

Список використаних джерел

1. Борщев А. В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика / А. В. Борщев // ExponentaPro. – 2004. – № 3–4. – С. 38–47.
2. Штовба С. Д. Муравьиные алгоритмы / С. Д. Штовба // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 4. – С. 70–75.
3. Lustick I. PS-I: A user-friendly agent-based modeling platform for testing theories of political identity and political stability // J. Artificial Societies and Social Simulations. – 2002. – Iss. 5, № 3.
4. Ситник В. Ф. Імітаційне моделювання : навч. посіб. / В. Ф. Ситник, Н. С. Орленко. – К. : КНЕУ, 1998. – С. 25–34.
5. Michael Wooldridge, An Introduction to Multi-Agent Systems, John Wiley & Sons Ltd, 2002, paperback, 366 p.
6. Liviu Panait, Sean Luke: Cooperative Multi-Agent Learning: The State of the Art. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2005. – 11(3). – P. 387–434.

УДК 621.396.2.019.4:621.391.254

С.В. Зайцев, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ПАРАМЕТРИЧНА АДАПТАЦІЯ ТУРБОКОДІВ В УМОВАХ АПРІОРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

С.В. Зайцев, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ ТУРБОКОДОВ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Serhii Zaitsev, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

PARAMETRICAL ADAPTATION OF TURBOCODES UNDER A PRIORI UNCERTAINTY

Запропоновано метод параметричної адаптації турбокодів за умов впливу навмисних завад, які призводять до виникнення невизначеності у процесі декодування турбокодів. Сутність методу полягає в адаптивному виборі параметрів турбокоду з використанням апріорної та апостеріорної інформації декодера турбокоду за рахунок мінімізації середнього ризику. Запропоновані результати можна використати для підвищення достовірності систем передачі інформації, які функціонують в умовах впливу потужних навмисних завад.

Ключові слова: турбокоди, адаптація, алгоритми декодування.

Предложен метод параметрической адаптации турбокодов в условиях воздействия преднамеренных помех, которые приводят к возникновению неопределенности в процессе декодирования турбокодов. Сущность метода заключается в адаптивном выборе параметров турбокода с использованием априорной и апостериорной информации декодера турбокода за счет минимизации среднего риска. Предложенные результаты можно использовать для повышения достоверности систем передачи информации, которые функционируют в условиях воздействия мощных преднамеренных помех.

Ключевые слова: турбокоды, адаптация, алгоритмы декодирования.

A method of parametric adaptations turbocodes under the effect of jamming, that give rise to uncertainties in the decoding process of turbocodes. The essence of the method lies in the choice of parameters adaptive turbocode using a priori and a posteriori information decoder turbocode by minimizing the average risk. The proposed results can be used to improve the reliability of data transmission systems, which operate under the action of powerful jamming.

Key words: turbocodes, adaptation, decoding algorithms.

Постановка проблеми. Основним режимом роботи безпроводових систем передачі інформації спеціального призначення є режим роботи в умовах впливу потужних навмисних завад, які здатні значно знижувати характеристики достовірності передачі інформації. Основними видами завад, які найбільш часто реалізуються в системах постановки навмисних завад, є: шумова загороджувальна перешкода, шумова завада в частині смуги і завада у відповідь, моделі яких представляють обмежений по смузі частот адитивний білий гауссівський шум (АБГШ) [1]. Як метод захисту від навмисних

завад застосовують метод псевдовипадкової перебудови робочої частоти та корегувальні коди, такі як коди циклічні коди, коди БЧХ, Ріда-Соломона та інші.

Найбільш ефективними серед всього класу корегувальних кодів є турбокоди (ТК). За енергетичною ефективністю ТК поступаються теоретичному граничному значенню для швидкості кодування $R = 1/3$ лише 0,5 дБ [2]. Турбокоди застосовуються в системах мобільного зв'язку третього покоління 3G (cdma2000, cdma2000 1xEV-DO, cdma2000 1xEV-DV, UMTS), четвертого покоління 4G (LTE), у системах зв'язку з далеким космосом CCSDS для передачі телеметричної інформації з космічних апаратів, у системах супутникового цифрового телебачення DVB-RCS [3–8].

Застосування ТК у безпроводових системах спеціального призначення, які функціонують в умовах впливу навмисних завад, розглянуто не досить повно. Вимагає розгляду питання застосування адаптивних турбокодів в умовах впливу навмисних завад, які б змінювали свої параметри залежно від стану каналу для забезпечення заданих характеристик достовірності передачі інформації.

