

УДК 621.39:519.725

DOI: 10.31673/2412-9070.2021.044651

Г. О. ДУДАРЄВА, аспірант;

О. О. ГРИЩЕНКО, аспірант;

О. І. ГОЛУБЕНКО, канд. техн. наук;

Н. В. РУДЕНКО, канд. техн. наук,

Державний університет телекомунікацій, Київ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ КАНАЛЬНОГО КОДУВАННЯ В БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖАХ

Сьогодні дедалі більшого розвитку набувають безпроводові мережі зв'язку. Поширення цих мереж пояснюється зручністю їх використання, дешевизною та прийнятною пропускну здатністю. Водночас для ефективного передавання інформації потрібно отримувати безпомилкові дані, які зазвичай спотворюються під час передавання їх по каналах безпроводового зв'язку. Найчастіше на якість передавання даних впливають такі фактори, як дисперсійний ефект, замирання, загасання, завади, шум у каналі тощо. Тому для уникнення помилок під час приймання інформації застосовуються методи каналного кодування, основним завданням яких є пошук кодів, котрі швидко передаються і можуть виправляти або виявляти помилки.

Метою цієї статті є порівняння та аналіз коефіцієнта бітових помилок (далі BER) під час застосування різних методів каналного кодування. При цьому кількість бітів, що передається, є майже однаковою для різних методів каналного кодування.

Ключові слова: двійковий файл Бернуллі; методи кодування каналів; AWGN; аналіз BER.

ВСТУП

З розвитком сучасних інформаційних технологій швидкість передавання інформації в системах зв'язку істотно збільшується. Це зумовлює використання каналів зв'язку з більш широкою смугою пропускання. Підвищення пропускну здатності в телекомунікаційних мережах є досить нагальною проблемою, тому передавання даних із використанням більш високої пропускну здатності не завжди є доцільним. Водночас використання високошвидкісного передавання даних в обмеженій смузі пропускання частот призводить до збільшення ймовірності передавання помилкових бітів. При цьому втрати пакетів даних через перевантаження каналу, помилки або інші проблеми, які виникають під час передавання інформації, спричиняють значні спотворення інформації. Тому в системах зв'язку широко використовують ефективні методи кодування інформації для передавання її по каналах із замираннями. Це спонукає дослідників до визначення відповідних аналітичних методів оцінювання ефективності методів кодування, не вдаючись до громіздкого моделювання. Критерієм ефективності методів кодування інформації зазвичай вважається коефіцієнт бітових помилок BER, які виникають під час передавання даних по каналах безпроводового зв'язку. Задля зменшення частоти передавання помилкових бітів у цій статті розглянуто різні методи каналного кодування та ефективність їх застосування.

Існують два методи каналного кодування: ARQ (автоматичний запит повторного передавання) та FEC (пряме виправлення помилок).

Метод ARQ — це метод виявлення помилок під час передавання даних, який використовує сигнал підтвердження приймання. Якщо відправник даних до закінчення тайм-ауту не отримує підтвердження, то зазвичай повторно передає пакет даних доти, поки відправник не отримає підтвердження, чи не буде перевищено задану кількість повторного передавання.

Метод FEC — це метод добавлення в повідомлення надлишкових даних для можливості відновлення одержувачем вірогідної інформації навіть за великої кількості помилок, що виникають під час передавання.

Найчастіше в системах цифрового зв'язку використовується метод прямого виправлення помилок, перевага якого полягає в уникненні повторного передавання даних, вартість якого загалом може бути вищою за вимоги до пропускну здатності. У різних каналах передавання на приймальному боці приймаються сигнали з різною потужністю та часовою затримкою внаслідок ефектів відбиття, дифракції та розсіювання. Частота передавання помилкових бітів у безпроводовому середовищі є досить високою, через що інформація іноді втрачається. Тож параметр частоти передавання помилкових бітів є ключовим параметром для безпроводового зв'язку і використовується для оцінювання системи, яка передає дані з одного місця до іншого.

На BER найбільше впливає відношення усередненої потужності світлового сигналу до рівня шумів (SNR). Частота передавання помилкових бітів є обернено пропорційною до відношення сигнал/шум. Тому зі збільшенням SNR коефіцієнт бітових помилок зменшується.

