувати гетерогенну інтеграцію різних високопродуктивних компонентів, таких як електронні, фотонні, магнітні та графенові компоненти. Тому для забезпечення оптимальних характеристик необхідна комплексна платформа, яка була б одночасно компактною та дуже різномірною, а також вбирала б у себе всі згадані компоненти. Більше того, останні досягнення в галузі плазмонних технологій відкрили перспективи інтеграції плазмонних компонентів на кристал кремнію [3, 4]. Отже, оптимізована інтеграція гетерогенних компонентів на одній кремнієвій пластині може призвести до створення електронно-фотонної/плазмонної системи, здатної забезпечити високу продуктивність поряд з оптимальним балансом між вартістю, ефективністю та програмованістю, – системи для наступного покоління комерційних та промислових пристроїв ТГц-діапазону.

### Особливості створення інноваційних телекомунікаційних пристроїв для систем 6G

Інноваційні можливості засобів 6G радикально змінюють не лише конструкцію, а й роль мобільних пристроїв у нашому житті. При цьому, мобільні пристрої отримують такі можливості:

- сприйняття на рівні людини (необмежена смуга пропускання для візуального/звукового сприйняття на рівні людини та реалістичного спілкування між людьми [1]);
- сканування навколишнього середовища (можливість отримання мультиспектральних зображень з близької відстані [2] та високоточного позиціонування);
- взаємодія людини і кіберпростору (голографічні дисплеї для взаємодії людини з кіберсвітом [3]);
- збирання енергії (бездротова зарядка та одночасна бездротова передача інформації та енергії).

Нові можливості перетворюють нинішній світ «інтелектуальних помічників» на світ «кіберфізичної взаємодії».

Сучасні смартфони діють як шлюзи, що з'єднують фізичний світ із кіберсвітом, переважно забезпечуючи доступ до інтернету. Передбачається, що мобільні бездротові пристрої перетворяться на мобільні гіпертермінали у світі кіберфізичної взаємодії – так зване «цифрове Я». Ці пристрої будуть перевершувати людські можливості по ряду напрямків, таких як інтелектуальне розпізнавання та сприйняття навколишнього середовища.

Враховуючи перераховані функціональні можливості, можна виділити чотири основні тенденції розробки мобільних пристроїв, як показано на рис. 1.



Рисунок 1 – Телекомунікаційні пристрої наступних поколінь

Отже, завдяки технологічним досягненням нові пристрої будуть: розумнішими – смартфони стануть не лише потужнішими, а й отримають опцію доповненої реальності для автоматизації навколишнього життя. Обчислювальна потужність донедавна зростала відповідно до закону Мура, що сприяло розвитку штучного інтелекту та машинного навчання в останні роки. Крім того, успіхи, досягнуті у виробництві напівпровідників, відкривають шлях до більш високої обчислювальної продуктивності, кращої енергоефективності, меншого розміру мікросхем та підвищеної щільності розміщення транзисторів.

Збільшення продуктивності смартфонів зумовлює покращену реалізацію можливості штучного інтелекту. Тому, все більше смартфонів оснащується спеціалізованими вбудованими модулями нейронної обробки для обчислень зі штучним інтелектом. Алгоритми машинного навчання можуть використовуватися для виконання безлічі обчислювально-ресурсоемних завдань, таких як доповнена реальність, розпізнавання осіб та розпізнавання голосу та мовлення.

У той же час парадигма граничних обчислень (edge computing) дозволяє переносити ресурсоемні завдання з мобільних пристроїв до граничних хмар. При цьому, граничні обчислення потребують від бездротових мереж наступного покоління надвисокої швидкості передачі даних, наднизької затримки та надвисокої надійності. У майбутньому пристрої стануть більш інтелектуальними, а також забезпечать захист конфіденційності за рахунок використання розподілених обчислень та навчання завдяки граничним обчисленням, хмарним обчисленням, а також потужним локальним процесорам, графічним процесорам та спеціалізованому обладнанню для прискорення ШІ.

