

УДК 621.396.662.072.078

В. Б. ТОЛУБКО, доктор техн. наук, професор;
Л. Н. БЕРКМАН, доктор техн. наук, професор;
С. В. КОЗЕЛКОВ, доктор техн. наук, професор;
Є. П. ГОРОХОВСЬКИЙ, здобувач,
Державний університет телекомунікацій, Київ

Побудова ультращільних мобільних мереж п'ятого покоління 5G на базі багатовимірних сигналів

Запропоновано принципово нові сигнально-кодові конструкції, використання яких при побудові мереж 5G забезпечуватиме недосягну досі якість мобільного зв'язку.

Ключові слова: багатовимірні сигнали; адитивна сигнальна відстань; відстань Хеммінга; дискретний канал; декодування; ієрархічна конструкція.

Вступ

Мережі мобільного зв'язку з моменту їх появи й досі зазнають удосконалень. Відповідні технології не припиняють свого розвитку в напрямку дедалі вищої продуктивності та все ширшого спектра послуг. Адаже стрімко зростаючі запити користувачів змушують розв'язувати завдання, які виходять за межі можливостей мереж 3G/4G. Саме тому прозора інтеграція існуючих і нових технологій радіодоступу — єдиний шлях до мети, відомої як ультращільні мережі 5G.

Основна частина

Головні вимоги, що їх висувають користувачі до мереж мобільного широкосмугового доступу (МШСД), стосуються передусім продуктивності. Сучасні мережі розвиваються так, аби незабаром доступ до даних здійснювався миттєво, а надання послуг відбувалося без затримок і не переривалося через ненадійність зв'язку. Значення МШСД для суспільства і бізнесу неухильно зростає, і сьогодні надійний мобільний зв'язок стає незамінним інструментом у роботі екстрених служб.

Кількість підімкнених до мережі пристроїв зростає лавиноподібно, і зрештою буде підімкнено все, що може виграти від єдності з мережею: світлофори, побутова техніка, автомобілі, медичне устаткування, системи електропостачання...

Ефективні та високопродуктивні вирішення, необхідні для такого роду підімкнень, можуть бути реалізовані за допомогою надщільних мереж стандарту 5G.

Проте на шляху втілення цієї ідеї постають труднощі, які лише посилюватимуться. Адаже протягом останніх років мобільний трафік демонструє стійке зростання, і ця тенденція збережеться і в майбутньому. На підставі різних прогнозів доходимо висновку, що після 2020 року ємність систем має бути така, аби забезпечувати обробку трафіку, обсяг якого перевищуватиме нинішній більш ніж у 1000 разів.

У мережах по всьому світу працюють понад 5 млрд мобільних пристроїв. Це переважно мобільні термінали чи пристрої, що забезпечують МШСД. Незабаром кількість підімкнень, задіяних у «розумних» містах, «розумних» будинках та інтелектуальних енергомережах, перевищить кількість призначених для користувача пристроїв у десятки, а то й сотні разів. Забезпечити безперебійну роботу такої маси (це буде, можливо, і 500 млрд) пристроїв — завдання надскладне, бо зі збільшенням кількості під'єднаних пристроїв посилюватимуться і вимоги до мережі. Для втілення ідеї про необмежений доступ до інформації користувачам мають бути доступні швидкості передавання даних, вимірювані в сотнях мегабіт за секунду. Коли ж ідеться про забезпечення гігабітних швидкостей, потрібних для роботи додатків віртуальної чи доповненої реальності, доведеться й надалі скорочувати час відгуку, намагаючись звести його до кількох мілісекунд.

Для створення ультращільних мереж необхідно на базі багатовимірних сигналів забезпечити реалізацію принципово нових сигнально-кодових конструкцій.

Для каналів із адитивною сигнальною відстанню запропоновано конструкції багатовимірних сигналів, описувані деякою сукупністю кодів. Такі конструкції застосовні, зокрема, у разі неперервного каналу з білим шумом, для якого побудовано низку конкретних систем сигналів.

