



DOI 10.28925/2663-4023.2023.22.238248

УДК 681.327

Курбет Павло Миколайович

аспірант

Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна

ORCID 0000-0002-0612-3859

tovsba@gmail.com**Зайцева Лілія Ігорівна**

аспірант

Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна

ORCID 0000-0002-0668-711X

lili5990n@ukr.net

МЕТОД АДАПТАЦІЇ РЕКУРСИВНИХ СИСТЕМАТИЧНИХ ЗГОРТОЧНИХ КОДІВ ТУРБО КОДІВ ШЛЯХОМ ОБХОДУ ВУЗЛІВ ПРОСТОРОВОЇ РЕШІТКИ

Анотація. Стаття присвячена підвищенню ефективності функціонування безпроводових систем передачі інформації за рахунок адаптації параметрів рекурсивних систематичних згорткових кодів турбо кодів шляхом обходу вузлів просторової решітки та розрахунку цільової функції. В якості цільової функції обрана ймовірність білової помилки декодування інформації. Для розрахунку обрана ймовірність білової помилки декодування інформації запропоновано використовувати коди Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема, так як для турбо кодів існують тільки наближені асимптотичні характеристики, які дають велику помилку при малих значеннях відношення сигнал/шум. Аналіз відомих робіт показує, що для покращення характеристик достовірності інформації використовуються схеми адаптації цих кодів. При цьому при адаптації у переважній більшості робіт змінюється тільки один параметр — швидкість кодування, що не повною мірою підвищує ефективність схем корегуючого кодування. Саме тому пропонується використовувати декілька параметрів при адаптації, а саме поліноми прямих та зворотних зв'язків рекурсивних систематичних згорткових кодів та швидкості кодування турбо кодів. Стаття складається із вступу, де висвітлено проблему, проведено аналіз останніх досліджень та публікацій по цій тематиці та сформульовано мету статті. Показано результати дослідження, зроблено висновки та перспективи подальших досліджень. Завершуються стаття списком використаних джерел. Як результат роботи запропонованого методу наведено параметри турбо кодів, які були знайдені із застосуванням методу для каналу з адитивним білим гаусівським шумом для різних розмірів вхідного блоку даних. Напрямок подальший досліджень вважаємо розширити простір просторової решітки для врахування більшої кількості параметрів турбо кодів при адаптації, при цьому можна передбачити наступні: кількість біт в блоці, типи перемешувачів, алгоритми декодування, ітерації декодування, і т.д.

Ключові слова: коригуючі коди; турбо коди; безпроводові системи передачі даних; функції правдоподібності; адаптація.

ВСТУП

Постановка проблеми. На теперішній час безпроводові системи передачі даних поєднують системи мобільного зв'язку та системи безпроводового доступу. Системи мобільного зв'язку пройшли вже 5 поколінь від 1G до 5G, ведеться розробка в усьому світі над науковою розробкою та після впровадження технологій 6G. До найбільш поширених систем безпроводового доступу відносяться Wi-Fi, Wi-Max, Zig-Bee, інші [1] – [5].



На сьогоднішній день в світі впроваджуються системи безпроводового доступу за технологією 5G. При цьому, комерціалізація 5G починається приблизно з 2020 року. Передбачається, що 6G буде забезпечувати кращі комунікації для людей і речей (технологія IoT), та буде охоплювати тенденцію розумного суспільства. Крім того, що триває еволюція трьох сценаріїв використання, започаткованих у 5G, штучний інтелект і датчики стануть двома новими сценаріями використання у 6G.

У роботі К. Шеннон 1948 році показано, що передача даних з малою кількістю помилок по безпроводовому каналу можлива, якщо використовується довгий випадковий завадостійкий (канальний) код [6]. З тих пір були докладені величезні зусилля до пошуку нових методів передачі з метою наближення до пропускну здатності каналу. Канальне кодування є одним із основних методів, які уможливають таку роботу майже на повній пропускну здатності.

На даний час розглядаються чотири схеми кодування: згорткові коди, турбо коди, Low-Density Parity Check (LDPC)-коди і полярні коди.

Для покращення характеристик достовірності інформації використовуються схеми адаптації цих кодів. При цьому при адаптації у переважній більшості робіт змінюється тільки один параметр — швидкість кодування R , що не повною мірою підвищує ефективність схем корегуючого кодування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [7] представлена нова структура турбо коду, яка підходить для паралельного та послідовного з'єднання для дуже низького BER, коли відношення сигнал-шум E_b/N_0 досягає певної точки в області мінімальної помилки. Пропонований код є модифікованим турбо кодом, який використовує паралельну та послідовну конкатенацію компонентних кодів. Порівняно з турбо-кодами, запропонований код може досягти майже такої ж складності декодування зі значно зниженою продуктивністю BER в області мінімальної помилки. Результати моделювання показують, що запропонований турбо код забезпечує хорошу продуктивність. Пропонований турбо код легко адаптується до великого діапазону розмірів блоків даних.