© Г. О. Дударєва, О. О. Грищенко, О. І. Голубенко, Н. В. Руденко, 2021

Існують два параметри, що впливають на SNR:

- функція помилки E_b ;
- спектральна густина потужності шуму N_0 .

Під час передавання цифрових даних сигнал уражається шумом у середовищі передавання і спричиняє спотворення даних. Зв'язок між сигналом і шумом описується відношенням сигнал/шум. Водночас відношення сигнал/шум характеризує відношення потужності сигналу до потужності шуму. При цьому критерій якості передавання даних зазвичай визначається параметром BER. Для дослідження завадостійкості різних методів каналного кодування на основі визначення параметра BER реалізовано чотири імітаційних моделі передавання дискретної інформації в програмному середовищі SIMULINK, а саме:

- 1) імітаційну модель передавання дискретної інформації без застосування кодування;
- 2) імітаційну модель передавання дискретної інформації із застосуванням коду Геммінга;
- 3) імітаційну модель передавання дискретної інформації із застосуванням коду Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема (далі БЧХ, англ. BCH);
- 4) імітаційну модель передавання дискретної інформації із застосуванням коду Ріда-Соломона (далі РС).

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Реалізація імітаційної моделі передавання дискретної інформації без застосування методів каналного кодування

Структурну схему цієї моделі наведено на рис. 1

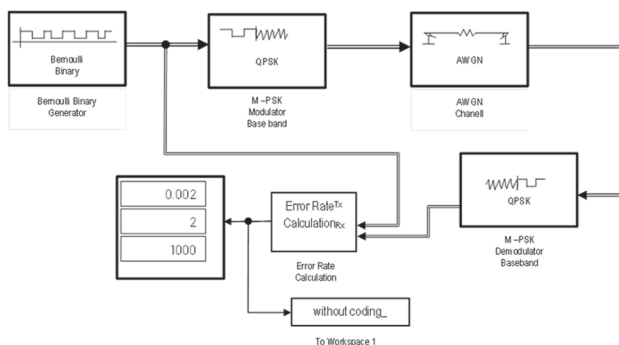


Рис. 1. Структурна схема моделі передавання дискретної інформації без застосування методів каналного кодування

Модель зв'язку, зображена на рис. 1, містить такі блоки:

- ♦ генератор двійкових кодів Бернуллі (Bernoulli Binary Generator);
- ♦ модулятор вузькосмугових сигналів M-PSK;
- ♦ канал з адитивним білим гауссовим шумом;
- ♦ демодулятор вузькосмугових сигналів M-PSK;
- ♦ блок розрахунку частоти помилок;
- ♦ дисплей.

Генератор двійкових кодів Бернуллі генерує випадкові двійкові символи за розподілом Бернуллі і має такі параметри:

- параметр *Probability of a zero* набуває значення від 0 до 1, задає випадкову величину закону розподілу p , яка дорівнює ймовірності появи нулів; відповідно, ймовірність появи одиниць дорівнює $(1 - p)$;
 - параметр *Initial seed* задає початкове значення генератора випадкових чисел;
 - параметр *Frame-based outputs* визначає формат вихідного сигналу генератора:
 - *frame-based* — у вигляді фреймів;
 - *sample-based* — у вигляді вибірок (відліків).
- Цей параметр доступний тільки в тому разі, якщо не вибрано опцію *Interpret vector parameters as 1-D*;
- параметр *Samples per frame* визначає кількість вибірок у кожному зі стовпців фреймового сигналу;
 - параметр *Interpret vector parameters as 1-D* задає вихідний сигнал одновимірним. Якщо його не вибрано, то сигнал розглядатиметься як двовимірний масив;
 - параметр *Output data type* визначає тип вихідних даних — двійковий або цілий.

Канал AWGN — це канал, який зазвичай використовують для імітації шуму в досліджуваному каналі додатково до багатопроменевості, блокування через рельєф місцевості, завад, відбиття від землі та власних завад, з якими сучасні радіосистеми стикаються під час наземної експлуатації [4]. AWGN — це канал адитивного білого гауссівського шуму, який має постійну спектральну густина. Канал AWGN має такі параметри:

- параметр *Input Processing*: встановлено стовпець як параметр каналу. Параметр надає вихідний сигнал на основі кадру;
- параметр *Initial Seed*: якщо початковий твірний поліном в AWGN каналі, то BER зменшується. Він буде генерувати випадкове число, яке зі свого боку генерується генератором гауссівського шуму *Gaussian Noise Generator*.
- параметр *Mode*: є різні режими, зокрема E_b/N_0 , SNR, E_s/N_0 , відхилення від маски, відхилення від порту. Встановлено параметр E_b/N_0 . Цей параметр є відношенням енергії біта до спектральної густини потужності шуму.

