

V. 55, № 2. P. 67–73.

5. Демьянченко А. Г. Кратковременная нестабильность частоты и методы ее измерения / Демьянченко А. Г., Кулешов В. Н. – М. : Московский Энергетич. ин-тут, 1978. – 78 с.

6. Измерение спектрально-частотных и корреляционных параметров и характеристик лазерного излучения / под ред. А. Ф. Котюка и Б. М. Степанова. – М. : Радио и связь, 1982. – 272 с.

7. Царапкин Д. П. Стабилизация частоты возбудителей радиопередатчиков СВЧ / Царапкин Д. П. – М. : Московский Энергетич. ин-тут, 1985. – 80 с.

8. Асеев Б. П. Основы радиотехники / Асеев Б. П. – М. : Гос. изд-во литерат. по вопросам связи и радио, 1947. – 572 с.

9. <http://www.radteh.ru/izmerenie/16.html>

Отримана/Received : 2.4.2017 р. Надрукована/Printed : 11.6.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Мартинюк

УДК 621.317.73

І.С. ПЯТІН, Д.А. МАКАРИШКІН

Хмельницький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОГО КАСКАДНОГО ТУРБОКОДУВАННЯ

*Турбокоди створюють шляхом каскадування двох або більше складових кодів при їх паралельному або послідовному з'єднанні, розділених перемежувачем. У статті наведені результати дослідження завадостійкості турбокодів з послідовним з'єднанням згорткових кодів в каналі з адитивним білим гаусовим шумом і бінарною фазовою маніпуляцією. Кодери згорткових кодів задаються поліномом  $G = (3, [7\ 5], 7)$ . Довжина блоку перемежувача збігається з довжиною інформаційної послідовності. Швидкість коду  $R = 1/3$ . Зроблено висновок, що зі збільшенням числа ітерацій при декодуванні збільшується стійкість, а енергетичний виграш зменшується. Це пояснюється відносно малою мінімальною кодовою відстанню турбокодів. Забезпечується енергетичний виграш 2 дБ для  $BER = 10^{-11}$ .*

*Ключові слова: завадостійке кодування, каскадне кодування, турбокодер.*

I.S. PYATIN, D.A. MAKARISHKIN

Khmelnytskyi National University

### RESEARCH SERIAL CONCATENATED TURBO ENCODER

*Turbo codes are formed by cascading two or more constituent codes. Turbo codes are created by parallel or sequential connection of codes separated by an interleaver. The article presents the results of an investigation of noise immunity of turbo code systems with consecutive connection of convolutional codes in a channel with additive white Gaussian noise and binary phase manipulation. The coders of convolutional codes are given by the polynomial  $G = (3, [7\ 5], 7)$ . The length of the interleaver block is the same as the length of the information sequence. Code speed  $R = 1/3$ . It is concluded that with an increase in the number of iterations during decoding, the noise immunity increases, and the power gain is better. This is explained by the relatively small minimum code distance of the turbo codes. An energy gain of 2 dB is provided for  $BER = 10^{-11}$ .*

*Keywords: antinoise coding, cascade coding, turbo encoder.*

### Постановка задачі

Одним з перспективних напрямків вдосконалення характеристик спеціальних телекомунікаційних систем є застосування коригувальних кодів. В даний час широке поширення в телекомунікаційних системах отримав клас завадостійких кодів – турбокоди.

Завадостійке кодування призначене для виявлення і по можливості виправлення помилок, що виникли внаслідок дії завад при передачі дискретних сигналів по каналах зв'язку. Завадостійке кодування передбачає введення надлишковості в кодований дискретний сигнал. При цьому канал зв'язку повинен пропускати кодований сигнал з надлишковістю [1]. Вони використовуються в системах зберігання і передачі даних для зниження імовірності появи помилок і підвищення якості таких систем. Пропускна здатність каналу зв'язку визначається виразом:

$$C = \Delta f \log_2(1 + SNR),$$

де  $\Delta f$  – смуга частот каналу зв'язку;  $SNR$  – відношення потужності сигналу до потужності шуму.