Аналіз досліджень і публікацій. У роботах [9–10] досліджуються схеми адаптації сигнально-кодових конструкцій (зміна позиційності сигналу та швидкості кодування завадостійкого коду) систем WiMax та LTE за первинними параметрами залежно від відношення сигнал-шум у каналі передачі. При цьому розглядаються канали з адитивним білим гауссівським шумом, Релеївськими замираннями, Райсовськими замираннями та замираннями Накагамі. В роботах інших авторів [11–14] адаптація відбувається теж за рахунок зміни позиційності сигналу та швидкості кодування, але вже за вторинними параметрами – залежно від значень відношення сигнал-шум розраховуються значення ймовірності помилки для різних схем модуляцій сигналу та здійснюється порівняння цього значення з заданими, і залежно від результатів порівняння здійснюється вибір необхідної сигнально-кової конструкції.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Недоліком зазначених схем адаптації є те, що первинним параметром при адаптації є відношення сигнал-шум, а також те, що вони не враховують при адаптації результати декодування, що може призвести до неточності прийняття рішень, особливо за умов потужних завад.

Мета статті. Метою статті є розроблення методу параметричної адаптації турбокодів за умов впливу навмисних завад за рахунок мінімізації середнього ризику з використання априорної та апостеріорної інформації декодера турбокоду.

Виклад основного матеріалу. При знаходженні оптимальних (раціональних) динамічних систем, функціонуючих в умовах впливу випадкових завад, застосовують статистичні критерії якості, за допомогою яких оцінюють середні значення вихідних характеристик для великої кількості реалізацій процесів на входах системи. Як приклади таких статистичних критеріїв якості можна навести такі: відношення потужності сигналу до потужності шуму або енергії сигналу до спектральної щільності шуму на виході приймача; величина середнього квадрата помилки оцінки деякої фізичної величини; ймовірність помилок під час перевірки різних гіпотез; середній час до ухвалення рішення із заданою ймовірністю помилок при нефіксованому часі спостереження випадкових вхідних величин.

Синтез оптимальних (раціональних) систем при випадкових вхідних діях зводиться до вибору параметрів або виду систем, що мінімізують або максимізували відповідні статистичні критерії якості [15].

Нехай послідовність на виході кодера ТК має вигляд: $\bar{X} = (\bar{X}^c, \bar{X}^n)$, де $\bar{X}^c = \bar{U}$ – систематичний вихід кодера, а $\bar{X}^n = (\bar{X}^{n1}, \bar{X}^{n2})$ – перевірочні виходи кодера ТК розмірності v , де v – загальна кількість перевірочних символів кожного рекурсивного систе-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

матичного згорткового коду. Передбачається, що канал зв'язку дискретно-неперервний і має ідеальну імпульсну характеристику $h_c(t)=1$, внаслідок чого сигнал спотворюється тільки присутністю білого гауссівського шуму. З виходу каналу послідовність символів подається на декодер ТК (рис.) кожної ітерації декодування: $\bar{Y}^1 = (L_c \bar{Y}^{C1}, L_c \bar{Y}^{П1})$ – для декодера 1, де $\bar{Y}^{П1} = (\bar{Y}^{П11}, \dots, \bar{Y}^{П1v})$, а $\bar{Y}^2 = (L_c \bar{Y}^{C2}, L_c \bar{Y}^{П2})$ – для декодера 2, де $\bar{Y}^{П2} = (\bar{Y}^{П21}, \dots, \bar{Y}^{П2v})$. У цьому випадку $\bar{Y}^{C1} = \bar{Y}^C, \bar{Y}^{C2}$ – послідовності систематичних символів з урахуванням відповідної операції перемеження, а L_c – параметр «канальної надійності», що характеризує «зашумленість» каналу передачі інформації [16]. У наведеній схемі можуть бути використані перемежувачі різних видів, наприклад, псевдо-випадковий перемежувач/деперемежувач, S -випадковий, діагональний і т. ін.