У роботі [8] пропонується нова система адаптивної модуляції (AM) з LDPC-кодами з підтримкою машинного навчання (ML), де використовуються коди LDPC з короткою довжиною блоку. Звичайна система адаптивної модуляції та кодування (AMC) включає метод перегляду фіксованої таблиці, який також називають адаптацією зв'язку внутрішнього циклу (ILLA) та адаптацією зв'язку зовнішнього контуру (OLLA). Для ILLA адаптивна здатність досягається шляхом перемикання режимів модуляції та кодування на основі пошукової таблиці з використанням порогових значень співвідношення сигнал/шум (SNR) при цільовій частоті бітових помилок (BER), тоді як OLLA базується на методі ILLA шляхом динамічного регулювання порогів SNR для подальшої оптимізації продуктивності системи.

Метою статті є підвищення ефективності функціонування безпроводових систем передачі інформації за рахунок адаптації параметрів рекурсивних систематичних згорткових кодів турбо кодів шляхом обходу візлів просторової решітки та розрахунку цільової функції.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Двійковий рекурсивний систематичний згортковий код (РСЗК) з швидкістю кодування $R = 1/2$ можна отримати з несистематичного згорткового коду (НЗК) за допомогою зворотного зв'язку й установки одного з двох виходів (u_k або v_k) рівним d_k .

На рис. 1 показаний РСЗК, де a_k отримується з рекурсивної процедури: $a_k = d_k + \gamma_i a_{k-1} \bmod 2$, а $\gamma_1 = g_{1i}$, якщо $u_k = d_k$, і g_{2i} — якщо $v_k = d_k$. При цьому прямих зв'язків може бути декілька, при цьому використовуються відповідно декілька породжуючих поліномів

$G1: \{g_{1i}\}$, $G2: \{g_{2i}\}$ — генератори (утворювачі) коду, представляються у двійковій, вісімковій, десятковій системі числення.

Для цього прикладу кількість комірок пам'яті $M = 3$ і використовуються формуючі генератори $G1 = \{111\}$ і $G2 = \{101\}$ (показані у вісімковій системі числення).

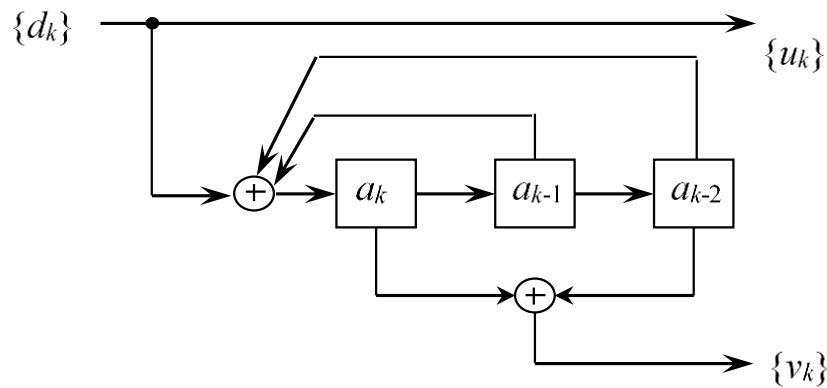


Рис. 1. Структурна схема кодера РСЗК

Кодер турбо коду утворюється шляхом поєднання двох РСЗК, які розділюються перемежувачем (рис. 2).