Використання багатовимірних (із великою базою, складених, складних) сигналів дозволяє істотно підвищити якість передавання повідомлень по каналах зв'язку. Як основні характеристики системи сигналів, тобто множини сигналів і її взаємно-однозначного відображення на словник джерела повідомлень (можливо, перетворений), розглядають *розмірність* (із нею пов'язані затримка доставляння

© В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Козелков, Є. П. Гороховський, 2017

повідомлення, займана смуга частот і т. ін.), **потужність множини сигналів** (або швидкість передавання — відношення логарифма потужності до розмірності) і **відстань між найближчими сигналами**. Для багатьох важливих типів каналів граничні характеристики, такі як потужність при заданих розмірності та мінімальній відстані, уже вивчено достатньо докладно.

Що ж до конструктивної теорії сигналів, то вона набула розвитку для дискретного, особливо двійкового, каналу в рамках теорії кодування. У теорії кодування дискретний канал, утворений модулятором *елементарних сигналів*, неперервним каналом і демодулятором елементарних сигналів, вважається заданим. При цьому наблизитися до потенційних характеристик неперервного каналу не вдається як унаслідок звуження класу сигналів, так і з огляду на недостатнє використання під час декодування відомостей про спотворення сигналу в неперервному каналі. Останній недолік долається об'єднанням демодуляції та декодування в єдину процедуру прийому в цілому, названого *м'яким (аналоговим) декодуванням*, або *вирішуванням*, і прийомом у напівнеперервному каналі.

Для подолання згаданого раніше першого недоліку модуляція, тобто перетворення слова повідомлення в сигнал на вході неперервного каналу, має розглядатися як єдина процедура, що об'єднує кодування і модуляцію елементарних сигналів. Кількість відомих конструкцій сигналів, що реалізують такий підхід, невелика. Дискретний код, у свою чергу, також пов'язаний із деякою конструкцією багатовимірних сигналів.

Позначимо M -ковий код довжини N із \mathcal{M} словами і мінімальною хеммінговою відстанню d через $(N, \mathcal{M}, d)_M$, або, при $\mathcal{M} = M^K$, через $[N, K, d]_M = (N, M^K, d)_M$. Оператор f модуляції елементарних сигналів зіставляє символу $q_n \in \{0, \dots, M-1\}$ слова $q = (q_1, \dots, q_N) \in (N, \mathcal{M}, d)_M$ елементарний сигнал $x_n = f(q_n)$ із множини X елементарних сигналів потужності $|X| = M$, що міститься в повній множині можливих на вході неперервного каналу елементарних сигналів, а оператор ϕ кодування ставить у відповідність слову u словника джерела \mathcal{U} слово q коду. Пара відображень f і ϕ задає відображення словника \mathcal{U} на множини сигналів $\mathcal{A} \subseteq X$, визначаючи конструкцію системи сигналів, яку далі називатимемо **кодовою конструкцією**. Тут X — **конструктивна множина сигналів**, подана у вигляді декартового степеня

$$X = X^N = \{\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N) : x_n \in X\}.$$

Нехай для кожної пари сигналів $\mathbf{x}', \mathbf{x}'' \in X$ визначено міру розрізнення $D(\mathbf{x}', \mathbf{x}'')$, яку далі називатимемо **сигнальною відстанню**, або просто **відстанню**, якщо це не призведе до непорозуміння. Сигнальна відстань не обов'язково метрика, але в деяких випадках, що становлять значний інтерес, є монотонною функцією метрики. Для багатьох (але не всіх) типів каналів сигнальна відстань адитивна, тобто її можна подати у вигляді

$$D(\mathbf{x}', \mathbf{x}'') = \sum_{n=1}^N D_0(x'_n, x''_n). \quad (1)$$

Прикладом може бути квадрат евклідової відстані (не метрика) або добре відомі відстані Хеммінга і Лі (метрики). При використанні кодової конструкції зв'язок між мінімальними сигнальною відстанню на множині сигналів \mathcal{A} і відстанню d Хеммінга подається згідно з (1) очевидним співвідношенням

$$D = \min_{\mathbf{x}', \mathbf{x}'' \in \mathcal{A}, \mathbf{x}' \neq \mathbf{x}''} D(\mathbf{x}', \mathbf{x}'') \geq \delta d, \quad (2)$$

де $\delta = \min D_0(x'_n, x''_n)$, $x'_n, x''_n \in X$, $x'_n \neq x''_n$.