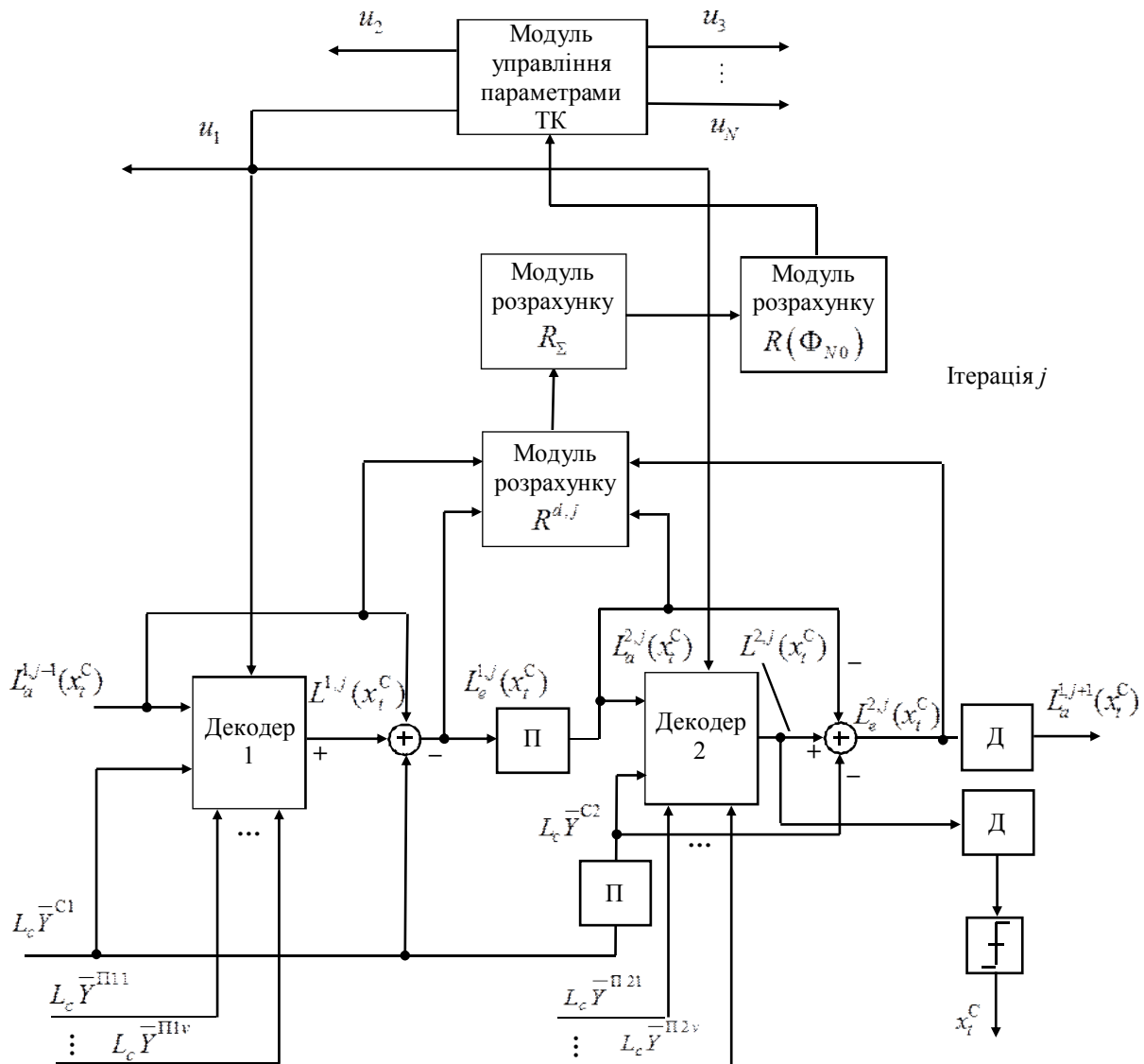


Рис. Структурна схема адаптивного декодера турбокоду

Розглянемо більш докладно роботу декодерів 1, 2 на j -й ітерації декодування по декодуванню t -го біта, $j \in \overline{1, I}, t \in \overline{1, N}$, де I – загальна кількість ітерацій декодування, N – загальна кількість біт у переданому блоці даних. Структурна схема декодера турбокоду з модулями розрахунку критеріїв ризику $R^{d,j}, R_\Sigma, R(\Phi_{N0})$ і модулем управління пара-

метрами ТК, який формує множину рішень вибору параметрів ТК $U = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_N)$, що передаються до кодера й декодера ТК, показана на рис. Як параметри ТК, які адаптуються до середовища передачі, розглядаються поліноми рекурсивних систематичних згорткових кодів $(1, g_1 / g_0)$, алгоритми перемеження (регулярні або псевдовипадкові), кількість біт у блоці N , швидкість кодування турбокоду R , алгоритми декодування (Map, Max Log Map, Log Map), кількість ітерацій декодування I .