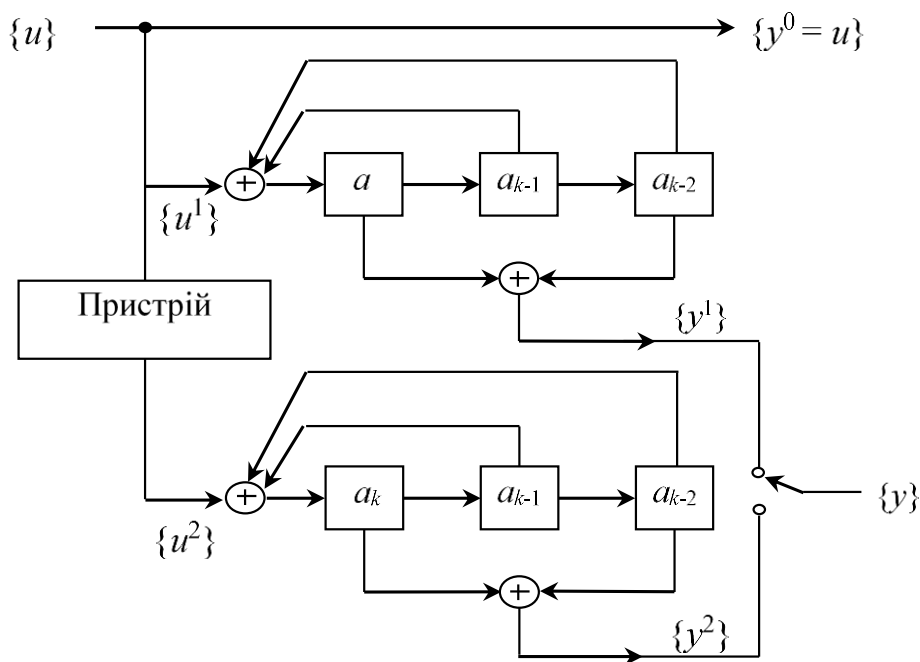


Рис. 2. Кодер турбо коду

Турбо код формується із компонентних кодів з невеликою довжиною кодового обмеження ($K = M+1 = 3 \dots 5$). Розглянемо кодер, показаний на рис. 2, ключ робить швидкість кодування турбо коду $R = 1/2$. Без використання ключа швидкість кодування $R = 1/3$, а у випадку використання більшості компонентних кодів — $1/n$. Цей турбо код складається із двох РСЗК з пам'яттю $M_1 = M_2 = 2$. Перший компонентний кодер приймає інформаційну послідовність біт $u = (u_1, \dots, u_N)$ довжиною N , на виході отримуємо дві послідовності y_0 і y_1 . На другий складовий кодер після перемеження поступає послідовність інформаційних біт y_2 довжиною N .

Кодування кожний РСЗК здійснюється по діаграмі станів, яка відображає всі можливі стани компонентного кодера та всі можливі переходи при подачі на вхід $\{0\}$ або $\{1\}$. Поліноми прямих та зворотних зв'язків впливають на структури діаграмі станів.

При декодуванні використовується аналогічна діаграма станів. Розраховуються логарифмічні відношення функцій правдоподібності (ЛВФП) $L(u_k)$ для випадкової двійкової змінної u_k таким чином [9]:

$$L(u_k) \triangleq \log\left(\frac{P(u_k = 1 / y_1^N)}{P(u_k = 0 / y_1^N)}\right). \quad (7)$$

Для декодування використовуються алгоритми за максимумом правдоподібності.

Врахування поліномів та швидкостей кодування відбувається при розрахунку перехідної метрики $\gamma_t(s', s)$ в алгоритмах декодування турбо кодів [10].

Розглядається РСЗК з кодовою швидкістю $1/q$ (для кожного вхідного біта РСЗК виробляє q біт), ймовірність отримання символу y_k , за умови, що був переданий символ c_k , $P(Y = y_k / c_k)$, може бути апроксимована таким чином:

$$\begin{aligned} P(Y = y_k / c_k) &= P(Y = y_k / u_k) \approx \lim_{\Delta \rightarrow 0} P(y_k \leq Y \leq y_k + \Delta / U = u_k) \\ &= \lim_{\Delta \rightarrow 0} p(y_k / u_k) \Delta = \lim_{\Delta \rightarrow 0} p(y_k / x_k) \Delta, \end{aligned} \quad (8)$$

де $p(y_k/x_k)$ — функція щільності розподілу ймовірності символу y_k за умови передачі символу x_k , Δ — довільне мале позитивне число, яким можна знехтувати при обчисленні. Так як $P(y_k/u_k)$ пропорційна $p(y_k/x_k)$, можна записати наступне:

$$\begin{aligned} P(y_k / u_k) &= P(y_k^{1,s}, y_k^{2,p}, y_k^{3,p}, \dots / c_k^1, c_k^2, c_k^3, \dots) = P(y_k^{1,s}, y_k^{2,p}, y_k^{3,p}, \dots / x_k^{1,s}, x_k^{2,p}, x_k^{3,p}, \dots) \\ &= P(y_k^{1,s} / x_k^{1,s}) P(y_k^{2,p} / x_k^{2,p}) P(y_k^{3,p} / x_k^{3,p}) \dots = P(y_k^{1,s} / x_k^{1,s}) \prod_{i=2}^q P(y_k^{i,p} / x_k^{i,p}). \end{aligned} \quad (9)$$