Кількість бітів на символ, потужність вхідного сигналу, період символу — усі ці параметри встановлено для генерації дисперсії шуму в каналі AWGN.

Існують різні *методи модуляції*, такі як BPSK, QPSK, 16-PSK, 32-PSK, QAM тощо. Кожен метод модуляції має свою власну функцію помилок, тому ефективність методу модуляції під час впливу шуму різниться. Але висока швидкість передавання даних в обмеженій смузі пропускання збільшує параметр BER. Деякий час він руйнує вихідні дані. Методи, які зазвичай використовують у безпроводовому зв'язку — це методи моду-

ляції QAM (квадратурна амплітудна модуляція) та QPSK (квадратурна фазова маніпуляція). Метод модуляції вищого порядку забезпечує підвищену швидкість передавання даних, але такі методи модуляції потребують більш високого значення відношення сигнал/шум. Якщо зона зв'язку є невеликою, тоді застосовують метод модуляції QAM, проте на великій території ефективнішим є метод модуляції QPSK.

Метод модуляції QPSK базується на кодуванні двох бітів інформації, що передаються одним символом. У QPSK модуляції два послідовних біти об'єднуються, зменшуючи бітову швидкість або швидкість передавання сигналів, а також смугу пропускання каналу, яка є основним ресурсом системи зв'язку. Водночас для передавання даних тієї самої довжини метод модуляції QPSK потребує меншої смуги пропускання, ніж метод модуляції BPSK. Параметр BER для методів модуляції BPSK і QPSK є майже однаковим. У всіх методах модуляції BER є порівняно високим. Метод модуляції 64-PSK має найбільший коефіцієнт помилок за бітами серед інших методів більш низького порядку. Метод QPSK також відомий як метод модуляції 4-PSK.

Модулятор M-PSK: метод модуляції використовується в передавачі і має такі параметри:

- *M-ary:* використовується метод QPSK, тому $M = 4$;
- *Phase Offset (rad):* метод QPSK використовується відповідно до $\pi/4$.

Демодулятор M-PSK: метод демодуляції використовується в приймачі.

Блок розрахунку частоти помилок зіставляє введені дані із даними, здобутими після демодуляції, та обчислює коефіцієнт помилок. На дисплеї відображається параметр BER у кінці процесу моделювання [3].

Реалізація імітаційної моделі передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування Геммінґа

Код Геммінґа — це тип лінійного блокового коду (n, k) , який характеризується такими параметрами:

- кількістю бітів даних n ;
- кількістю кодованих бітів k ;
- кількістю контрольних бітів $m = n - k$.

Для обчислення кількості контрольних бітів скористаємося рівнянням:

$$2^m \geq m + k + 1.$$

Для генерування закодованих бітів із застосуванням кодера Геммінґа зі зростанням кількості бітів даних збільшується кількість бітів контролю помилок. Модель передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування Геммінґа наведено на рис. 2.

У кодері Геммінґа $M = 10$. При цьому 1023 біти передаються через кадр, і завдяки реалізації методу кодування Геммінґа зменшується коефіцієнт бітових помилок.

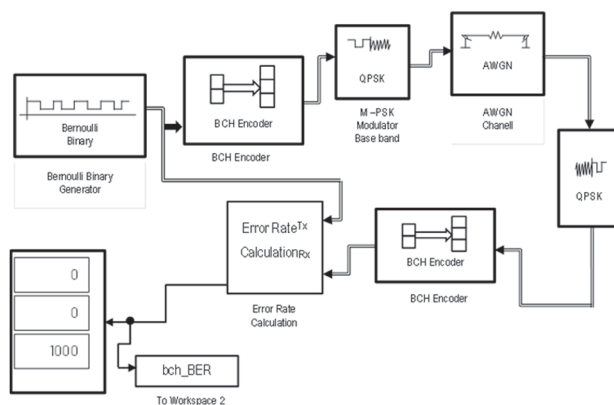


Рис. 2. Модель передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування Геммінґа