Нехай x_t – це переданий t -й біт, а y_t – прийнятий t -й біт, який спотворений впливом білого гауссівського шуму. Оскільки у каналах з підвищеним рівнем шуму на прийомній стороні приймаються рішення в умовах невизначеності, то «м'яке» рішення або логарифмічне відношення функцій правдоподібності (ЛВФП), що розраховує декодером 1 на j -й ітерації, визначається таким вираженням [16]:

$$L^{1,j}(x_t | y_t) = \ln \frac{P(y_t | x_t = +1)}{P(y_t | x_t = -1)} + \ln \frac{P(x_t = +1)}{P(x_t = -1)} = L_a^{1,j}(x_t) + L^{1,j}(y_t | x_t), \quad (1)$$

де $L^{1,j}(y_t | x_t)$ – ЛВФП, що виходить завдяки виміру y_t на виході каналу при чергуванні умов, що може бути переданий $x_t = +1$ або $x_t = -1$, а $L_a^{1,j}(x_t)$ – апіорне ЛВФП біта даних x_t . Для спрощення рівняння (1) може бути переписане таким чином:

$$L^{1,j}(x_t) = L_c^{1,j}(y_t) + L_a^{1,j}(x_t) + L_e^{1,j}(x_t), \quad (2)$$

де $L_c^{1,j}(y_t)$ – параметр «канальної надійності», $L_e^{1,j}(x_t)$ – апостеріорне ЛВФП біта даних x_t .

Далі розраховується апостеріорне ЛВФП біта даних $x_t - L_e^{1,j}(x_t)$:

$$L_e^{1,j}(x_t) = L^{1,j}(x_t) - L_c^{1,j}(y_t) - L_a^{1,j}(x_t). \quad (3)$$

Перемежувач перетворить апостеріорне ЛВФП $L_e^{1,j}(x_t)$ в апіорне ЛВФП $L_a^{2,j}(x_t)$: $L_a^{2,j}(x_t) = f_1(L_e^{1,j}(x_t))$, що подається на декодер 2. Декодер 2 виконує такі обчислення для одержання апостеріорного ЛВФП біта даних $x_t - L_e^{2,j}(x_t)$:

$$L_e^{2,j}(x_t) = L^{2,j}(x_t) - L_c^{2,j}(y_t) - L_a^{2,j}(x_t). \quad (4)$$

Після операції депереження $L_a^{1,j+1}(x_t) = f_2(L_e^{2,j}(x_t))$ величина $L_a^{1,j+1}(x_t)$ використовується як апіорна для декодера 1 ітерації $j+1$. Далі здійснюються обчислення аналогічні (3) і (4).

Після виконання необхідної кількості ітерацій, або у випадку примусової зупинки ітеративної процедури декодування, виносяться «тверді» рішення про декодовані символи:

$$x_t^C = \begin{cases} 1, & \text{если } L(x_t^C) \geq 0 \\ 0, & \text{если } L(x_t^C) < 0 \end{cases}$$

Результати імітаційного моделювання показали, що якщо у процесі декодування змін знака у значеннях $L_a^{d,j}(x_t^C)$ й $L_e^{d,j}(x_t^C)$, де d – поточний декодер ТК, $d \in \overline{1,2}$, ітерації j не відбувається, то після кожного наступного декодера значення ЛВФП про переданий біт будуть або зменшуватися (якщо був переданий біт «0»), або збільшуватися (якщо був переданий біт «1»). Після виконання заданої кількості ітерацій декодування виносяться «тверде» рішення про декодований біт. Може виникнути ситуація (внаслідок великого значення дисперсії шуму в каналі), що після виконання процедур ітеративного декодування всіма декодерами кількість змін знака значень апіорної $L_a^{d,j}(x_t^C)$ й апо-

стеріорної інформації $L_e^{d,j}(x_t^C)$ на останньому декодері останньої ітерації не дорівнює нулю. Подібні ситуації приводять до виникнення помилок декодування.

Розглянутий вище показник ризику (невизначеності) R будемо використовувати для оцінювання якості процесу декодування в умовах впливу навмисних завад. При обчисленні значення показника ризику будемо враховувати зміни знака значень апіорної $L_a^{2,j}(x_t^C)$ й апостеріорної інформації $L_e^{2,j}(x_t^C)$ декодера 2 ітерації $j, j \in \overline{1, I}$, у процесі декодування всього блоку даних розміром N .

