

О. П. Гребенюк, В. Д. Меленський, В. І. Коріненко

## **ЗАСТОСУВАННЯ ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ І ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ КОМПЛЕКСІВ РАДІОМОНІТОРИНГУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ**

*У статті запропоновано підхід до забезпечення достовірності в процесі обміну інформацією в системах зв'язку і передачі даних (СЗіПД) комплексів радіомоніторингу за рахунок використання завадостійкого кодування (ЗК).*

**Постановка проблеми.** На системи радіомоніторингу цивільного і військового призначення покладається виконання важливих завдань, основними з яких є:

- спостереження та контроль за частотним діапазоном;
- виявлення джерел радіовипромінювання (ДРВп);
- визначення їх місцеположення та ін.

Виконання цих завдань реалізується шляхом управління через СЗіПД.

На даний час однією з основних характеристик СЗіПД, що обумовлює їх ефективне функціонування в складі комплексів радіомоніторингу, є завадостійкість системи, яка забезпечує достовірність інформаційного обміну.

Відомо, що внаслідок дії завад різного походження у процесі передачі інформації по каналах зв'язку виникають помилки, які призводять до часткової або повної втрати інформації і, як наслідок, до зниження ефективності функціонування засобів та систем радіомоніторингу. Щодо засобів зв'язку, що здійснюють передачу інформації між елементами комплексів радіомоніторингу військового призначення, слід відзначити відсутність у більшості основних зразків спеціальних заходів завадозахисту. Особливої актуальності дана проблема набула під час проведення антитерористичної операції.

Таким чином, існує протиріччя, пов'язане з низьким рівнем завадозахищеності СЗіПД, які входять до складу комплексів радіомоніторингу, забезпечують їх функціонування в складній сучасній радіоелектронній обстановці (РЕО), та з необхідністю реалізації надійного зв'язку і достовірної передачі інформації.

Одним із методів підвищення достовірності приймання інформації є застосування ЗК.

**Огляд останніх досліджень та публікацій.** Вплив навмисних завад на завадозахищеність засобів радіозв'язку із ЗК досить повно досліджено в [1, 3]. Однак аналіз цих робіт показує, що розрахунки завадостійкості систем зв'язку (СЗ) та систем передачі інформації (СПІ) проведено тільки для сигналів з двійковою фазовою маніпуляцією. Можливості використання ЗК в СЗ та СПІ, а також критерії ефективності й шляхи підвищення ефективності СЗ та СПІ розглядаються в роботах [2, 4–11]. Проте у них відсутні розрахунки ефективності ЗК для передач на основі сигналів із частотною маніпуляцією (ЧМ) і ЗК.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є оцінювання можливості застосування ЗК у СЗіПД комплексів радіомоніторингу при використанні сигналів з фазовою та ЧМ для забезпечення достовірності при інформаційному обміні.

**Виклад основного матеріалу.** Для надійних умов функціонування системи радіомоніторингу та її складових створюється СЗіПД. СЗіПД – це сукупність взаємопов'язаних та узгоджених за завданнями, місцем і часом дій вузлів (центрів, пунктів, станцій) і ліній зв'язку, які розгортаються (створюються) за єдиним задумом і планом для забезпечення завдань управління. Слід відзначити, що СЗіПД при виконанні завдань радіомоніторингу використовують не тільки для передачі розпоряджень, команд та оперативної інформації, а також як невід'ємну частину засобів (комплексів) радіо- та радіотехнічного моніторингу. Так, наприклад, при визначенні місцеположення ДРВп СЗіПД на базі радіорелейної станції (РРС) Р-415В здійснюється управління елементами комплексу засобів синхронного пеленгування, яке полягає в синхронізації роботи пеленгаторів у процесі визначення пеленгів на ДРВп.

Для підвищення надійності та достовірності передачі інформації в каналах зв'язку РРС Р-415В в умовах впливу завад пропонується використовувати ЗК, що ґрунтується на введенні додаткових (перевірних) символів в інформаційну послідовність та дозволяє усувати помилки, які виникають у результаті дії завад на канал зв'язку.