Реалізація імітаційної моделі передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування BCH

Метод кодування Боуза–Чоудхурі–Хоквінґема (БЧХ), відомий як метод кодування BCH, — це найбільш ефективний метод кодування інформації серед методів лінійного блокового кодування, який характеризується такими параметрами:

- довжиною блока, $n = 2^m - 1$;
- кількістю перевірних бітів, $(nk) \leq mt$;
- мінімальною відстанню Геммінґа, $d_{\min} \geq 2t + 1$.

При цьому для будь-яких цілих m і t існують двійкові (n, k) коди BCH.

Метод кодування BCH забезпечує гнучкий вибір параметрів і може виправляти не більш як t помилок. Якщо код BCH використовується для виправлення поодинокі помилки, то він буде функціонувати так само, як і код Геммінґа. Код BCH переважно застосовують у системах безпроводового зв'язку. Під час кодування кодом BCH, коли відношення сигнал/шум є більш високим, частота помилки BER майже дорівнює нулю.

Кодер BCH. Для блока кодера BCH надано на вибір три варіанти послідовностей:

1) *Specific Primitive Polynomial:* він перетворює невід'ємне десяткове ціле число d у двійковий вектор-рядок. Якщо d є вектор на виході, то його зображено у формі матриці, кожен рядок якої подано у двійковій формі відповідного елемента в d ;

2) *Specific Generator Polynomial:* генератор полінома, який використовує вектор-рядок Галуа, в якому перелічено коефіцієнти полінома в порядку спадання ступенів змінної. Поліном генератора генерується параметром *bchgenpoly*;

3) *Puncture Code:* коли кодер працює з різними словами коду на кадр, до всього коду застосовується один і той самий шаблон виколювання слів.

Кодове слово виколювання використовується для видалення символу парності.

Декодер BCH. Декодер коду Боуза–Чоудхурі–Хоквінгема здійснює відновлення даних у кодових комбінаціях. Усі параметри декодера мають повністю збігатися з параметрами кодера БЧХ.

Метод кодування кодом BCH, реалізований у моделі Simulink, подано на рис. 3.

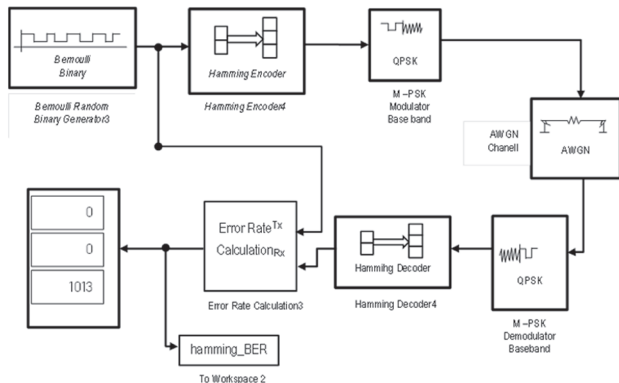


Рис. 3. Модель передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування БЧХ

Реалізація імітаційної моделі передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування RS

Код Ріда–Соломона (RS, англ. RS) є одним із видів кодування BCH, який використовується для кодування недвійкових даних і має такі параметри:

- довжину символу k ;
- довжину блока, $n = (2^m - 1)$ символів;
- розмір повідомлення k ;
- розмір контрольного коду, $(nk) = 2t$;
- кількість символів, що виправляються з помилкою, $t = (nk)/2$.