Насправді існують три події про прийняття рішень при декодуванні декодером $d, d \in \overline{1, 2}$, ітерації декодування $j, j \in \overline{1, I}$ біта інформації:

1) подія A_1 . Змін знака у значеннях $L_a^{d,j}(x_t^C)$ й $L_e^{d,j}(x_t^C)$ ітерації j не відбувається ($\text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) = \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C))$), $L(x_t^C) \geq 0$. Прийняте «тверде» рішення, що був переданий біт $x_t^C = 1$;

2) подія A_2 . Змін знака у значеннях $L_a^{d,j}(x_t^C)$ й $L_e^{d,j}(x_t^C)$ ітерації j не відбувається ($\text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) = \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C))$), $L(x_t^C) < 0$. Прийняте «тверде» рішення, що був переданий біт $x_t^C = 0$.

3) подія A_3 . Знак значення апіорної $L_a^{d,j}(x_t^C)$ й знак значення апостеріорної інформації $L_e^{d,j}(x_t^C)$ ітерації j не дорівнює нуля ($\text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) \neq \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C))$). Можуть виникнути помилки декодування.

Показник ризику для декодера $d, d \in \overline{1, 2}$, ітерації декодування $j, j \in \overline{1, I}$, обчислюється за допомогою такої процедури:

$$\sum_{d=1}^2 R^{d,j}(t+1) = R^{d,j}(t) + 1,$$

якщо $\text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) \neq \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C))$, $t \in \overline{1, N}$. (5)

Чим частіше збільшуються значення показника ризику R , тим частіше з'являються неправильно декодовані біти, що приводить до погіршення достовірності прийому інформації.

Сумарний показник ризику R_Σ визначається сумою показників ризику для всіх ітерацій декодування:

$$R_\Sigma = \sum_{j=1}^I R^{d,j}. \quad (6)$$

При параметричній адаптації будемо виконувати послідовно два алгоритми: перший алгоритм – для розрахунку показника ризику для декодера $d, d \in \overline{1, 2}$, ітерації декодування $j, j \in \overline{1, I}$, другий – для адаптивного вибору параметрів турбокоду.

Алгоритм 1.

Формування матриці апіорних значень функцій правдоподібності про передані біти LA розміру $1 \times N$ для всіх декодерів $d, d \in \overline{1, 2}$, всіх ітерацій декодування $j, j \in \overline{1, I}$.

$$LA = [L_a^{d,j}(x_1^C) \quad L_a^{d,j}(x_2^C) \quad \dots \quad L_a^{d,j}(x_N^C)]. \quad (7)$$

Розрахунок $L^{d,j}(x_t^C)$, $t \in \overline{1, N}$ для всіх біт блоку довжиною N , всіх декодерів $d, d \in \overline{1, 2}$, всіх ітерацій декодування $j, j \in \overline{1, I}$.

Формування матриці L розміру $1 \times N$ для всіх декодерів d , $d \in \overline{1,2}$, всіх ітерацій декодування j , $j \in \overline{1,I}$.

$$L = [L^{d,j}(x_1^C) \quad L^{d,j}(x_2^C) \quad \dots \quad L^{d,j}(x_N^C)]. \quad (8)$$

Обчислення $L_e^{d,j}(x_t^C)$, $t \in \overline{1,N}$ для всіх біт блоку довжиною N , всіх декодерів d , $d \in \overline{1,2}$, всіх ітерацій декодування j , $j \in \overline{1,I}$.

Формування матриці апостеріорних значень функцій правдоподібності про передані біти LE розміру $1 \times N$ для всіх декодерів d , $d \in \overline{1,2}$, всіх ітерацій декодування j , $j \in \overline{1,I}$.

$$LE = [L_e^{d,j}(x_1^C) \quad L_e^{d,j}(x_2^C) \quad \dots \quad L_e^{d,j}(x_N^C)]. \quad (9)$$

Формування матриці L^* розміру $1 \times N$ для всіх декодерів d , $d \in \overline{1,2}$, всіх ітерацій декодування j , $j \in \overline{1,I}$.

$$L^* = [L_a^{d,j}(x_1^C)L_e^{d,j}(x_1^C) \quad L_a^{d,j}(x_2^C)L_e^{d,j}(x_2^C) \quad \dots \quad L_a^{d,j}(x_N^C)L_e^{d,j}(x_N^C)]. \quad (10)$$

Виконання циклу: якщо $\text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) \neq \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C))$, то $R^{d,j}(i+1) = R^{d,j}(i) + 1$, $R_\Sigma = \sum_{j=1}^I \sum_{d=1}^2 R^{d,j}$, $t \in \overline{1,N}$ для всіх біт блоку довжиною N , всіх декодерів d , $d \in \overline{1,2}$, всіх ітерацій декодування j , $j \in \overline{1,I}$.