У більшості відомих кодових конструкцій множина X — одновимірна дійсна (якщо канал низько-частотний) або одновимірна комплексна, тобто двовимірна дійсна (при амплітудній і фазовій модуляції елементарних сигналів у смугових каналах). Принципово кодова конструкція придатна при будь-якій розмірності у множині X елементарних сигналів. Але вдала вона тільки тоді, коли всі ненульові відстані в X однакові, наприклад коли X — правильний симплекс, що складається, зокрема, з двох сигналів, або набір ортогональних сигналів із однаковими нормами. Тоді сигнальна відстань між двома сигналами з \mathcal{A} пропорційна до відстані Хеммінга між словами коду — образами цих сигналів, і в разі вдалого коду кодова конструкція також вдала. Проте за великої потужності M множини X (збільшення її необхідне для отримання високої швидкості) відстані на X істотно різні.

Кодова конструкція, яка «підміняє» всі ненульові відстані $D_0(x'_n, x''_n)$ найменшою з них (а це можна тлумачити як двійкове квантування відстаней) не враховує цих відмінностей, але має дві важливі переваги — порівняну *простоту* та *універсальність*. Під **універсальністю** розуміємо принципову можливість отримання систем сигналів довільної розмірності і з довільними сигнальними відстанями. **Простота** забезпечується регулярністю (наприклад, алгебраїчними властивостями) кодів, які об'єднують однотипні елементарні сигнали в багатовимірні. Пропоновані далі конструкції тією чи іншою мірою зберігають ці властивості, дозволяючи отримувати потужніші системи сигналів за рахунок більш тонкого врахування розподілу відстаней на X .

Із-поміж конструкцій, що ґрунтуються на розбитті множини елементарних сигналів на неперетинні підмножини, у кожній із яких при вдалому розбитті сигнальна відстань між найближчими сигналами більша, ніж у всій множині X , найзручніша **ієрархічна конструкція (ІК)**, в якій ідеї узагальненого каскадного коду придатні для системи сигналів із довільною адитивною сигнальною відстанню. Під **ієрархією** розуміється сукупність L розбиттів множини X на класи, таких що всі класи одного рівня (одного розбиття) рівнопотужні і можуть включати в себе класи попереднього рівня тільки цілком, тобто класи попереднього рівня «вкладено» в класи наступного рівня подібно до системи внутрішніх вкладених кодів узагальненого каскадного коду. Множина класів $(l - 1)$ -го рівня, включених у клас l -го рівня, відображається взаємно-однозначно на множину символів M_l -кового коду $(N, M_l, d_l)_{M_l}$ l -го рівня (аналог зовнішнього коду узагальненого каскадного коду), де $M_1 M_2 \dots M_L = M$. Оскільки сигнальні відстані між елементарними сигналами класу l -го рівня зростають зі зменшенням l , то перехід від кодової конструкції з одним M -ковим кодом до багатоководової ІК дає змогу підвищити потужність множини сигналів без зниження мінімальної сигнальної відстані, подібно до того як перехід від каскадного коду до узагальненого каскадного коду дозволяє підвищити потужність коду без зниження мінімальної хеммінгової відстані.

Сукупність L згорткових кодів дозволяє на базі тієї самої ієрархії отримати згортковий аналог ІК сигналів для неперервного або дискретного каналу з адитивною сигнальною відстанню. У більшості прикладів множина елементарних сигналів належить сфері з радіусом (нормою) p у v -вимірному просторі. Конструкції сигналів з адитивною сигнальною відстанню придатні в разі розбиття множини елементарних сигналів на нерівнопотужні підмножини. Ці конструкції потенційно потужніші за ІК. Найбільш привабливі з них — **конструкції з переставленнями елементарних сигналів**.

Нехай на множині X елементарних сигналів потужності $M = M_1 M_2 \dots M_L$ визначено ієрархію — сукупність L розбиттів на неперетинні класи, таких що кожний клас l -го рівня ієрархії (l -го розбиття) включає в себе M_l класів $(l - 1)$ -го рівня, тобто складається з $\mu_l = M_1 M_2 \dots M_l$ сигналів.