Так як використовується канал без пам'яті,

$$\begin{aligned} P(y_k / u_k) &\propto e^{-\frac{(y_k^{1,s} - x_k^{1,s})^2}{2\sigma_n^2} - \sum_{i=2}^q \frac{(y_k^{i,p} - x_k^{i,p})^2}{2\sigma_n^2}} = e^{-\frac{(y_k^{1,s})^2 + (x_k^{1,s})^2}{2\sigma_n^2} - \sum_{i=2}^q \frac{(y_k^{i,p})^2 + (x_k^{i,p})^2}{2\sigma_n^2}}. \\ e^{\frac{y_k^{1,s} x_k^{1,s}}{\sigma_n^2} + \sum_{i=2}^q \frac{y_k^{i,p} x_k^{i,p}}{\sigma_n^2}} &= B_k e^{\frac{y_k^{1,s} x_k^{1,s}}{\sigma_n^2} + \sum_{i=2}^q \frac{y_k^{i,p} x_k^{i,p}}{\sigma_n^2}}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{де } B_k = e^{-\frac{(y_k^{1,s})^2 + (x_k^{1,s})^2}{2\sigma_n^2} - \sum_{i=2}^q \frac{(y_k^{i,p})^2 + (x_k^{i,p})^2}{2\sigma_n^2}}.$$

Враховуючи (10), вираз для $\gamma_k(s', s)$ запишеться як:

$$\gamma_k(s', s) = P(y_k / c_k = c) P(u_k = u) = B_k e^{\frac{y_k^{1,s} x_k^{1,s}}{\sigma_n^2} + \sum_{i=2}^q \frac{y_k^{i,p} x_k^{i,p}}{\sigma_n^2}} A_k e^{\frac{L_u(c_k^1) \cdot c_k^1}{2}}. \quad (11)$$

A_k і B_k можуть бути опущені при обчисленні. Для каналу з АБГШ

$$h_0^2 = \frac{E_b}{N_0} = \frac{E_c}{R \cdot N_0}, \quad (12)$$

де h_0^2 — відношення енергії біта до спектральної щільності потужності шуму, E_c — енергія кодового символу, E_b — енергія не кодованого біта. $E_c = R \cdot E_b$, и $\sigma_n^2 = \frac{N_0}{2} = \frac{E_c}{2 \cdot R \cdot h_0^2} = \frac{p}{2 \cdot h_0^2}$, $p \triangleq \frac{1}{R}$, припустимо, що $E_c = 1$.

Замінюючи вираз для σ_n^2 в рівнянні (11), отримаємо

$$\begin{aligned} \gamma_k(s', s) &= B_k \cdot e^{-\frac{y_k^{1,s} \cdot y_k^{i,p}}{\sigma_n^2} + \sum_{i=2}^q \frac{y_k^{i,p} \cdot y_k^{i,p}}{\sigma_n^2}} \cdot A_k \cdot e^{-\frac{L_a(c_k^1) \cdot c_k^1}{2}} = A_k \cdot B_k \cdot e^{-\frac{y_k^{1,s} \cdot y_k^{i,p}}{\sigma_n^2} + \sum_{i=2}^q \frac{y_k^{i,p} \cdot y_k^{i,p}}{\sigma_n^2}} \cdot e^{-\frac{L_a(c_k^1) \cdot c_k^1}{2}} = \\ &= A_k \cdot B_k \cdot \exp \left[\frac{4 \cdot h_0^2}{p} \cdot \left(\frac{y_k^{1,s} \cdot A \cdot c_k^1}{2} + \sum_{i=2}^q \frac{y_k^{i,p} \cdot A \cdot c_k^i}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot L_a(c_k^1) \cdot c_k^1 \right] = \\ &= A_k \cdot B_k \cdot \exp \left[\frac{1}{2} \cdot L_a(c_k^1) \cdot c_k^1 + \frac{4 \cdot A \cdot h_0^2}{p} \cdot \frac{1}{2} \cdot y_k^{1,s} \cdot c_k^1 \right] \exp \left[\sum_{i=2}^q \left(\frac{4 \cdot A \cdot h_0^2}{p} \cdot \frac{1}{2} \cdot y_k^{i,p} \cdot c_k^i \right) \right] = \\ &= A_k \cdot B_k \cdot \exp \left[\frac{1}{2} \cdot L_a(c_k^1) \cdot c_k^1 + Lc \cdot \frac{1}{2} \cdot y_k^{1,s} \cdot c_k^1 \right] \exp \left[\sum_{i=2}^q \left(Lc \cdot \frac{1}{2} \cdot y_k^{i,p} \cdot c_k^i \right) \right], \end{aligned} \quad (13)$$

Таким чином, аналізуючи вираз (13) можна побачити, що в виразі для перехідної метрики враховані перевіірочні символи з урахуванням будь-якої структури РСЗК, які отримуються за рахунок використання прямих та зворотних поліномів РСЗК та швидкості кодування турбо коду.