Далі розглянемо алгоритм 2. Сутність алгоритму 2 полягає у виборі параметрів турбокоду залежно від накоплених значень ризиків декодування n блоків даних.

Нехай U – множина можливих рішень вибору параметрів турбокоду. Множина U складається з елементів u_1, u_2, \dots, u_n , а рішення полягає у виборі за наявною інформацією (даним спостереження x) однієї з можливих альтернатив u_j , $j = 1, 2, \dots, n$. Тобто рішення u_j є функцією від x – $u_j(x)$. Розглянемо багатокроковий процес отримання нової інформації x і ухвалення рішень u вибору параметрів турбокоду. На кожному n -му кроці ми отримуємо деяку сукупність даних спостереження x_n (ця сукупність може мати довільну природу – x_n може бути скалярною величиною, вектором і т. д.), яка залежить від параметрів стану об'єкта управління λ_n , що характеризують ситуацію або стан системи і таких, що впливають на наслідки рішень, які приймаються. Як дані спостереження x_n розглядається множина сумарних ризиків R_Σ для n блоків даних. Використовуючи знову отримані і наявні раніше спостереження x_n, x_{n-1}, \dots , ми приймаємо рішення u_n , яке залежить і від раніше прийнятих рішень u_{n-1}, u_{n-2}, \dots . Якщо $n = 1, 2, \dots, N$, то повні сукупності даних спостереження x , рішень u і параметрів λ можуть бути описані векторами

$$x = X_N = \{x_1, \dots, x_N\}; u = U_N = \{u_1, \dots, u_N\}; \lambda = \Lambda_N = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}, \quad (11)$$

а їх сукупності для будь-якого числа кроків

$$X_n = \{x_1, \dots, x_n\}; U_n = \{u_1, \dots, u_n\}; \Lambda_n = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}. \quad (12)$$

Повний статистичний опис багатокрокового процесу прийняття рішень вибору параметрів турбокоду для будь-якої сукупності рішень u_1, u_2, \dots , що приймаються, досягається завданням послідовності умовних розподілів ймовірності (для визначеності щільності ймовірності) для спостережуваних даних $x_n - p_n(x_n | \Lambda_n, X_{n-1}, U_{n-1})$ і параметрів $\lambda_n - p_n(\lambda_{n-1} | \Lambda_n, U_{n-1})$ для усіх значень $n = 1, 2, \dots, N$.

При виборі рішення u_n можна використати тільки ті спостереження, які отримані до n -го кроку включно, тобто $\{x_1, \dots, x_n\} = X_n$. Тому правило ухвалення рішення u_n вибору параметрів турбокоду в загальному випадку задається ймовірнісною мірою з щільністю

$$\varphi_n = \varphi_n(u_n | X_n, U_{n-1}), \tag{13}$$

залежною від X_n і від сукупності попередніх рішень $\{u_1, \dots, u_{n-1}\} = U_{n-1}$.

Знаходження оптимальної послідовності рішень для багатокрокової процедури або оптимального правила прийняття цієї послідовності рішень вибору параметрів турбокоду виконується методами динамічного програмування в їх загальній стохастичній формі [15], які за певних обмежень на введені вище умовні розподіли ймовірності для λ_n і x_n і функцію втрат $g(u, \lambda, x) = g(U_n, \Lambda_n, X_n)$ (під функцією витрат розуміється величина сумарного ризику R_Σ , отримана при декодуванні блоку довжиною N) призводять до ефективно обчислювальної процедури знаходження оптимальних рішень вибору параметрів турбокоду. При цьому, як і у будь-якій басівській задачі, оптимальне правило рішення виходить нерандомізованим і визначається системою рекурентних співвідношень, що містить послідовність мінімізацій і усереднювань для величин апостеріорних ризиків.

Для отримання цих рекурентних співвідношень розглянемо вираз для середнього ризику

$$R(\varphi) = R(\Phi_N) = M\{g(U_n, \Lambda_n, X_n)\}, \tag{14}$$

де $\Phi_N = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N\}$ – сукупність щільностей $\varphi_n = \varphi_n(u_n | X_n, U_{n-1})$, кожна з яких задає правило прийняття рішення на n -му кроці.