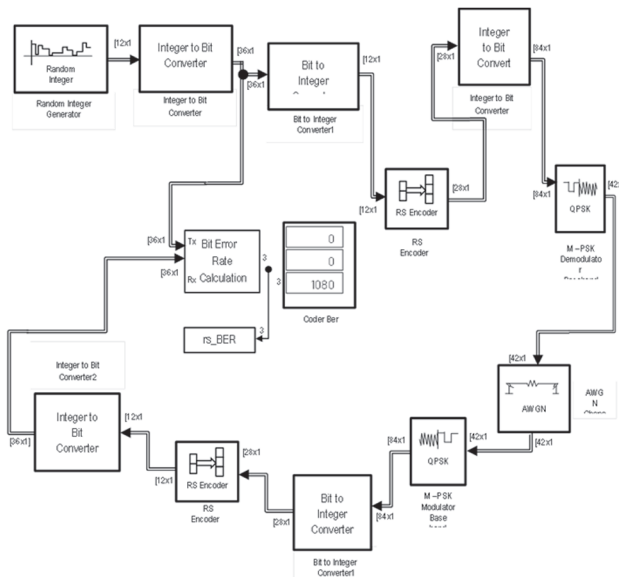


Рис. 4. Модель передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування Ріда–Соломона

Для високоефективного використання коду RS разом із іншими ефективними методами кодування застосовують такі параметри, як надмірність, розмір символу та довжину блока, які можна легко адаптувати для розміщення інформаційних даних із розмірами широкого діапазону. Модель передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування Ріда–Соломона зображено на рис. 4.

Реалізація імітаційної моделі передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування CRC

Циклічний надлишковий код (CRC) широко використовується в багатьох методах каналного кодування через його високу здатність виявляти помилки та відмінні характеристики захисту від завад.

CRC — це код перевірки помилок, особливість якого полягає в тому, що довжину інформаційного і перевірного полів можна вибирати довільно. Код CRC складається з двох частин. Перша частина — це інформаційний код, який є інформацією, яку необхідно перевірити, а друга частина — це перевірний код. Якщо довжина коду CRC становить усього n бітів, а довжина інформаційного коду дорівнює k бітів, він називається (n, k) -кодом. Біти r , які залишились, є бітами парності. Мінімальна відстань Геммінга при цьому становить $d_{\min} - 1$, або менше помилок [6]. Можливі шаблони помилок із непарним числом помилок, якщо твірний поліном $g(x)$ має парне число ненульових коефіцієнтів. Існують різні типи, зокрема CRC-16, CRC-32 тощо. Модель передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування CRC ілюструє рис. 5.

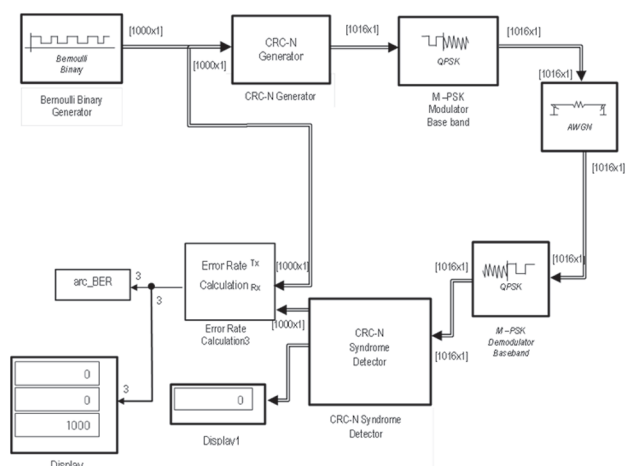


Рис. 5. Модель передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування CRC

Реалізація імітаційної моделі передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування згортковим кодом

Згорткові коди використовуються для надійного передавання даних: відео, мобільного зв'язку, супутникового зв'язку. Їх застосовують разом із кодом Ріда–Соломона та іншими кодами схожого типу. Також згорткове кодування використовується в протоколі 802.11a на фізичному MAC-рівні. Згорткові коди зазвичай описуються за допомогою двох параметрів: кодової швидкості та довжини обмеження [3]. У згорткових кодах довжина закодованого символу є фіксованою. Для декодування загорткових кодів використовується декодер Вітербі.

Метод кодування загортковим кодом, реалізований у моделі Simulink, зображено на рис. 6.