Розглядається адаптивна система передачі інформації з турбо кодами. В якості параметрів адаптації турбо кодів приймаються поліноми прямих та зворотних зв'язків g_0, g_1, \dots, g_m рекурсивних систематичних згорткових кодів (РСЗК) та швидкості кодування R .

Ефективність системи передачі інформації з турбо кодами характеризується деяким числовим показником J , який потрібно в результаті адаптації перетворити на екстремум, наприклад, на мінімум. Випадок, коли необхідно досягти максимуму J , просто зводиться до попереднього.

Процес адаптації показаний на рис. 3.

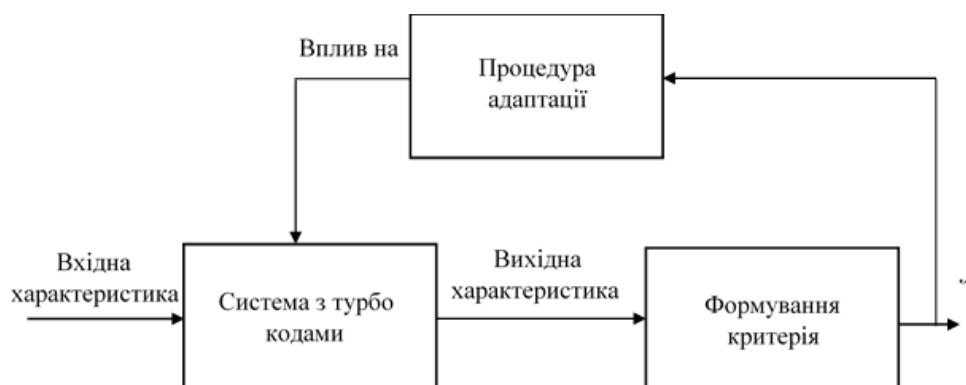


Рис. 3. Структурна схема параметричної адаптації системи передачі інформації з турбо кодами

За відомим значенням критерію відповідно до методу адаптації здійснюється спрямований вплив на систему (її динамічні характеристики, параметри), що має

привести до досягнення мінімуму J . Звідси видно, що показник системи в загальному випадку залежить від двох чинників:

- від заданих характеристик системи, що не піддаються процедурі адаптації, які будемо описувати вектором

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\};$$

- від характеристик, визначених у процесі адаптації та які називаються вектором управління

$$u = \{u_1, u_2, \dots, u_r\}.$$

Вектори a та u можуть бути як функціями, так і числами, тоді:

$$J = J(a, u).$$

Власне кажучи, J залежить від вхідної інформації та початкового стану системи, але оскільки система має успішно працювати в різних умовах, то ця залежність у критерії не знаходить відображення.

У процесі адаптації потрібно забезпечити

$$J^0 = J(a, u^0) = \min_{u \in U} J(a, u).$$

де u^0 — оптимальне керування, що належить області допустимих управлінь U . Критерій J у випадку, коли u є функцією, являє собою функціонал — змінну величину, значення якої визначається вибором функції, що відіграє роль аргументу функціоналу. Якщо ж управління описується сукупністю констант $u = \{u_1, u_2, \dots, u_r\}$, то J є критеріальна (цільова) функція.

Для системи з турбо кодуванням в якості цільової функції будемо використовувати ймовірність білової помилки декодування інформації. Для її отримання будемо використовувати коди Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема. Так як існують точні аналітичні співвідношення для ймовірності білової помилки декодування. Для турбо кодів існують тільки наближені асимптотичні характеристики, які дають велику помилку при малих значеннях відношення сигнал/шум.

Адаптація параметрів турбо кодів здійснимо шляхом обходу вузлів просторової решітки. Вузли решітки представляються елементами векторів як параметри поліномів прямих та зворотних зв'язків $G = \{G0, G1\} = \{g_0, g_1, \dots, g_m\}$ рекурсивних систематичних згорткових кодів та швидкостей кодування $R = \{R_1, R_2, \dots, R_h\}$.