### Аналіз досліджень та публікацій

Турбокоди утворюються шляхом каскадування двох або більше складових кодів. Найбільш поширена схема турбокодера складається з двох однакових згорткових кодерів, між якими знаходиться блок перемежувача. Кожний згортковий кодер додає до інформаційної послідовності перевірку групу. У загальному випадку турбокоди можуть використовуватись як при паралельному, так і послідовному (рис. 1) з'єднанні кодів, розділених перемежувачем.

Важливим моментом при проектуванні послідовних турбокодів є правильний вибір складових кодів і перемежувача. Найкращими складовими кодами є рекурсивні систематичні згорткові коди (рис. 2), оскільки їх застосування дозволяє значно зменшити число кодових слів низької ваги, що визначають

ефективність турбокоду. Роль перемежувача в турбокодах полягає в зменшенні кореляції між сусідніми символами кодового слова, що дозволяє на кожній ітерації декодування зменшувати ймовірність помилки. Крім цього, перемежувач також має великий вплив на мінімальну кодову відстань турбокоду і кількість кодових слів низької ваги, що визначають ефективність турбокоду. Найкращі характеристики мають турбокоди з псевдовипадковими перемежувачами, однак, вони занадто складні для реалізації і тому на практиці використовують перемежувачі з рекурсивною структурою, що отримали свою назву від рекурсивних регістрів зсуву, які мають зворотний зв'язок через схему нерівнозначності. Рекурсивна схема кодера показана на рис. 2.

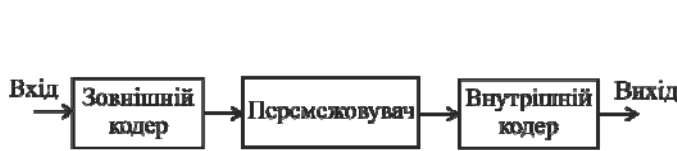


Рис. 1. Послідовний турбокодер

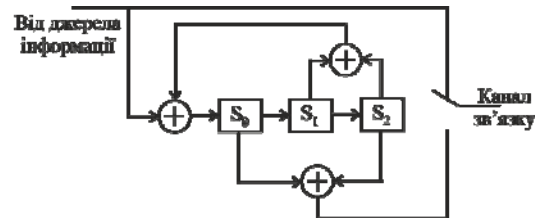


Рис. 2. Кодер рекурсивного систематичного згорткового коду

Особливістю схеми є нескінченна імпульсна характеристика, властивості якої забезпечуються суматором по модулю два, підключеним до інформаційного входу регістра. Наявність в пам'яті комірок  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  хоча б однієї одиниці призводить до постійного оновлення вмісту регістра.

Для декодування турбокодів використовується ітеративне декодування з м'яким рішенням, що дозволяє отримати дуже близькі до пропускної спроможності каналу характеристики. В процесі ітеративного декодування турбокодів виконується декілька ітерацій декодування, де відбувається декодування кожної зі складових кодів, після чого результат декодування використовується декодером іншої складової коду для отримання більш точних рішень. Для декодування складових кодів можуть використовуватися будь-які алгоритми декодування, здатні формувати м'які рішення щодо декодованих символів. Практичне застосування знайшли такі алгоритми декодування, як Log-MAP, Max-Log-MAP і Soft Output Viterby Algorithm.

Ефективність турбокодів дуже висока. Вони здатні працювати при енергетиці на 0,5 дБ вище пропускної здатності каналу. При цьому складність їх реалізації виявляється менше складності декодерів згорткових кодів.

Основними недоліками турбокодів слід визнати високу складність практичної реалізації, а також наявність області насичення ймовірності помилки. Даний ефект визначається невеликою кодовою відстанню турбокодів.

### Дослідження турбокодера в середовищі Simulink

Згорткове кодування – метод безперервного кодування двійкового потоку даних, при якому кожному вхідному двійковому символу відповідає декілька символів на виході кодера. Згорткове кодування – це один з методів завадостійкого каналного кодування, основне призначення котрого є виправлення помилок невеликої кратності.

Згортковий кодер додає в послідовність надлишкову інформацію. Наприклад, якщо кожному вхідному біту відповідає два вихідних, то говорять про згорткове кодування зі швидкістю  $R = 1/2$ . У разі, коли двом бітам вхідної послідовності відповідає три біта вихідний, то швидкість згорткового кодування становить  $R = 2/3$ . Параметр  $R$  показує відношення інформаційної швидкості до технічної. Чим ближче цей параметр до нуля, тим більше стійкість коду, але менш ефективно використовується канал зв'язку.