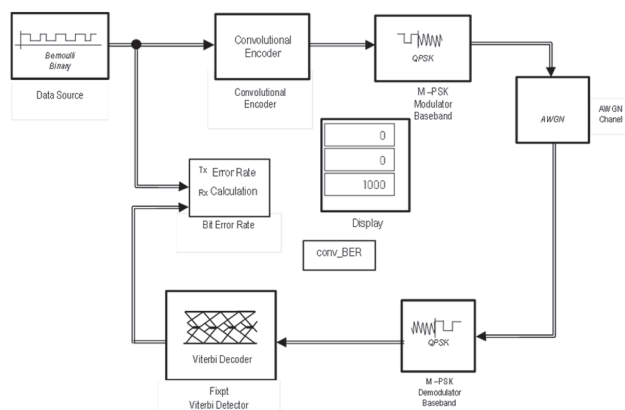


Рис. 6. Модель передавання дискретної інформації із застосуванням методу каналного кодування згортковим кодом

Порівняльна характеристика реалізованих методів кодування завадостійкими кодами

Значення ймовірності виникнення помилок у каналі залежно від відношення сигнал/шум у разі застосування різних методів каналного кодування наведено в таблиці.

Порівняльну характеристику змінювання залежності ймовірності виникнення помилок від відношення E_b/N_0 із застосуванням методів кодування унаочнює рис. 7.

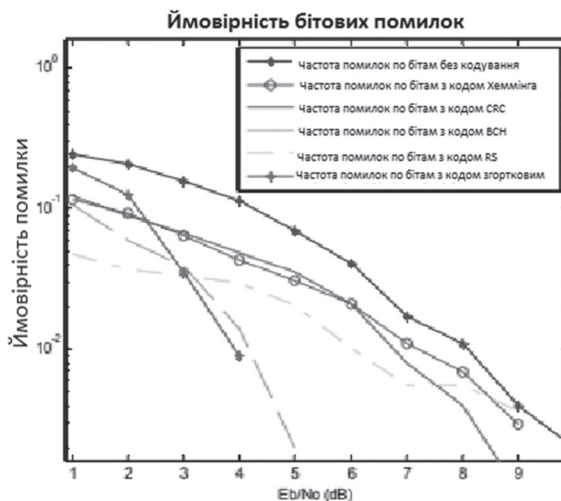


Рис. 7. Графіки залежності ймовірності виникнення помилок від відношення E_b/N_0 із застосуванням методів кодування

Як демонструють результати досліджень, наведені в таблиці, при значеннях E_b/N_0 , що дорівнюють 1, 2 і 3 дБ, ймовірність виникнення помилок у разі методу кодування із застосуванням коду RS є найнижчою порівняно з методами кодування кодами BCH, CRC, Геммінга і згортковим кодом. Тому цей метод є більш ефективним для менших значень відношення E_b/N_0 . Ймовірність виникнення помилок під час застосування методу кодування згортковим кодом становить нульове значення при відношенні E_b/N_0 , що дорівнює 5 дБ, а при застосуванні методів кодування кодами RS та CRC ймовірність виникнення помилок становить нульове значення лише при значенні E_b/N_0 , що дорівнює 10 дБ. Водночас ймовірність виникнення помилок у разі застосування методу кодування кодом BCH при відношенні E_b/N_0 , що дорівнює 5 дБ, становить 0,002.

Відношення, E_b/N_0 , дБ	Ймовірність виникнення помилки на 1000 переданих бітів інформації					
	Без кодування	Кодування інформації із застосуванням коду				
		BCH	Геммінга	RS	CRC	згорткового
1	0,246	0,107	0,149	0,048	0,123	0,195
2	0,207	0,060	0,115	0,037	0,090	0,125
3	0,159	0,039	0,093	0,033	0,068	0,035
4	0,115	0,014	0,064	0,029	0,049	0,009
5	0,070	0,002	0,043	0,020	0,035	0
6	0,041	0	0,030	0,010	0,021	0
7	0,017	0	0,020	0,005	0,008	0
8	0,011	0	0,010	0,005	0,004	0
9	0,004	0	0,006	0,003	0,001	0
10	0,002	0	0,002	0	0	0

ВИСНОВКИ

Аналіз розглянутих методів каналного кодування дає змогу дійти висновку, що метод кодування інформації із застосуванням коду RS є більш ефективним під час передавання даних у каналах з обмеженою потужністю і використовується в каналах супутникового зв'язку. Але в разі використання методу кодування із застосуванням коду BCH не потрібний компонент пам'яті, який збільшує затримку передавання сигналів, вартість, складність схеми кодера тощо. Тому в більшості безпроводових мереж використовується метод кодування кодом BCH, який дає можливість підвищити якість передавання сигналу на перивчастих каналах [2].