Так як незалежних змінних (параметрів турбо коду) $x_i, i \in 1, n$ небагато і невеликі межі, в яких вони можуть змінюватися, то пошук екстремального значення J може бути здійснено обходом у визначеному порядку вузлів багатовимірної решітки в просторі незалежних змінних і обчисленням у кожній точці значення функції J . При цьому відкидаються ті точки, в яких умови (б) не виконуються, а серед точок, для яких умови (б) справедливі, обирають точку з найменшим значенням J .

При розрахунках і виборі параметрів турбо кодів будемо використовувати наступні параметри

- поліноми зворотних зв'язків РСЗК $G0 = \{g_0\}$;
- поліноми прямих зв'язків РСЗК $G1 = \{g_1, g_2, \dots, g_h\}$;
- швидкості кодування РСЗК $R = \{R_1, R_2, \dots, R_h\}$.

Пошук мінімального значення цільової функції полягає у визначенні найкращих параметрів турбо коду $G0, G1, R$.

Математично задача визначення оптимальних параметрів турбо коду формулюється таким чином. Необхідно знайти значення змінних G_0, G_1, R , за яких функція цих змінних:

$$J = J(G_0, G_1, R) \rightarrow \min \quad (1)$$

приймає мінімальне значення за умови, що виконуються обмеження, накладені на значення таких функцій цих змінних

$$J = J(G_0, G_1, R) \leq J_{\text{дон}} \quad (2)$$

$$G_0(G_1, R) \leq G_x \quad (3)$$

$$G_1(G_0, R) \leq G_y \quad (4)$$

$$R(G_0, G_1) \leq G_z \quad (5)$$

$$G_0 \geq 0, G_1 \geq 0, R \geq 0 \quad (6)$$

Сутність алгоритму обходу вузлових точок стосовно задачі вибору ефективних параметрів турбо кодів полягає в такому (подамо певними етапами):

1. Введення початкових даних з урахуванням обмежень (2) – (6).
2. Одна площина тривимірного простору змінних G_0, G_1, R представляється площиною $G_0 = \text{const}$ з деяким кроком по G_0 .

Кожен отриманий переріз являє собою площину змінних G_1, R за відповідних значень $G_0 = \text{const}$. На ці площини наносять сітку з кроками ΔG_1 і ΔR відповідно по осях G_1 і R .

3. Обчислювальний пристрій обходить одну за одною вузлові точки сітки в площині G_1 і R , і в кожній точці за відповідних значень виконує розрахунок $J = J(G_0, G_1, R)$ і перевірку обмежень (2) – (6). Параметри турбо коду, що не задовольняють умовам (2) – (6), відкидаються, а з варіантів, для яких ці умови виконуються, обирають і запам'ятовують лише найкращий у розумінні $\min J$.

4. Після закінчення пошуку найкращого варіанту в одній площині G_1 і R машина переходить до пошуку нової площини G_1 і R . Пошук оптимального варіанта в площині G_1 і R (рис. 4) починається з крайньої правої верхньої. Вузлові точки сітки обходяться зверху вниз в одній вертикалі, а вертикалі змінюються зправа наліво.

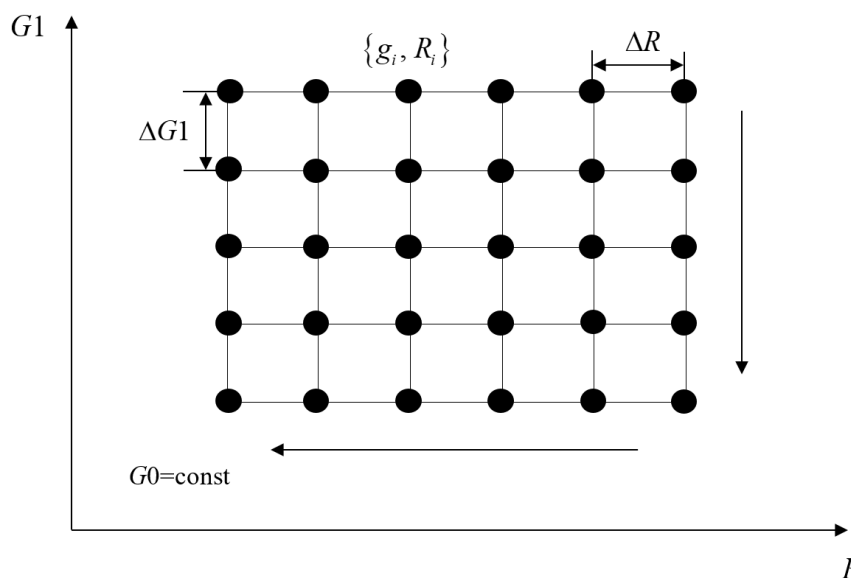


Рис. 4. Вибір ефективних параметрів турбо кодів способом обходу вузлових точок просторової решітки

Такий спосіб пошуку дає змогу визначити з точністю до кроків ΔG_0 , ΔG_1 , ΔR оптимальне значення параметрів G_0 , G_1 , R , при яких критерій J приймає з урахуванням обмежень (2) – (6) мінімальне значення.