Будь-який згортковий кодер будується на основі регістрів зсуву. Кількість запам'ятовуючих комірок визначає кількість можливих станів кодера. Якщо, наприклад, у згортковому кодері використовується шість запам'ятовуючих комірок, то в кодері зберігається інформація про шість попередніх станів сигналу, а з урахуванням вхідного біта отримаємо, що в такому кодері використовується сім біт вхідної послідовності. Такий згортковий кодер називається кодером на сім станів.

Таким чином, вихідний бінарний потік, що формується в згортковому кодері, визначається значенням вхідного біта і битами, збереженими в запам'ятовуючих комірках, тобто значення кожного формованого вихідного біта залежить не тільки від вхідного інформаційного біта, а й від кількох попередніх бітів. Згортковий кодер – пристрій з пам'яттю. Головною характеристикою згорткових кодерів є завадостійкість формованої ними послідовності.

Simulink-модель системи зв'язку з турбокодуванням приведена на рис. 3. Джерело інформаційного сигналу представлено у моделі блоком Bernoulli binary generator. Далі іде послідовний турбокодер і двопозиційний фазовий модулятор на боці передавача. На боці приймача ввімкнені двопозиційний фазовий демодулятор, послідовний турбокодер і блок підрахунку кількості помилок.

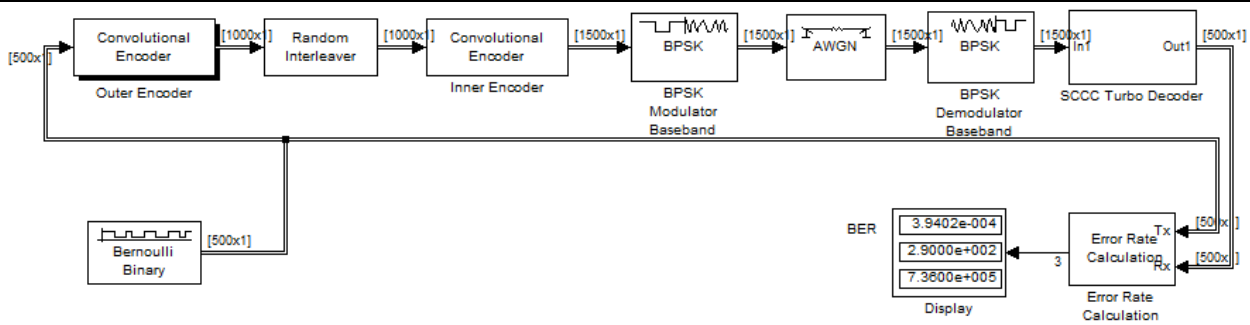


Рис. 3. Simulink-модель системи зв'язку з турбокодуванням

Кодери згорткових кодів в даній схемі задаються поліномом  $G = (3, [7 \ 5], 7)$ . У поліномі згорткового коду  $G = (K, [b \ c] \ d)$  використовуються позначення:  $K$  – довжина кодового обмеження;  $b, c$  – числа, які визначають вихідні з'єднання для кожної вхідної інформаційної послідовності;  $d$  – визначає з'єднання зворотного зв'язку для вхідних послідовностей. Довжина блоку перемешувача збігається з довжиною інформаційної послідовності, швидкість коду  $R = 1/3$ .

Simulink-модель турбодекодера приведена на рис. 4.