Нехай оптимальному правилу прийняття рішення вибору фактора управління параметрами турбокоду відповідає сукупність Φ_{N0} . Тоді мінімальний (басів) середній ризик

$$\begin{aligned} R(\Phi_{N0}) &= \min_{(\Phi_N)} M\{g(U_N, \Lambda_N, X_N)\} = \\ &= \min_{(\varphi_1, \dots, \varphi_{N-1}, \varphi_N)} M\{g(U_N, \Lambda_N, X_N)\} = \\ &= \min_{(\varphi_1, \dots, \varphi_{N-1})} \left[\min_{(\varphi_N)} M\{g(U_N, \Lambda_N, X_N)\} \right] = \\ &= \min_{(\varphi_1, \dots, \varphi_{N-1})} \left[\min_{(\varphi_N)} M\{M\{g(U_N, \Lambda_N, X_N) | X_N, U_N\}\} \right]. \end{aligned} \tag{15}$$

Остання рівність у вираженні (15) відбиває той факт, що математичне очікування можна обчислювати послідовно: спочатку по частині випадкових змінних, від яких залежить функція втрат, а потім – по усіх інших.

Умовне математичне очікування в (15)

$$R_v(U_N, X_N) = M\{g(U_N, \Lambda_N, X_N) | X_N, U_N\} \tag{16}$$

є функцією апостеріорного ризику для сукупності рішень $U_N = \{u_1, \dots, u_N\}$ і даних спостереження $X_N = \{x_1, \dots, x_N\}$. Враховуючи (16) математичне очікування функції втрат

$$\begin{aligned} M\{g(U_N, \Lambda_N, X_N)\} &= M\{R_N(U_N, X_N)\} = \\ &= M\{M\{R_N(U_N, X_N | X_N, U_{N-1})\}\} = \\ &= M\left\{\int R_N(U_N, X_N) \varphi_N(u_N | X_N, U_{N-1}) du_N\right\}, \end{aligned} \tag{17}$$

звідки витікає, що вираз у квадратних дужках в (15) може бути записаний у вигляді

$$\begin{aligned}
& \min_{(\phi_N)} M \left\{ M \left\{ g(U_N, \Lambda_N, X_N) \mid X_N, U_N \right\} \right\} = \\
& = \min_{(\phi_N)} M \left\{ \int R_N(U_N, X_N) \phi_N(u_N \mid X_N, U_{N-1}) du_N \right\} = \\
& = M \left\{ \min_{(\phi_N)} \int R_N(U_N, X_N) \phi_N(u_N \mid X_N, U_{N-1}) du_N \right\} = \\
& = M \left\{ \min_{(\phi_N)} \int R_N(U_N, X_N) \right\},
\end{aligned} \tag{18}$$

оскільки мінімум інтеграла

$$\int R_N(U_N, X_N) \phi_N(u_N \mid X_N, U_{N-1}) dU_N$$

досягається для функції

$$\phi_N = \phi_{N0} = \phi_{N0}(u_N \mid X_N, U_{N-1}) = \delta(u_N - u_{N0}(X_N)), \tag{19}$$

де $u_{N0}(X_N)$ – значення u_N , залежне від X_N , при якому досягається мінімум підінтегрального виразу $R_N(U_N, X_N)$. Це значення і визначає оптимальне баєсове (нерандомізоване) правило рішення на N -му кроці і знаходиться з умови

$$R_N(U_{N0}(X_N), U_{N-1}, X_N) = \min_{(u_N)} R_N(U_N, X_N) = \tilde{R}_N(U_{N-1}, X_N), \tag{20}$$

де

$$\begin{aligned}
\tilde{R}_N(U_{N-1}, X_N) &= \min_{(u_N)} R_N(U_N, X_N) = \min_{(u_N)} M \left\{ g(U_N, \Lambda_N, X_N) \mid X_N, U_N \right\} = \\
&= \min_{(u_N)} \int g(U_N, \Lambda_N, X_N) p(\Lambda_N \mid X_N, U_{N-1}) d\Lambda_N
\end{aligned} \tag{21}$$

– апостеріорний ризик, мінімізований вибором u_N на останньому кроці, $p(\Lambda_N \mid X_N, U_{N-1})$ – апостеріорна щільність ймовірності сукупності параметрів $\Lambda_N = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$. Остання фактично залежить тільки від X_N і $U_{N-1} = \{u_1, \dots, u_{N-1}\}$.