Нумерація класів $(l - 1)$ -го рівня, що входять у клас l -го рівня, задає взаємно-однозначне відображення множини класів $(l - 1)$ -го рівня на множину цифр $\{0, \dots, M_l - 1\}$. Тому набір (q_{1n}, \dots, q_{ln}) , де $q_{ln} \in \{0, \dots, M_l - 1\}$, $1 \leq l \leq L$, визначає єдине значення n -го елементарного сигналу $x_n = f(q_{1n}, \dots, q_{Ln})$, де f — правило (оператор) модуляції елементарних сигналів.

Порівняємо l -й рівень та мінімальну l -ту сигнальну відстань у класі:

$$\delta_l = \max_{q_{l+1,n}, \dots, q_{Ln} (q'_{1n}, \dots, q'_{ln}) \neq (q''_{1n}, \dots, q''_{ln})} \min D_0(x'_n, x''_n), \quad (3)$$

де $x'_n = f(q'_{1n}, \dots, q'_{ln}, q_{l+1,n}, \dots, q_{Ln})$, $x''_n = f(q''_{1n}, \dots, q''_{ln}, q_{l+1,n}, \dots, q_{Ln})$.

Клас L -го рівня збігається з X , тому $\delta_L = \delta$. В ієрархію можна включити також нульовий рівень із M класами, по одному сигналу в кожному, і з $\delta_0 = \infty$. Оскільки клас наступного рівня може включати в себе клас попереднього рівня тільки цілком, то $\delta_{l-1} \geq \delta_l$; при $\delta_{l-1} = \delta_l$ можна об'єднати два рівні, опустивши $(l - 1)$ -ше розбиття, так що можна вважати, що

$$\delta_1 > \delta_2 > \dots > \delta_L = \delta.$$

Нехай $q_l = q_{l1}, \dots, q_{lN}$ — слово коду $(N, M_l, d_l)_{M_l}$ l -го рівня. При цьому словник \mathcal{U} джерела подається декартовим добутком $\mathcal{U}_1 \times \dots \times \mathcal{U}_l = \mathcal{U}$ підсловника \mathcal{U}_l $|\mathcal{U}_l| = \mathcal{M}_l$ і φ_l — взаємно-однозначне відображення \mathcal{U}_l на код l -го рівня.

Під **ієрархічною конструкцією** будемо розуміти сукупність, яка містить такі компоненти: ієрархію на множині елементарних сигналів X ; відображення f множини наборів (q_{1n}, \dots, q_{Ln}) на множину X ; L кодів рівнів і L відображень φ_l .

Схема відповідної послідовності перетворень (модуляції) має такий вигляд:

$$u \rightarrow (u_1, \dots, u_L) \xrightarrow{\varphi_l} q_l = (q_{l1}, \dots, q_{lN}) \xrightarrow{f} x_n.$$

Тут ліва стрілка означає розбиття слова $u \in \mathcal{U}$ на підслова $u_l \in \mathcal{U}_l$ (слово u може являти собою блок у послідовності символів джерела інформації; якщо потужність множини блоків менша за $\mathcal{M} = |\mathcal{U}|$, то деякі слова словника і сигнали не використовуються). Далі кожне підслово u_l ($1 \leq l \leq L$) кодується у слово $q_l = \varphi_l(u_l)$ коду $(N, \mathcal{M}_l, d_l)_{M_l}$. Результатом є L кодових слів однакової довжини N . Модулятор елементарних сигналів перетворює набір (q_{1n}, \dots, q_{Ln}) з n -х символів усіх слів в n -й елементарний сигнал, що надходить на вхід каналу.

Твердження. Ієрархічна конструкція задає систему сигналів потужності $\mathcal{M} = \mathcal{M}_1 \dots \mathcal{M}_l$ на множині сигналів \mathcal{A} із мінімальною сигнальною відстанню

$$D \geq \min_{1 \leq l \leq L} (\delta_l, d_l). \quad (4)$$

Твердження щодо кількості сигналів очевидне. Зрозуміло також, що ІК задає систему сигналів, тобто взаємно-однозначне відображення словника \mathcal{U} на множину \mathcal{A} сигналів.