Як ЗК запропоновано використовувати згорткові коди. Для перевірки ефективності згорткового декодування при різних відношеннях сигнал/шум на вході радіоприймального пристрою проведено оцінювання завадостійкості декодування згорткових кодів при використанні алгоритму декодування за критерієм максимуму правдоподібності (алгоритм Вітербі).

Оцінювання завадостійкості декодування згорткових кодів при використанні алгоритму декодування за критерієм максимуму правдоподібності полягає у визначенні ймовірності помилки (появи помилкового біта) на виході декодера та розраховується за формулою

$$P_D = \sum_{k=d_f}^{\infty} w_k P_k, \quad (1)$$

де  $P_k$  – імовірність помилки у виборі шляху за решіткою коду;

$w_k$  – спектр ваг помилкового шляху;

$d_f$  – вільна віддаль згорткового коду [1].

При розрахунках використані значення вагового коефіцієнта  $w_k$ , що наведені у джерелі [1].

Значення ймовірності помилки у виборі шляху за решіткою коду  $P_k$  обчислюється за виразом

$$P_k = Q\left(\sqrt{kR_{код} \frac{E_b}{N_0}}\right), \quad (2)$$

де  $k$  – кількість інформаційних символів;

$R_{код}$  – швидкість коду;

$\frac{E_b}{N_0}$  – відношення енергії сигналу, що витрачається на передавання біта  $E_b$ , до спектральної щільності потужності шуму  $N_0$  на вході демодулятора;

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \text{ – гауссова } Q\text{-функція (інтеграл імовірності) [1].}$$

Для практичних розрахунків використовують апроксимацію такого вигляду:

$$Q(z) = 0,65 \exp\left[-0,44(z + 0,75)^2\right]. \quad (3)$$

Для сигналів з двійковою фазовою модуляцією (ФМ-2) із згортковим кодуванням розрахунок імовірності появи помилкового біта на виході декодера буде здійснюватись за (4), який відрізняється від (1) наявністю коефіцієнта 2 під коренем [2]:

$$P_k = Q\left(\sqrt{2kR_{\text{код}} \frac{E_b}{N_0}}\right). \quad (4)$$

Обчислення за (1), (4) показують, що в сумі (1) при великих відношеннях сигнал/шум перший член (при  $k = d_f$ ) має найбільше значення, а інші члени суми зі зростанням  $k$  швидко спадають, тому для розрахунку ймовірності появи помилкового біта на виході демодулятора  $P_D$  використовується спрощений вираз [1]:

$$P_D = w_{d_f} Q\left(\sqrt{2d_f R_{\text{код}} \frac{E_b}{N_0}}\right). \quad (5)$$

Для визначення ймовірності появи помилкового біта на виході декодера для сигналів ФМ-2 (без ЗК) використаємо (4). При цьому необхідно враховувати, що  $k = 1$  та  $R_{\text{код}} = 1$ . У результаті отримуємо формулу [1, 2]:

$$P_{\text{ФМ-2}} = Q\left(\sqrt{2 \frac{E_b}{N_0}}\right). \quad (6)$$

З метою порівняльного оцінювання ймовірності виникнення помилки для сигналів ФМ-2, ЧМ-2 із ЗК було обрано згорткові коди вигляду:

- 1) код (5, 7),  $R_{\text{код}} = 1/2$ ,  $d_f = 5$ ,  $v = 2$ ;
- 2) код (133, 171),  $R_{\text{код}} = 1/2$ ,  $d_f = 10$ ,  $v = 6$ .

Для сигналів виду ФМ-2 результати розрахунків та графічні залежності наведено в табл. 1 та показано на рис. 1 (криві 1, 2, 3). Табл. 1 містить значення аргументу  $z$  функції  $Q(z)$ , які використовуються при розрахунках, та розраховані значення ймовірності виникнення помилки для сигналів ФМ-2 із використанням ЗК та без нього.