Залежно від порівняння накоплених значень ризиків декодування n блоків даних $R(\Phi_{N0})$ з заданими значеннями $R(\Phi_{N0})_{\text{зад}}$ здійснюється вибір параметрів турбокоду (поліномів рекурсивних систематичних згорткових кодів $(1, g_1/g_0)$, алгоритмів перекодування (регулярні або псевдовипадкові), кількості біт у блоці N , швидкості кодування турбокоду R , алгоритмів декодування (Map, Max Log Map, Log Map), кількості ітерацій декодування I). Задані значення $R(\Phi_{N0})_{\text{зад}}$ отримуються завдяки проведенню статистичного імітаційного моделювання системи з турбокодами в умовах впливу флуктуаційного шуму та навмисних завад для заданих значень середньої ймовірності бітової помилки декодування $P_{\text{дек}}$.

Для оцінювання ефективності запропонованого методу параметричної адаптації турбокодів в умовах апріорної невизначеності, яка утворюється за умов впливу навмисних завад, було проведено імітаційне моделювання. Моделювалась система з запропонованим методом параметричної адаптації турбокодів та система, яка була запропонована в роботах [9–14]. Результати моделювання показали, що запропонований метод параметричної адаптації турбокодів в умовах апріорної невизначеності дозволяє підвищити показники достовірності передачі інформації.

Висновки і пропозиції. Запропоновано метод параметричної адаптації турбокодів за умов впливу навмисних завад, які призводять до виникнення невизначеності у процесі декодування турбокодів.

Сутність методу полягає в адаптивному виборі параметрів турбокоду з використанням апіорної та апостеріорної інформації декодера турбокоду за рахунок мінімізації середнього ризику.

Запропоновані результати можна використати для підвищення достовірності систем передачі інформації, які функціонують в умовах впливу потужних навмисних завад.

Список використаних джерел

1. *Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты* / [Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е. и др.]. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
2. *Berrou C. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes* / C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima // Proc. Int. Conf. On Commun., May 1993. – 1993. – P. 1064–1070.
3. *Holma H. HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications* / H. Holma, A. Toskala. – John Wiley & Sons, 2006. – 268 p.
4. *Valenti M. The UMTS turbo code and an efficient decoder implementation suitable for software-defined radios* / M. Valenti, J. Sun // Int. Journal of Wireless Inf. Networks. – 2001. – Vol. 8, № 4. – P. 203–215.
5. *Consultative Committee for Space Data Systems “Recommendations for space data systems, telemetry channel coding”* // BLUE BOOK. – 1998. – May.
6. *3GPP TS 25.212. Multiplexing and Channel Coding (FDD)*. 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, March 2005.
7. *Digital Video Broadcasting (DVB): Interaction channel for satellite distribution systems (DVB-RCS)* // ETSI EN 301 790 V1.2. 1 (2000-07). – 2000. – February.
8. *Ergen M. Mobile Broadband. Including WiMax and LTE* / M. Ergen. – Springer, 2009. – 513 p.
9. *Zhenhuan W. Layered Adaptive Modulation and Coding For 4G Wireless Networks* / W. Zhenhuan // Thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Electrical and Computer Engineering. – Waterloo, Ontario, Canada, 2011. – 49 p.
10. *Jihoon K. A Simple SNR Representation Method for AMC Schemes of MIMO Systems with ML Detector* / K. Jihoon, L. Kyoung-Jae, S. Chang Kyung, L. Inkyu // IEEE Transactions on Communications, Vol. 57, No. 10, October 2009. – P. 2971–2976.
11. *Liang Huang J. Adaptive MIMO Systems with Channel State Information at Transmitter* / J. Liang Huang // PhD Thesis, KTH School of Information and Communication Technology, Stockholm, 2009. – 79 p.
12. *Goldsmith A. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels* / A. Goldsmith, S. Chua // IEEE Transactions on Communications, vol. 45, no.10, Oct. 1997. – P. 1218–1230.
13. *Alouini S. Adaptive Modulation over Nakagami Fading Channels* / S. Alouini, A. Goldsmith // Wireless Communications, vol. 13, no. 1-2, May 2000. – P. 119–143.
14. *Maaref A. Rate-adaptive M-QAM in MIMO diversity systems using space-time block codes* / A. Maaref, S. Aissa // in Proc. IEEE PIMRC 2004, vol. 4, Sep. 2004. – P. 2294–2298.
15. *Репин В. Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем* / В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский. – М.: Советское радио, 1977. – 432 с.
16. *Woodard J. Comparative Study of Turbo Decoding Techniques: An Overview* / J. Woodard, L. Hanzo // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2000. – Vol. 49, No. 6. – P. 2208–2232.