Для доведення нерівності (4) розглянемо відстань між двома сигналами $\mathbf{x}' = (x'_1, \dots, x'_N)$ і $\mathbf{x}'' = (x''_1, \dots, x''_N)$, де $x'_n = f(q'_{1n}, \dots, q'_{Ln})$, $x''_n = f(q''_{1n}, \dots, q''_{Ln})$.

При $\mathbf{x}' \neq \mathbf{x}''$ знайдуться хоча б одне l і одне n , такі що $q'_{ln} \neq q''_{ln}$, і тоді, знайдеться $\lambda = \max \{l: q'_{ln} \neq q''_{ln}, 1 \leq l \leq L, 1 \leq n \leq N\}$. Тоді δ_λ — найменша з ненульових відстаней між елементарними сигналами, що входять у \mathbf{x}' і \mathbf{x}'' , причому будь-яка з таких відстаней $D_0(x'_n, x''_n) \geq \delta_\lambda \delta(q'_{\lambda n}, q''_{\lambda n})$, де $\delta(q'_{\lambda n}, q''_{\lambda n})$ — символ Кронекера (0 або 1).

Звідси випливає

$$D(\mathbf{x}', \mathbf{x}'') \geq \delta_\lambda \sum_{n=1}^N \delta(q'_{\lambda n}, q''_{\lambda n}) \geq \delta_\lambda d_\lambda, \quad (5)$$

бо сигналам з \mathcal{A} при $q'_{\lambda n} \neq q''_{\lambda n}$ відповідають різні слова коду λ -го рівня. А оскільки таке λ знайдеться для будь-якої пари неоднакових сигналів з \mathcal{A} , то з (5) випливає (4).

При заданій мінімальній сигнальній відстані D мінімальні хеммінгові відстані кодів доцільно вибирати такі:

$$d_l = \lceil D / \delta_l \rceil, \quad (6)$$

де $\lceil y \rceil$ — найменше ціле число, що не менше за y . Оскільки $\delta_\lambda > \delta = \delta_L$ при $l < L$, то необхідна для кодів усіх рівнів, окрім останнього, хеммінгова відстань d_l може бути, особливо для перших рівнів, істотно менша від $d = dL$, що й дозволяє збільшити потужність множини сигналів при ІК порівняно з кодовою конструкцією.

Зауваження 1. Ієрархію задають будь-які L відношень еквівалентності на X , якщо кожне розбиває X на рівнопотужні класи і клас наступного відношення еквівалентності включає в себе або всі, або жодного елемента класу попереднього відношення.

Так, якщо X взаємно-однозначно відображається на групу G і $G_1 \subset G_2 \subset \dots \subset G_L = G$ — її підгрупи порядку μ_1, \dots, μ_L , де $\mu_l = M_1 \dots M_L$, то суміжний клас групи G за підгрупою G_l відображається на клас l -го рівня ієрархії. До ІК такого типу з хеммінговою відстанню як сигнальною належать узагальнені каскадні коди. Якщо X задано (як область значень) функцією $x_n = \psi(p_{1n}, \dots, p_{\Lambda n} \dots)$ цілочислових аргументів $p_{\lambda n} \in \{0, \dots, m_\lambda - 1\}$, то відношення еквівалентності можна визначити, зафіксувавши деякі аргументи.

Нехай $(\lambda_1, \dots, \lambda_\Lambda)$ — переставлення індексів і $q_{ln} = p_{\lambda ln}$, $M_l = m_{\lambda l}$. Кожному такому впорядкуванню індексів відповідає Λ -рівнева ієрархія з мінімальними відстанями δ_l , заданими (3).

Замість переставлення можна скористатися іншою довільною взаємно-однозначною відповідністю наборів $(p_{1n}, \dots, p_{\Lambda n})$ і $(p_{1n}, \dots, p_{\Lambda n})$ L функціями, які задаються $q_{ln} = \theta_l(p_{1n}, \dots, p_{\Lambda n})$.

Загальний метод такого перекодування змінних, який приводить до вдалої ієрархії, нам невідомий.

Зауваження 2. Системі сигналів, яку задано ієрархічною конструкцією, можна поставити у відповідність і інші ІК, оскільки будь-яке з $L!$ переставлень рівнів визначає деяку ІК.