Розрахунок імовірності появи помилки від відношення сигнал/шум для ФМ-2

$E_b/N_0$ , дБ	Імовірність помилки біта на виході демодулятора		Імовірність помилки біта на виході декодера	
	ФМ-2		ФМ-2 <sub>ЗК</sub>	
	$z$	$P_{\text{ФМ-2}}$	$P_{\text{ФМ-2(5,7)}}$	$P_{\text{ФМ-2(133,171)}}$
2	1,780	0,039	$2,422 \cdot 10^{-3}$	$1,236 \cdot 10^{-3}$
3	1,998	0,023	$7,829 \cdot 10^{-4}$	$1,474 \cdot 10^{-4}$
4	2,241	0,013	$1,948 \cdot 10^{-4}$	$1,060 \cdot 10^{-5}$
5	2,515	$5,971 \cdot 10^{-3}$	$3,502 \cdot 10^{-5}$	$4,047 \cdot 10^{-7}$
6	2,822	$2,372 \cdot 10^{-3}$	$4,197 \cdot 10^{-6}$	$7,011 \cdot 10^{-9}$
7	3,166	$7,630 \cdot 10^{-4}$	$3,034 \cdot 10^{-7}$	$4,522 \cdot 10^{-11}$
8	3,552	$1,887 \cdot 10^{-4}$	$1,167 \cdot 10^{-8}$	$8,472 \cdot 10^{-14}$
9	3,986	$3,367 \cdot 10^{-5}$	$2,040 \cdot 10^{-10}$	
10	4,472	$3,997 \cdot 10^{-6}$	$1,331 \cdot 10^{-12}$	