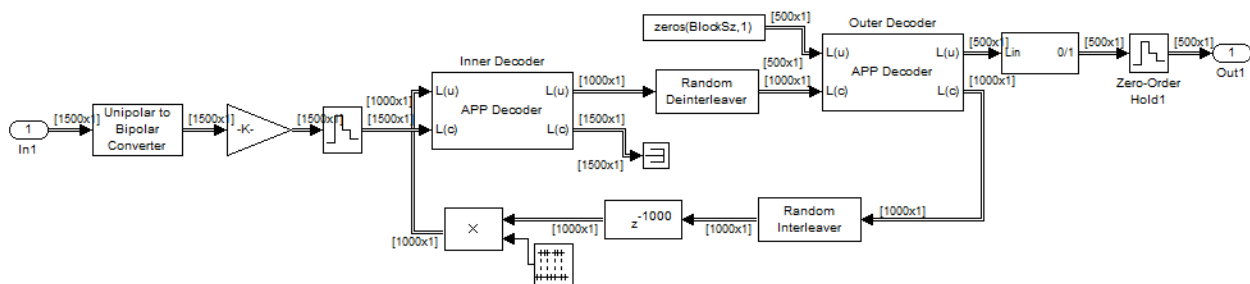


Рис. 4. Simulink-модель турбодекодера

Турбокод використовує алгоритм – «м'який вхід – м'який вихід». М'який вихід першого декодера дає дійсне число, яке є мірою ймовірності помилки при декодуванні інформаційного біта. Ця додаткова інформація надходить на м'який вхід другого декодера і використовується при декодуванні. Другий декодер також забезпечує м'які рішення, необхідні для наступної ітерації в процесі декодування. Для гаусового каналу з вісьмирівневним квантування м'яких рішень, в порівнянні з дворівневим, призводить в результаті до поліпшення відношення сигнал/шум на 2 дБ при тій же ймовірності появи помилкового біта.

Блок декодера APP виконує декодування апостеріорної ймовірності згорткового коду. Вхід  $L(u)$  являє собою послідовність логарифмів правдоподібності вхідних бітів кодера, а вхід  $L(c)$  представляє послідовність логарифмічних правдоподібностей кодових бітів. Виходи  $L(u)$  і  $L(c)$  є оновленими версіями цих послідовностей на основі інформації про кодер.

Якщо згорткове кодування використовує алфавіт з  $2n$  можливих символів, вектори  $L(c)$  цього блоку мають довжину  $Q \cdot n$  для деякого позитивного цілого числа  $Q$ . Аналогічно, якщо дані, що декодуються, використовують алфавіт з  $2k$  можливих вихідних символів, то вектори  $L(c)$  цього блоку мають довжину  $Q \cdot k$ .

Цей блок приймає вхідний сигнал вектора-стовпця з будь-яким позитивним цілим числом для  $Q$ .

Якщо потрібен тільки вхід  $L(c)$  і вихід  $L(u)$ , то можливо приєднати блок Simulink Ground до входу  $L(u)$  і блок Simulink Terminator до виходу  $L(c)$ .

Цей блок приймає одиночні і подвійні типи даних. Обидва входи повинні бути одного типу. Тип вихідних даних збігається з типом вхідних даних.

Декодер апостеріорної ймовірності використовує м'яку оцінку достовірності символу, що декодується, а також здійснює аналіз апріорної і апостеріорної вірогідності прийому вірного кодового слова.

Апріорною називається інформація, якою володіє декодер до прийому кодового слова, а апостеріорною – інформація, яку отримує декодер після обробки кодового слова. Апостеріорна інформація, отримана про кодове слово на виході першої ітерації декодування, надходить на вхід декодера наступної ітерації і є для нього апостеріорною інформацією.

Алгоритм максимуму апостеріорної інформації використовує як мінімум два шляхи декодування по кодовій решітці, які називають шляхами прямого і зворотного обходу кодової решітки. Всі схожі ймовірності помилкових переходів від одного вузла кодової решітки до іншого, об'єднуються в групи.

Процес «м'якого» відбору зводиться до знаходження логарифмічних відношень правдоподібності.

Призначення перемешувача – перетворити канал зв'язку з групуванням помилок в канал зв'язку з випадковими помилками, які можуть бути виправлені використовуваним завадостійким кодом.

Випадковий перемешувач – це перемешувач з випадковою відповідністю між вхідними та вихідними позиціями переданих символів. Їх перевага – простота реалізації, недолік – неможливість

гарантувати мінімальний рівень помилок перемикача.

### Висновки

Збільшення числа ітерацій при декодуванні покращує завадостійкість. Зі збільшенням числа ітерацій енергетичний виграш зменшується. Криві ймовірності помилки декодування мають область, де їх нахил різко зменшується. При цьому ймовірність помилки продовжує знижуватися, але з набагато меншою швидкістю, тому для досягнення значень помилки  $10^{-8}$  ...  $10^{-9}$  необхідні значні енергетичні витрати. Це пояснюється відносно малою мінімальною кодовою відстанню турбокодів, яке починає домінувати при середніх і великих значеннях відношення  $E_b/N_0$ .