Якщо під час подальшої перевірки умов (1) – (6) виявляється, що для даної вузлової точки не виконується хоча б одне з обмежень, то подальший розрахунок припиняється, і обчислювальна система переходить до розрахунків для наступної вузлової точки сітки.

Якщо задовольняються всі обмеження, то машина переходить до розрахунку J для даних параметрів турбо коду. Варіант, для якого всі виправлення виконуються, порівнюється за величиною J з попереднім варіантом. Параметри турбо коду, що відповідають більшому значенню J , відкидаються.

5. Якщо пошук в даній площині G_1 , R закінчено, то значення G_0 змінюється на величину кроку ΔG_0 і пошук продовжується в новій площині G_1 , R .

6. Процес пошуку ефективних параметрів турбо коду закінчується за умовою досягнення граничного значення G_0 або досягнення $\min J$.

В табл. 1 показані параметри турбо кодів, знайдені запропонованим алгоритмом, для цільової функції $J = P_{\text{ном дек}} = 10^{-4}$ та різних значень розмірів вхідного блоку даних.

Таблиця 1

Параметри турбо кодів, знайдені запропонованим алгоритмом

Параметри турбо коду	Розмір вхідного блоку даних, біт						
	100	500	1000	2000	4000	8000	16000
G_0	23	17	23	15	13	7	7
G_1	27	13	25	17	15	5	5
R	1/5	1/5	1/3	1/3	1/2	1/2	2/3

Таким чином, отримані найкращі параметри турбо кодів для забезпечення заданої цільової функції (ймовірності бітової помилки декодування), що дозволить зменшити кількість помилок, тим самим підвищить ефективність функціонування безпроводових систем передачі інформації.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Стаття присвячена підвищенню ефективності функціонування безпроводових систем передачі інформації за рахунок адаптації параметрів рекурсивних систематичних згорткових кодів турбо кодів шляхом обходу вузлів просторової решітки та розрахунку цільової функції.

2. В якості цільової функції обрана ймовірність білової помилки декодування інформації. Для розрахунку обрана ймовірність білової помилки декодування інформації запропоновано використовувати коди Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема, так як для турбо кодів існують тільки наближені асимптотичні характеристики, які дають велику помилку при малих значеннях відношення сигнал/шум.

3. Як результат роботи запропонованого методу наведено параметри турбо кодів, які були знайдені із застосуванням методу для каналу з аддитивним білим гаусівським шумом для різних розмірів вхідного блоку даних.



4. Напрямок подальший досліджень вважаємо розширити простір просторової решітки для врахування більшої кількості параметрів турбо кодів при адаптації, при цьому можна передбачити наступні: кількість біт в блоці, типи перемежувачів, алгоритми декодування, ітерації декодування, і т.д.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lei, W., Soong, A. C. K., Jianghua, L., Yong, W., Classon, B., Xiao, W., Mazzaresse, D., Yang, Z., & Saboorian, T. (2021). *5G system design: An end to end perspective* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22236-9>
2. Neir, P. (2021). *Securing 5G and evolving architectures*. Addison-Wesley Professional.
3. Hassan, S., Orel, A., & Islam, K. (2022). *A network architect's guide to 5G*. Addison-Wesley Professional.
4. Jin, J., Xiao, C., Chen, W., & Wu, Y. (2019). Channel-statistics-based hybrid precoding for millimeter-wave MIMO systems with dynamic subarrays. *IEEE Transactions on Communications*, 67, 3991–4003. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025181>
5. Huang, H. (2020). Deep learning for physical-layer 5G wireless techniques: Opportunities, challenges, and solutions. *IEEE Wireless Communications*, 27, 214–222. <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1900027>
6. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
7. Mensouri, M., & Aaroud, A. (2016). Adaptive encoding/decoding for turbo codes. In *Proceedings of the International Conference on Big Data and Advanced Wireless Technologies (BDAW'16)*, 1–7. <https://doi.org/10.1145/3010089.3010096>
8. Xie, C., El-Hajjar, M., & Xin Ng, S. (2023). Machine learning assisted adaptive LDPC coded system design and analysis. *IET Communications*, 18, 1–10. <https://doi.org/10.1049/cmu2.12707>
9. Berrou, C., Glavieux, A., & Thitimajshima, P. (1993, May). Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. In *Proceedings of the International Conference on Communications (ICC-93)*, 1064–1070. Geneva. <https://doi.org/10.1109/ICC.1993.397441>
10. Xiang-Gen, X. (2024). Understanding turbo codes: A signal processing study. *Journal of Information and Intelligence*, 2, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jiixd.2023.10.003>