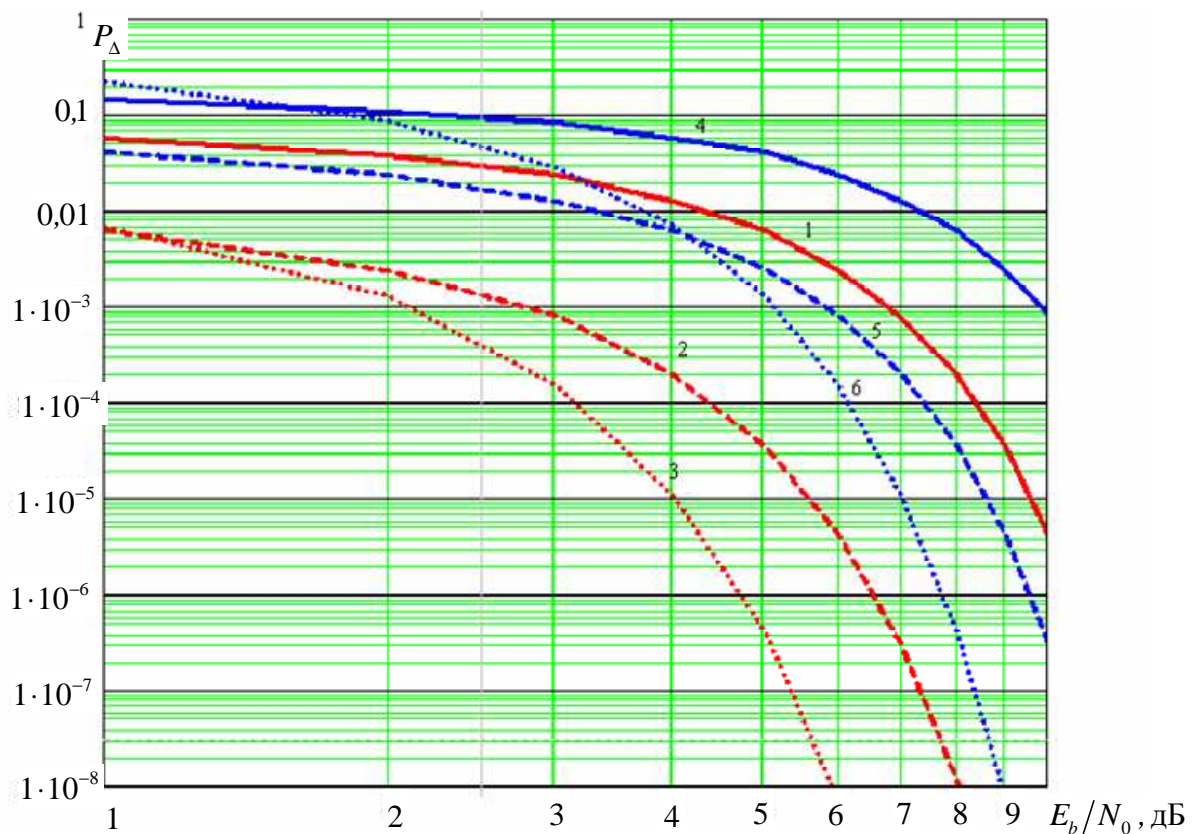


Рис. 1. Графік залежності ймовірності помилки від відношення сигнал/шум для сигналів ФМ-2 та ЧМ-2

На рис. 1 зображено залежність імовірності появи помилкового біта на виході декодера від відношення сигнал/шум. Цифрою 1 позначено сигнал двійкової фазової модуляції (ФМ-2) без ЗК, цифрою 2 – сигнал ФМ-2 із згортковим кодом (5, 7), цифрою 3 – сигнал ФМ-2 із згортковим кодом (133, 171). Цифрою 4 позначено ЧМ-2 сигнал без ЗК,

цифрою 5 – сигнал ЧМ-2 із згортковим кодом (5, 7), цифрою 6 – сигнал ЧМ-2 із згортковим кодом (133, 171).

У табл. 2 наведено результати оцінювання ймовірності помилки при різних відношеннях сигнал/шум ( $E_b/N_0=5; 8$ ). При відношенні сигнал/шум  $E_b/N_0 = 5$  різниця між значеннями ймовірності появи помилки для сигналу ФМ-2 без кодування та ФМ-2 із ЗК (5, 7) становить  $P_{\Delta[\text{ФМ-2}+3\text{К}(5,7)]} = |P_{\text{ФМ-2}} - P_{\text{ФМ-2}(5,7)}| = 10^{-2}$ , а для ФМ-2 із ЗК (133, 171) –  $P_{\Delta[\text{ФМ-2}+3\text{К}(133,171)]} = |P_{\text{ФМ-2}} - P_{\text{ФМ-2}(133,171)}| = 10^{-4}$ .

Таблиця 2

Результати оцінювання виграшу з імовірності помилки сигналів ФМ-2 із ЗК щодо ФМ-2 без ЗК

Тип сигналу	$P_{\Delta}$ при ( $E_b/N_0 = 5$ )	$P_{\Delta}$ при ( $E_b/N_0 = 8$ )
ФМ-2 + код (5, 7)	$10^{-2}$	$10^{-4}$
ФМ-2 + код (133, 171)	$10^{-4}$	$10^{-10}$

При  $E_b/N_0 = 8$   $P_{\Delta[\text{ФМ-2}+3\text{К}(5,7)]} = |P_{\text{ФМ-2}} - P_{\text{ФМ-2}(5,7)}| = 10^{-4}$ , а  $P_{\Delta[\text{ФМ-2}+3\text{К}(133,171)]} = |P_{\text{ФМ-2}} - P_{\text{ФМ-2}(133,171)}| = 10^{-10}$ . На рис. 1 зображено залежність імовірності появи помилкового біта на виході декодера від відношення сигнал/шум.

Для визначення ймовірності появи помилкового біта на виході декодера для сигналів ЧМ-2 використано (2), при цьому  $k = 1$  та  $R_{\text{код}} = 1$ . У результаті отримано вираз [2]:

$$P_{\text{ЧМ-2}} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right). \quad (7)$$

Якщо для сигналів ЧМ застосувати згорткове кодування, то розрахунок імовірності появи помилкового біта на виході декодера буде здійснюватись за (1).