Досягнення технологій зв'язку малого радіусу дії та алгоритмів штучного інтелекту дозволили групам дронів, транспортних засобів та роботів локально взаємодіяти один з одним та з навколишнім середовищем. Подібні групи пристроїв можуть досягати своїх цілей, використовуючи децентралізоване та самоорганізоване керування (інтелект рою та групову робототехніку). При вдосконаленні технологій ближнього зв'язку 6G та алгоритмів штучного інтелекту / машинного навчання зростатиме інтелектуальна складова пристроїв, а якість обслуговування та продуктивність поліпшуватимуться за рахунок більшої автоматизації всіх аспектів нашого життя.

У майбутньому підтримка бездротового зв'язку стане фундаментальною функцією будь-якого пристрою, оскільки вона буде необхідна для кожної людини, будинку, організації та галузі. Мережа 6G може досягати пропускну здатності в діапазоні Тбіт/с, забезпечуючи при цьому затримку передачі менше 1 мс. Це підтримує плавний обмін мультисенсорною інформацією VR, включаючи відео з високою реалістичністю, аудіо та навіть тактильні відчуття.

Крім зв'язку, нові можливості сканування будуть підтримуватись об'єднаними технологіями зв'язку та сканування. Завдяки цьому мобільні пристрої майбутнього зможуть підтримувати багато нових функцій, зокрема радіозв'язок у ТГц-діапазоні може використовуватися для візуалізації та спектроскопії, надаючи нам персональні «рентгенівські знімки» на молекулярному рівні. Крім того, моніторинг стану здоров'я (серцебиття, падіння тощо), порушення кордонів переміщення та розпізнавання жестів за допомогою безконтактної взаємодії з пристроями також можуть бути реалізовані за допомогою бездротового сканування та машинного навчання.

В результаті розвитку технології хмарних обчислень та ІоЕ та завдяки можливості підключення 6G збільшується кількість фізичних пристроїв 6G із можливістю отримання віртуального двійника у хмарі (рис. 2). Завдяки децентралізації персональні дані користувачів можуть зберігатися на віртуальних пристроях під контролем користувачів, а не на мобільних пристроях або в централізованих сховищах, що належать третій стороні, що позбавляє користувачів від побоювань з приводу потенційних проблем з конфіденційністю. На основі концепції віртуалізованих пристроїв з'являться загальні пристрої 6G, які зазвичай знаходяться у громадських місцях та використовуються по запиті. Завдяки інтеграції біометрії, штучного інтелекту, персоналізованого автоматичного налаштування та технологій захисту конфіденційності пристрої 6G зможуть надавати прості у використанні функції, такі як біометрична автентифікація та гіперперсоналізовані конфігурації. Це дозволить кінцевим користувачам отримувати доступ до бажаних послуг через спільні пристрої у будь-який час та в будь-якому місці. Перелік типів загальних пристроїв 6G може бути досить великим, включаючи автомобілі, що орендуються, конференц-зали, хмарні пристрої та будь-які інші пристрої з можливостями вводу/виводу та обчислювальними можливостями, які можна використовувати спільно або орендувати в громадських місцях.



Рисунок 2 – Схема реалізації віртуального пристрою

Крім того, деякі пристрої 6G підтримуватимуть хмарні обчислення. При цьому, користувачі зможуть отримати пристрої 6G з підтримкою приватних хмарних обчислень, що задовольнить більш високі вимоги до обчислювальних сховищ для більш інтелектуальної голосової підтримки, зберігання особистих зображень та відео.

У найближчій перспективі платформи на основі кремнію за рахунок гетерогенної інтеграції напівпровідників типу III–V, фотонних/плазмонних та інших передових матеріалів продовжуватимуть сприяти підвищенню продуктивності інтегральних схем та розширенню їх функціональності. Нові обчислювальні архітектури, такі як спеціалізовані обчислювальні системи, обладнання та оптимізовані алгоритми, допоможуть підвищити продуктивність обчислень за рахунок модернізації програмного забезпечення. У довгостроковій перспективі лише дві обчислювальні технології зумовлять фундаментальний стрибок в продуктивності математичних розрахунків. Одна з них – це технології нейроморфних обчислень та глибокого навчання, які дозволять підвищити ефективність оброблення інформації. Інша – квантові обчислення, що використовують переваги поліноміальної суперпозиційної природи кубітів для зменшення обчислювального навантаження.

Нейроморфні обчислення імітують обробку інформації на біологічному рівні та функціонують на компактній та енергоефективній платформі. Ця технологія є перспективним претендентом для досягнення рівня справжнього машинного інтелекту, і вона продовжуватиме розвиватися із вдосконаленням технології штучного інтелекту.