Нехай при i -му переставленні q_{ln} став символом l -го рівня, на якому з урахуванням відповідних змін у (3) щодо порядку фіксування символів мінімальна відстань дорівнює $\delta_l^{(i)}$.

Зі сформульованого твердження випливає оцінка знизу $D \geq \min(\delta_l^{(i)}, d_l)$. Ця оцінка справджується при всіх переставленнях, тому $D \geq \min(\delta_l^{(i)}, d_l)$.

Висновки

Стандарт 5G — новий етап розвитку технологій радіодоступу, який забезпечить необмежений доступ до мережі для індивідуальних користувачів і пристроїв. При розробці стандарту 5G враховуються вдосконалені можливості LTE і HSPA, а також інших технологій радіодоступу, орієнтованих на розв'язання конкретних завдань.

Для реалізації високих швидкостей і створення ультращільного каналу передавання інформації необхідно використовувати сигнально-кодові конструкції, які забезпечують швидкість передавання інформації, близьку до пропускної здатності каналу.

Для каналів з адитивною сигнальною відстанню запропоновано конструкції багатовимірних сигналів, описувані сукупністю кодів. Ці конструкції придатні для неперервного каналу з білим шумом, для якого побудовано низку конкретних систем сигналів.

Використання багатовимірних сигналів дозволяє досягати незрівнянно вищої, ніж відомо досі, якості передавання повідомлень по каналах зв'язку.

Список використаної літератури

1. Гинзбург, В. В. Конструкции сигналов для непрерывного канала / В. В. Гинзбург // Тр. VIII Все-союзн. конф. по теории кодирования и передачи информации. Ч. II. Тез. докл. Москва — Куйбышев, 1981.— С. 43–48.
2. Ким, А. В. Новый мобильный горизонт: итоги MWC-13 / А. В. Ким, В. О. Тихвинский // Электросвязь.— 2013.— № 3.
3. Тихвинский, В. О. LTE World Summit-2013: на пути к 5G / В. О. Тихвинский, В. Я. Архипкин // Электросвязь.— 2013.— № 7.
4. Толубко, В. Б. Формування багатопозиційного сигналу технологій 5G на базі фазорізницевої модуляції високого порядку / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Козелков // Зв'язок.— 2016.— № 4.— С. 5–7.
5. Толубко, В. Б. Багатокритеріальна оптимізація параметрів програмно-конфігурованих мереж / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, Л. О. Орлов // Телекомунікаційні та інформаційні технології.— 2014.— № 4.— С. 3–8.

Рецензент: доктор техн. наук, професор В. А. Дружинін, Державний університет телекомунікацій, Київ.

В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, С. В. Козелков, Е. П. Гороховский
**ПОСТРОЕНИЕ УЛЬТРАПЛОТНЫХ МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ 5G
 НА БАЗЕ МНОГОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ**

Предложены принципиально новые сигнально-кодовые конструкции, использование которых при построении сетей 5G будет обеспечивать недостижимое до сих пор качество мобильной связи.

Ключевые слова: многомерные сигналы; аддитивное сигнальное расстояние; расстояние Хемминга; дискретный канал; декодирование; иерархическая конструкция.

V. B. Tolubko, L. N. Berkman, S. V. Kozelkov, E. P. Gorokhovskiy
ULTRACOMPACT 5G NETWORKS CREATING ON MANY-DIMENSIONAL SIGNALS BASE

This paper presents principlly modern signal-code constructions for 5G networks creating which are able to provide inaccessible so far quality of communication service.

Keywords: many-dimensional signals; additional signal interval; Hemming interval; discrete channel; decoding; hierarchic construction.

Шановні колеги!

*Передплата на загальногалузевий науково-виробничий журнал
завжди триває!*

ї ви можете оформити за «Каталогом видань України» та «Каталогом видань зарубіжних країн»:

- ❖ у відділеннях поштового зв'язку
- ❖ в операційних залах поштамтів
- ❖ у пунктах приймання передплати
- ❖ на сайті ДП «Преса» www.presa.ua
- ❖ на сайті УДППЗ «Укрпошта» www.ukrposhta.ua

**ПЕРЕДПЛАТНИЙ ІНДЕКС
74224**



Підтримуйте фахове галузеве видання — завжди надійне джерело достовірної інформації!