З урахуванням (1) та (2) імовірність появи помилкового біта на виході демодулятора  $P_d$  при використанні каналу з ЧМ-2 буде розраховуватись за формулою:

$$P_{d(\text{ЧМ-2})} = w_d Q\left(\sqrt{kR_{\text{код}} \frac{E_b}{N_0}}\right). \quad (8)$$

Результати розрахунків наведено в табл. 3 та зображено на рис. 1 (криві 4, 5, 6). У табл. 3 наведено значення ймовірності виникнення помилки для сигналів ЧМ-2 із використанням ЗК та без нього.

У табл. 4 подано результати оцінювання ймовірності помилки при різних відношеннях сигнал/шум ( $E_b/N_0 = 5; 8$ ). При відношенні сигнал/шум  $E_b/N_0 = 5$  різниця між значеннями ймовірності появи помилки для сигналу ЧМ-2 без кодування та ЧМ-2 із ЗК вигляду (5, 7) становить  $P_{\Delta[\text{ЧМ}+3\text{К}(5,7)]} = |P_{\text{ЧМ}} - P_{\text{ЧМ}(5,7)}| = 10^{-1}$ , а для ЧМ-2 із ЗК вигляду (133, 171) –  $P_{\Delta[\text{ЧМ}+3\text{К}(133,171)]} = |P_{\text{ЧМ}} - P_{\text{ЧМ}(133,171)}| = 10^{-1}$ .

Таблиця 3

Розрахунок імовірності появи помилки від відношення сигнал/шум для ЧМ-2

$E_b/N_0$ , дБ	Імовірність помилки біта на виході демодулятора		Імовірність помилки біта на виході декодера	
	ЧМ-2		ЧМ-2ЗК	
	$z$	$P_{\text{ЧМ-2}}$	$P_{\text{ЧМ-2}(5,7)}$	$P_{\text{ЧМ-2}(133,171)}$
2	1,259	0,110	0,024	0,087
3	1,413	0,083	0,013	0,028
4	1,585	0,059	$6,126 \cdot 10^{-3}$	$7,014 \cdot 10^{-3}$
5	1,778	0,039	$2,448 \cdot 10^{-3}$	$1,261 \cdot 10^{-3}$
6	1,995	0,024	$7,931 \cdot 10^{-4}$	$1,511 \cdot 10^{-4}$
7	2,239	0,013	$1,979 \cdot 10^{-4}$	$1,092 \cdot 10^{-5}$
8	2,512	$6,022 \cdot 10^{-3}$	$3,571 \cdot 10^{-5}$	$4,201 \cdot 10^{-7}$
9	2,818	$2,397 \cdot 10^{-3}$	$4,299 \cdot 10^{-6}$	$7,344 \cdot 10^{-9}$
10	3,162	$7,729 \cdot 10^{-4}$	$3,126 \cdot 10^{-7}$	$4,791 \cdot 10^{-11}$

Таблиця 4

Результати оцінювання виграшу з імовірності помилки сигналів ЧМ-2 із ЗК щодо ЧМ-2 без ЗК

Тип сигналу	$P_{\Delta}$ при ( $E_b/N_0 = 5$ )	$P_{\Delta}$ при ( $E_b/N_0 = 8$ )
ЧМ-2 + код (5, 7)	$10^{-1}$	$10^{-2}$
ЧМ-2 + код (133, 171)	$10^{-1}$	$10^{-4}$

При  $E_b/N_0 = 8$   $P_{\Delta[\text{ЧМ+ЗК}(5,7)]} = |P_{\text{ЧМ}} - P_{\text{ЧМ}(5,7)}| = 10^{-2}$ , а  $P_{\Delta[\text{ЧМ+ЗК}(133,171)]} = |P_{\text{ЧМ}} - P_{\text{ЧМ}(133,171)}| = 10^{-4}$ .