При розробці нового програмного забезпечення ключовим питанням є перепроєктування існуючих алгоритмів та програмних середовищ для практичної реалізації переваг, що пропонується спеціалізованим обладнанням. Крім оптимізації алгоритмів ще однією проблемою є витрати, пов'язані з переміщенням даних. При цьому, загальну складність обчислень не слід розраховувати лише на основі кількості операцій із плаваючою комою; швидше, слід також враховувати складність примусового переміщення даних, яких потребує алгоритм. Отже, у новому програмному забезпеченні бажано використовувати оптимізовану топологію доступу до пам'яті/даних, наприклад, неоднорідний доступ до пам'яті [7].

Для телекомунікаційного обладнання необхідна повна переробка апаратного забезпечення для вирішення проблеми вузьких місць у пам'яті, оскільки вони обмежують енергоефективність. Перспективним варіантом вирішення цієї проблеми є кремнієва фотоніка з використанням хвилеводів з низькими втратами для зменшення витрат енергії на переміщення даних.

### **Ефективне каналне кодування радіосигналів в мережах 6G**

Канальне кодування сигналів використовується для усунення впливу несприятливих та динамічно змінних факторів впливу середовищ каналів для забезпечення надійного зв'язку та високої якості обслуговування. Оскільки технологія 6G охоплюватиме безліч різноманітних варіантів використання, деякі з яких мають екстремальні вимоги, такі як надвисока швидкість передачі даних, наднизькі затримка та енергоспоживання, необхідні інновації в кодуванні каналів 6G, що здатні забезпечити побудову оптимального коду для заданого стану каналу та сценарію використання.

Канальне кодування може застосовуватися до P2P-комунікацій по каналах AWGN, а також до зв'язку мультиточка-точка (MP2P), точка-мультиточка (P2MP) і мультиточка-мультиточка (MP2MP) по не-AWGN або нестационарних каналах. У мережі 6G з великою кількістю комунікацій машина-машина та людина-машина для підвищення загальної ефективності використання спектра в сценаріях зв'язку MP2P, P2MP та MP2MP бажано застосовувати мережне кодування. Основна ідея мережного кодування - об'єднати кілька пакетів в один для кращого кодування. Інший важливий аспект використання мережного кодування – це придушення завад у цифровій чи аналоговій області. Виграш від використання мережного кодування можуть отримати всі пристрої мережі. Мережеве кодування зазвичай виконується на прикладному рівні, але також може виконуватися і на фізичному рівні в системі 6G через вимоги до затримки та пропускну здатності [8].

Канальне кодування характеризується високим коефіцієнтом кодування, що розширює покриття мережі та покращує якість обслуговування, особливо на межах стільника. Крім того, високорозпаралельний декодер збільшує пікові швидкості передачі даних; а проста, зручна для апаратної реалізації схема суттєво знижує енергоспоживання, тим самим збільшуючи термін служби батареї. Ці переваги сформуvalи ключову ефективність бездротових пристроїв попередніх поколінь. Стандарти 5G NR передбачають використання полярних кодів та кодів LDPC для каналів керування та каналів даних відповідно.

Для сценаріїв використання технології 6G будуть потрібні характеристики, що перевершують можливості 5G: підвищені швидкості передачі даних, підвищена надійність, зменшені складність та енергоспоживання.

Канальне кодування в системах 6G передбачає підвищення пікової швидкості передачі даних до значень Тбіт/с (сьогоднішня швидкість декодування даних eMBB становить 10–20 Гбіт/с), усунення помилок декодування блоку для URLLC та наближення показників декодування коротких блоків для mMTC до межі продуктивності кінцевої довжини [7]. На рис. 3 показані ключові показники ефективнос-

ті, що досягаються за рахунок використання полярних кодів для каналів керування в системах 5G NR та кодами LDPC для каналів даних в системах 5G NR та рознесеного каналного кодування в системах 6G.

Оскільки схеми каналного кодування, що налаштовуються для конкретних випадків використання характеризуються підвищеною складністю реалізації, тому існує сильна мотивація щодо розроблення сімейства кодів, які повторно використовують обладнання і підходять до різних сценаріїв і специфікацій, або використання структури, яка ефективно адаптує кілька кодів до різних випадків застосування.