Список використаної літератури

1. Голиков А. М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2016. 516 с.
2. Berrou C., Glavieux A. Near optimum error correcting coding and decoding // *IEEE Trans. Comm.*, 1996. Vol. 44, No. 10. P. 1261–1271.
3. Vucetic B., Yuan J. Turbo codes: principles and applications // *Kluwer Academic, Norwell, MA*, 2000. P. 12.

4. Abbasfar A., Divsalar D., Kung Y. Accumulate-repeat accumulate codes, *Proc. // IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2004)*, Dallas, TX, December 2004. P. 509–513.

5. *The F-LDPC family: High-performance flexible modern codes for flexible radio*, in *Proc. / T. R. Halford, M. Bayram, C. Kose [et al.] // ISSSTA 2008*, Bologna, Italy, September 2008. P. 376–380.

6. Jin H., Khandekar A., McEliece R. Irregular repeat-accumulate codes, *In Proc. // 2nd Int. Symp. Turbo codes and related topics*, Brest, France, September 2000. P. 1–8.

7. Forney G. D., Jr. Codes on graphs: Normal realizations // *IEEE Trans. Inform. Theory*. 2001. Vol. IT-13. P. 520–548.

8. Moreira J. C., Farrell P. G. Essentials of error control coding // *John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England*, 2006. P. 361.

9. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е изд. / пер. с англ. Е. Г. Грозы [и др.]; под ред. А. В. Назаренко. Москва: Вильямс, 2003. 1104 с.

10. Canteaut A., Filiol E. Cipher text only reconstruction of stream ciphers based on combination generators. *Berlin, Springer*, 2001. P. 16.

А. А. Дударева, Е. А. Грищенко, А. И. Голубенко, Н. В. Руденко

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КАНАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

В настоящее время стремительно развиваются беспроводные сети связи. Распространение этих сетей объясняется удобством их использования, дешевизной и приемлемой пропускной способностью. При этом для эффективной передачи информации необходимо получать безошибочные данные, часто искажаемые при их передаче по каналам беспроводной связи. Чаще всего на качество передачи данных влияют такие факторы, как дисперсионный эффект, замирание, затухание, помехи, шум в канале и т.д. Поэтому во избежание ошибок при приеме информации применяются методы каналного кодирования, основной задачей которых является поиск быстро передаваемых кодов, которые могут исправлять или обнаруживать ошибки. Целью этой статьи является сравнение и анализ коэффициентов блочных ошибок (далее BER) при применении различных методов каналного кодирования информации. При этом количество передаваемых битов почти одинаково для различных методов каналного кодирования.

Ключевые слова: двоичный файл Бернулли; методы кодирования каналов; AWGN; анализ BER.

H. O. Dudarieva, O. O. Hryshchenko, O. I. Holubenko, N. V. Rudenko

COMPARATIVE ANALYSIS OF CHANNEL CODING METHODS IN WIRELESS NETWORKS

Currently, wireless communication networks are rapidly developing in the field of data transmission. The proliferation of these networks is due to their ease of use, low cost and acceptable bandwidth. At the same time, for efficient transmission of information, it is necessary to obtain error-free data, which is often distorted when transmitting them over wireless communication channels. Most often, the quality of data transmission is affected by such factors as dispersion effect, fading, attenuation, interference, noise in the channel, etc. Therefore, in order to avoid errors when receiving information, channel coding methods are used, the main task of which is to search for quickly transmitted codes that can correct or detect errors. Channel coding techniques take up a wider bandwidth because excess bits are added to them. In communication networks, the two most common codes are used in the process of transmitting data: codes for detecting errors and codes for correcting errors. Error detection codes make it easy to determine if errors are present. As a rule, such codes are used in conjunction with certain protocols of the data link or transport layer. In this case, the receiver simply rejects the received data block, in which an error was detected, after which the transmitter transmits this block again. Error correction codes allow not only detecting errors, but also correcting them without resorting to re-transmission of information. These codes are often used in wireless networks where retransmission of data is extremely inefficient and error rates are high.

The aim of this work is to compare and analyze the bit error rates (further — BER) when using various methods of channel coding. Moreover, the number of transmitted bits is almost the same for different channel coding methods.

Keywords: Bernoulli binary; channel coding techniques; AWGN; BER analysis.