### Література

1. Шинкарук О.М. Основи функціонування багатоканальних систем передачі інформації : навч. посібник / О.М. Шинкарук, Ю.М. Бойко, І.І. Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – 245 с.
2. Бойко Ю.М. Дослідження способів завадостійкого кодування для захисту від помилок у цифрових каналах передавання інформації / Ю.М. Бойко, Д.А. Макаришкін, С.В. Івчун // Вісник ХНУ. – 2013. – № 2. – С. 188–195.

Отримана/Received : 13.5.2017 р. Надрукована/Printed : 11.6.2017 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.

УДК 621.396.12

Д.А. МАКАРИШКІН, Н.М. САМАРУК, І.С. ПЯТІН  
Хмельницький національний університет

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ЗОНДУЮЧИХ ІМПУЛЬСІВ НАДШИРОКОСМУГОВИХ МОБІЛЬНИХ РАДІОЛОКАТОРІВ

*В статті наведено математичну модель суперконденсатора для оптимізованої системи електроживлення генератора зондуєчих імпульсів надширокосмугових мобільних радіолокаторів. Розроблена вдосконалена нелінійна еквівалентна схема заміщення суперконденсатора у вигляді неперервної дробової схеми, яка синтезована по другій формі Кауера. Функцію комплексного опору суперконденсатора представлено у вигляді неперервного дробу. Отримано аналітичні вирази для визначення елементів модифікованої нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора та елементів вдосконаленої нелінійної еквівалентної схеми заміщення суперконденсатора для оптимізованої системи електроживлення генераторів зондуєчих імпульсів надширокосмугових мобільних радіолокаторів.*

*Ключові слова: математична модель, суперконденсатор, функція комплексного опору, нелінійна еквівалентна схема заміщення, електричні параметри, система електроживлення, генератор зондуєчих імпульсів надширокосмугових мобільних радіолокаторів.*

D.A. MAKARYSHKIN, N.M. SAMARUK, I.S. PYATIN  
Khmelnytsky National University

## MATHEMATICAL MODEL OF SUPERCAPACITOR FOR OPTIMIZED POWER SYSTEMS OF ULTRA WIDEBAND RADARS DIRECT PULSE GENERATOR

*The paper presents the mathematical model of supercapacitor for optimized power systems of ultra wideband radars direct pulse generator. The obtained the complex impedance function of the supercapacitor in the form of a continued fraction, and built a modified nonlinear equivalent circuit of the supercapacitor. Developed advanced non-linear equivalent circuit of the supercapacitor in a continuous fractional scheme, which is synthesized by a second form of Kauer. The analytical expressions for the determination of elements of the modified nonlinear equivalent circuit of the supercapacitor in a continuous fractional scheme, which is synthesized by a second form of Kauer and elements advanced nonlinear equivalent circuit of supercapacitor for optimized power systems of ultra wideband radars direct pulse generator. Found that showed that non-linear equivalent circuit of the supercapacitor with distributed element can be directly replaced by the equivalent non-linear equivalent circuit with lumped element.*

*Keywords: mathematical model, supercapacitor, complex impedance function, nonlinear equivalent circuit, electric parameters, power system, direct pulse generator of ultra wideband radars.*

**Постановка проблеми.** Розвиток радіолокації є надзвичайно важливим для обороноздатності, суверенітету та економіки України. Спектр практичного застосування радіолокації є дуже широким. Найбільш важливі задачі радіолокації пов'язані із її застосуванням у військовій техніці для виявлення ворожих літаків, ракет та рухомих наземних об'єктів. Сучасний розвиток надширокосмугових мобільних радіолокаторів спрямований на розробку та вдосконалення їх окремих елементів, вузлів, блоків, апаратних засобів та підсистем [1–4]. В надширокосмугових мобільних радіолокаторах в якості зондуєчих імпульсів, які дозволяють реалізувати надшироку смугу, використовуються два види сигналів тривалістю від 1 нс до 5 нс. До таких сигналів відносяться відеоімпульси та короткі відрізки синусоїди, які складаються з одного або двох періодів коливальності. Використання надширокосмугових сигналів та надкоротких імпульсів дозволяє