Така уніфікована та гнучка структура, що поєднує коди компонентів або базові коди має бути адаптивною, щоб відповідати вимогам різних сценаріїв використання технології 6G: єдина та гнучка структура на основі полярних кодів; адаптація кількох кодів.

При розробці схеми кодування для каналів передавання зі швидкістю порядку 1 Тбіт/с слід віддавати пріоритет низькій складності та високому рівню паралелізму декодування, приділяючи особливу увагу апаратній реалізації [9]. Наприклад, коди, що реалізовані на основі більш простих схем маршрутизації, вимагатимуть меншої площі кристала і демонструватимуть більш високий рівень регулярності як при кодуванні, так і при декодуванні. В якості альтернативи деякі існуючі коди можуть бути оптимізовані для більш високого паралелізму, більш високої регулярності та нижчої складності або на стороні декодування [3] або як при кодуванні, так і при декодуванні [6].

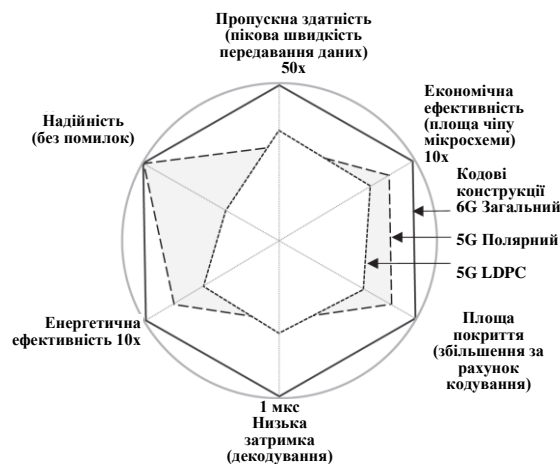


Рисунок 3 – Ключові показники ефективності використання каналів в телекомунікаційних системах передавання

Паралелізований полярний код (сімейство GN-суміжно-групових кодів) включає полярні коди та коди Ріда-Маллера і може підтримувати високопродуктивне декодування з паралелізмом та регулярністю. GN-суміжні коди можуть бути лінійними блочними кодами з такою ж утворюючою матрицею, що і полярні коди, але з різними наборами інформації. Алгоритм паралельного декодування може бути використаний на факторному графі кодів GN-коду [3]. Цей алгоритм демонструє високий паралелізм та високу регулярність. Для уникнення послідовного декодування зовнішніх кодів, алгоритм або будує еквівалентний граф декодування, змінюючи місцями зовнішній та внутрішній коди у попередньому графі факторів, як показано на рис. 4 або декодує внутрішні коди на обох графах декодування.

На додаток до звичайних широкосмугових телекомунікаційних пристроїв технологія 6G передбачає безліч критично важливих застосувань, що вимагають гарантовано високих функціональних параметрів. Існуючі схеми кодування далеко не завжди здатні надати такі гарантії навіть теоретично, тому в деяких випадках необхідно розробляти коди для конкретних застосунків.

- Надзвичайно висока надійність телекомунікаційних пристроїв, від  $10^{-7}$  до  $10^{-10}$  без нижньої межі припустимих помилок із заданою швидкістю. Хоча при використанні LDPC та інших кодів, які ітеративно декодуються, можна знизити мінімальний рівень помилок нижче  $10^{-10}$ . Теоретично було доведено, що полярні коди та пов'язані конструкції кодів не мають мінімального рівня помилок і тому підходять для більшості застосувань. Для подальшого підвищення надійності телекомунікаційних пристроїв можуть використовуватися додаткові функції, такі як недвійкові або згорткові кодові конструкції.

- Надзвичайно низька затримка, від 1 до 0,1 мс, для підтримки задач автономного водіння та промислової автоматизації. Ці програми зазвичай вимагають високої надійності поряд з надзвичайно низькою затримкою кодування та декодування. При цьому, можуть стати в нагоді алгебраїчні коди, але водночас існуючі схеми вимагають декодування на основі порядкової статистики, що занадто складно для застосування з обмеженою затримкою. Для підтримки такого варіанта використання необхідно використовувати нові кодові конструкції та схеми декодування. Визначено, що затримка декодування для коротких поля-

рних кодів дуже мала [2] і може бути додатково знижена за допомогою сегментованого декодування [3] або паралельного декодування [4].