**Pavlo Kurbet**

Postgraduate

Work place: Institute of Telecommunications and Global Information
Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-0612-3859

tovsba@gmail.com

Liliia Zaitseva

Postgraduate

Work place: Institute of Telecommunications and Global Information
Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-0668-711X

lili5990n@ukr.net

METHOD FOR ADAPTING RECURSIVE SYSTEMATIC CONVOLUTIONAL CODES OF TURBO CODES BY BYPASSING THE NODES OF THE SPATIAL GRID

Abstract. The article is devoted to increasing the efficiency of the functioning of wireless information transmission systems due to the adaptation of the parameters of recursive systematic convolutional codes of turbo codes by bypassing the nodes of the spatial grid and calculating the objective function. The probability of a white error of information decoding is chosen as the objective function. To calculate the chosen probability of a white error of information decoding, it is proposed to use Bowes-Choudhury-Hockingham codes, since for turbo codes there are only approximate asymptotic characteristics that give a large error at small values of the signal-to-noise ratio. Analysis of known works shows that adaptation schemes of these codes are used to improve the reliability of information. At the same time, during adaptation, in the vast majority of works, only one parameter changes — the coding speed, which does not fully increase the effectiveness of corrective coding schemes. That is why it is proposed to use several parameters during adaptation, namely the polynomials of forward and backward connections of recursive systematic convolutional codes and the coding speed of turbo codes. The article consists of an introduction, which highlights the problem, analyzes the latest research and publications on this topic, and formulates the purpose of the article. The results of the research are shown, conclusions and prospects for further research are drawn. The article ends with a list of used sources. As a result of the work of the proposed method, the parameters of the turbo codes, which were found using the method for the channel with additive white Gaussian noise for different sizes of the input data block, are given. We consider the direction of further research to expand the space of the spatial lattice to take into account more parameters of turbo codes during adaptation, while the following can be foreseen: the number of bits in the block, types of interleavers, decoding algorithms, decoding iterations, etc.

Keywords: corrective codes; turbo codes; wireless data transmission systems; likelihood functions; adaptation.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Lei, W., Soong, A. C. K., Jianghua, L., Yong, W., Classon, B., Xiao, W., Mazzaresse, D., Yang, Z., & Saboorian, T. (2021). *5G system design: An end to end perspective* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22236-9>
2. Neir, P. (2021). *Securing 5G and evolving architectures*. Addison-Wesley Professional.
3. Hassan, S., Orel, A., & Islam, K. (2022). *A network architect's guide to 5G*. Addison-Wesley Professional.
4. Jin, J., Xiao, C., Chen, W., & Wu, Y. (2019). Channel-statistics-based hybrid precoding for millimeter-wave MIMO systems with dynamic subarrays. *IEEE Transactions on Communications*, 67, 3991–4003. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025181>
5. Huang, H. (2020). Deep learning for physical-layer 5G wireless techniques: Opportunities, challenges, and solutions. *IEEE Wireless Communications*, 27, 214–222. <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1900027>



6. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
7. Mensouri, M., & Aaround, A. (2016). Adaptive encoding/decoding for turbo codes. In *Proceedings of the International Conference on Big Data and Advanced Wireless Technologies (BDAW'16)*, 1–7. <https://doi.org/10.1145/3010089.3010096>
8. Xie, C., El-Hajjar, M., & Xin Ng, S. (2023). Machine learning assisted adaptive LDPC coded system design and analysis. *IET Communications*, 18, 1–10. <https://doi.org/10.1049/cmu2.12707>
9. Berrou, C., Glavieux, A., & Thitimajshima, P. (1993, May). Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. In *Proceedings of the International Conference on Communications (ICC-93)*, 1064–1070. Geneva. <https://doi.org/10.1109/ICC.1993.397441>
10. Xiang-Gen, X. (2024). Understanding turbo codes: A signal processing study. *Journal of Information and Intelligence*, 2, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jiixd.2023.10.003>