**Висновки.** У статті запропоновано підхід до покращення заводо захищеності СЗіПД комплексів радіомоніторингу за рахунок використання ЗК. Досліджено заводостійкість декодування згорткових кодів при використанні алгоритму декодування за критерієм максимуму правдоподібності для передач на основі сигналів із частотною і фазовою маніпуляцією. Отримані результати свідчать, що найменший рівень імовірності помилки забезпечує сигнал виду ФМ-2 із ЗК (133, 171),  $P_{\text{ФМ-2}(133,171)} = 8,472 \cdot 10^{-14}$  при  $E_b/N_0 = 8$ , у той час, коли найкращий результат для ЧМ-2 сигналів із ЗК (133, 171) становить  $P_{\text{ЧМ-2}(133,171)} = 4,201 \cdot 10^{-7}$ .

Використання ЗК у СЗіПД на основі РРС Р-415В у складі комплексу засобів синхронного пеленгування та комплексів радіотехнічного моніторингу дозволить покращити заводостійкість, забезпечить достовірність інформаційного обміну в складній РЕО при дії пасивних та активних завод.

У подальшому заслуговує на увагу дослідження питань щодо спільного застосування декількох способів заводо захищеності, наприклад просторової селекції, ЗК інформації, реалізації СЗіПД на основі технології МІМО.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Банкет В. Л. Завадостійке кодування в телекомунікаційних системах / В. Л. Банкет, П. В. Иващенко, М. О. Іщенко. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2011. – 100 с.
2. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Склад. – [2-е изд., испр.] : пер. с англ. – М. : Изд. дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.
3. Банкет В. Л. Цифровые методы передачи информации в спутниковых системах связи / В. Л. Банкет, П. В. Иващенко, А. Э. Геер. – Одесса : УГАС, 1996. – 180 с.
4. Кузьмин Н. В. Основы теории информации и кодирования / Н. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. – К. : Вища школа, 1986. – 238 с.
5. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А. Г. Зюко, А. И. Фалько, И. П. Панфилов и др. ; под ред. А. Г. Зюко. – М. : Радио и связь, 1985. – 282 с.
6. Теория передачи сигналов : учебник для вузов / А. Г. Зюко и др. – М. : Радио и связь, 1986. – 304 с.
7. Панфілов І. П. Теорія електричного зв'язку : [підручник для студентів вузів І та ІІ рівнів акредитації] / І. П. Панфілов, В. Ю. Дирда, А. В. Капацін. – К. : Техніка, 1998. – 328 с.
8. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки / Блейхут Р. ; пер. с англ. – М. : Мир, 1986. – 576 с.
9. Банкет В. Л. Сверточные коды в системах передачи информации : учеб. пособ. / В. Л. Банкет. – Одесса : ОЭИС, 1986. – 57 с.
10. Теория электрической связи : учебник для вузов / [А. Г. Зюко и др.] ; под ред. Д. Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 1998. – 432 с.
11. Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Кларк Дж. мл., Кейн Дж. ; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1987. – 392 с.

Подано 30.04.2015

**О. П. Гребенюк, В. Д. Меленский, В. И. Кориненко**

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ КОМПЛЕКСОВ РАДИОМОНИТОРИНГА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА**

*В статье предложен подход по обеспечению достоверности в процессе обмена информацией в системах связи и передачи данных комплексов радиомониторинга с помощью помехоустойчивого кодирования.*

**O. P. Grebenyuk, V. D. Melensky, V. I. Korinenko**

**USE OF ERROR-CORRECTING CODING IN COMMUNICATION SYSTEMS FOR RADIO MONITORING SYSTEMS TO ENSURE THE NOISE IMMUNITY OF INFORMATION CHANNELS**

*This paper proposes an approach to provide immunity systems and data communications systems by radio monitoring using error-correcting coding.*