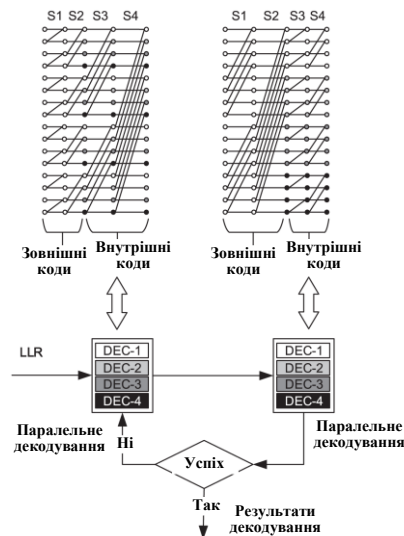


Рисунок 4 – Схема кодування для систем передавання даних із швидкістю Тбіт/с

- Надзвичайно низька потужність і собівартість для безбатарейних та енергозберігаючих телекомунікаційних засобів з терміном служби від 10 років до нескінченності. Інтелектуальні пристрої будуть модулювати та відображати прийняті радіочастотні сигнали або збирати та накопичувати радіочастотну енергію навколишнього середовища для сеансів радіочастотних передач. У таких пристроях зазвичай використовується недороге обладнання, що потребує надзвичайно низького споживання енергії. Це можна досягти з допомогою спільної конструкції вузла кодової модуляції, у якому каналне кодування здійснюється разом із коригуванням форми сигналу і формуванням опорних сигналів [5].

- Надзвичайно висока щільність підключення до 100 млн пристроїв на км<sup>2</sup>. У щільно розгорнутих системах IoT слід очікувати на виникнення численних колізій. При цьому, коди повинні містити інформацію про ідентифікацію обладнання і про дані, що передаються. Тому, необхідно використовувати схему кодування спільної послідовності з надзвичайно великим простором послідовності/коду, що підтримує некогерентне детектування/декодування.

### Висновки

Зростання попиту на підвищені швидкості передачі і меншу затримку означає, що збільшення носійної частоти і ширини смуги пропускання стають дедалі важливішими під час розробки систем зв'язку. Дослідження архітектури систем терагерцового зв'язку базується на двох різних підходах побудови апаратного забезпечення: електронний, де радіочастоти множаться до ТГц; та фотонний, де оптичні частоти діляться до ТГц. Слід зазначити той факт, що більшість таких систем та мереж розробляються в основному для зв'язку на малих відстанях усередині приміщень, частково через високе атмосферне згасання в ТГц-діапазоні. Однак цього можна певною мірою уникнути, вибравши «вікно частот», в якому втрати в атмосфері низькі, наприклад 140, 220 і 300 ГГц.

З точки зору апаратного забезпечення гетерогенна платформа на матеріалах типу III-V може ще більше підвищити продуктивність кремнієвої системи за рахунок оптимізації кожного компонента на одному кристалі. Для досягнення більш високих характеристик в кремнієвий чіп можуть бути додані нові матеріали, такі як фотонні кристали, фотоелектричні елементи і плазмові поверхні. Нові конструкції антени на кристалі та в корпусі, поряд із технологією компактних лінз, такий як RIS зможуть забезпечити більш точну реалізацію бажаних характеристик антени, а також зменшити розмір системи. ТГц-технологія дозволить використовувати нові методи зв'язку та візуалізації, але реалізація терагерцових систем, заснованих на електроніці, оптоелектроніці та фотоніці, залежатиме від сценарію використання та робочих частот.

### Список літератури

- [1] H. Wang, S. K. Gupta, B. Xie, and M. Lu, “Topological photonic crystals: a review”, *Frontiers of Optoelectronics*, 2020, pp. 1–23.
- [2] H. Hamada, T. Tsutsumi, H. Matsuzaki, T. Fujimura, I. Abdo, A. Shirane, K. Okada, G. Itami, H.-J. Song, H. Sugiyama et al., “300-GHz-band 120-Gb/s wireless front-end based on InP-HEMT PAs and mixers”, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 9, 2020, pp. 2316–2335.



- [3] I. Dan, P. Szriftgiser, E. Peytavit, J.-F. Lampin, M. Zegaoui, M. Zaknounge, G. Ducournau, and I. Kallfass, "A 300-GHz wireless link employing a photonic transmitter and an active electronic receiver with a transmission bandwidth of 54 GHz", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, no. 3, 2020, pp. 271–281.
- [4] H. Xie, Z. Qin, G. Y. Li, and B.-H. Juang, "Deep learning enabled semantic communication systems", arXiv preprint arXiv:2006.10685, 2020.
- [5] J. Tong, H. Zhang, X. Wang, S. Dai, R. Li, and J. Wang, "A soft cancellation decoder for parity-check polar codes", arXiv preprint arXiv:2003.08640, 2020.
- [6] H. Zhu, B. Smida, and D. J. Love, "Optimization of two-way network coded HARQ with overhead", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 6, 2020, pp. 3602–3613.
- [7] Dmytro V. Mykhalevskiy & Oksana S. Horodetska, "Investigation Of Wireless Channels According To The Standard 802.11 In The Frequency Range Of 5 Ghz For Two Subscribers", *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERC)*, Zibeline International Publishing, vol. 42(2), March., pages 50-57. 2019.
- [8] Д. В. Михалевський, О. С. Городецька, "Розробка моделі оцінювання впливу архітектурних перешкод на основні параметри безпроводного каналу стандарту 802.11", *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*, том 31 (70) ч.1, №3, с. 48-53. 2020.

Стаття надійшла: 02.12.2023.

#### References

- [1] H. Wang, S. K. Gupta, B. Xie, and M. Lu, "Topological photonic crystals: a review", *Frontiers of Optoelectronics*, 2020, pp. 1–23.
- [2] H. Hamada, T. Tsutsumi, H. Matsuzaki, T. Fujimura, I. Abdo, A. Shirane, K. Okada, G. Itami, H.-J. Song, H. Sugiyama et al., "300-GHz-band 120-Gb/s wireless front-end based on InP-HEMT PAs and mixers", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 9, 2020, pp. 2316–2335.
- [3] I. Dan, P. Szriftgiser, E. Peytavit, J.-F. Lampin, M. Zegaoui, M. Zaknounge, G. Ducournau, and I. Kallfass, "A 300-GHz wireless link employing a photonic transmitter and an active electronic receiver with a transmission bandwidth of 54 GHz", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, no. 3, 2020, pp. 271–281.
- [4] H. Xie, Z. Qin, G. Y. Li, and B.-H. Juang, "Deep learning enabled semantic communication systems", arXiv preprint arXiv:2006.10685, 2020.
- [5] J. Tong, H. Zhang, X. Wang, S. Dai, R. Li, and J. Wang, "A soft cancellation decoder for parity-check polar codes", arXiv preprint arXiv:2003.08640, 2020.
- [6] H. Zhu, B. Smida, and D. J. Love, "Optimization of two-way network coded HARQ with overhead", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 6, 2020, pp. 3602–3613.
- [7] Dmytro V. Mykhalevskiy & Oksana S. Horodetska, "Investigation Of Wireless Channels According To The Standard 802.11 In The Frequency Range Of 5 Ghz For Two Subscribers", *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERC)*, Zibeline International Publishing, vol. 42(2), March., pages 50-57. 2019.
- [8] D. V. Mikhalevskiy, O. S. Horodetska, "Development of a model for assessing the influence of architectural obstacles on the main parameters of the wireless channel of the 802.11 standard", *Scholarly notes of V. I. Vernadskyi. Series: technical sciences*, volume 31 (70) part 1, number 3, pp. 48-53. 2020 [in Ukrainian].

#### Відомості про авторів

**Васильківський Микола Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій.

**Городецька Оксана Степанівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки.

**Климчук Богдан Сергійович** – студент групи ТКС-21м, кафедра інфокомунікаційних систем і технологій.

**Говорун Володимир Валерійович** – студент групи ТКС-21м, кафедра інфокомунікаційних систем і технологій.

M. V. Vasylykivskiy, O. S. Horodetska, B. S. Klymchuk, V. V. Hovorun

## STRATEGIES OF TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF HARDWARE OF INFOCOMMUNICATION RADIO NETWORKS

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia