

*Strategy on the Performance of a DAI Pursuit Problem // Proceedings of the Tenth International Workshop on Distributed Artificial Intelligence, Bandera, Texas, October 1990, pp. 263–292.* 13. Растрюгин Л.А., Рина К.К., Тарасенко Г.С. *Адаптация случайного поиска.* – Рига, 1973. 14. Цыпкин Я.З. *Основы теории обучающихся систем.* – М., 1970. 15. Срагович В.Г. *Адаптивное управление.* – М., 1981. 16. Назин А.В., Позняк А.С. *Адаптивный выбор вариантов: Рекуррентные алгоритмы.* – М., 1986. 17. Катренко А.В. *Дослідження операцій. Підручник.* – Львів, 2004. 18. Вазан М. *Стохастическая аппроксимация.* – М., 1972. 19. Мулен Э. *Теория игр с примерами из математической экономики.* – М., 1985. 20. Невельсон М.Б., Хасьминский Р.З. *Стохастическая оптимизация и рекуррентное оценивание.* – М., 1972.

УДК 621

В.Т. Кремінь, А.С. Сметана  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра електронних обчислювальних машин

## МЕТОД ПРЯМОЇ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛОК ДЛЯ РАДІОМОДЕМІВ WIRELESS USB ФІРМИ CYPRESS SEMICONDUCTOR

© Кремінь В.Т., Сметана А.С., 2005

**Запропонована реалізація завадостійкого кодування для радіомодемів WirelessUSB виконана на мікроконтролері PSoC. Показано, як можна використовувати апаратні можливості цих радіомодемів для виправлення помилок прийому, спричинених завадами у радіоканалі. Описано розроблений метод прямого корегування помилок, а також наведено його алгоритмічне та апаратне виконання.**

**The noise resistant coding implementation for radiomodems CYPRESS WirelessUSB is proposed using PSoC microcontrollers. It is shown, like the hardware abilities of these radio modems can be used to correct receiving errors, caused by interference in radio channel. The developed forward error correction code was described and its algorithmic and hardware implementations were given.**

**Вступ.** Під час розробки систем передачі даних особлива увага приділяється завадостійкості лінії і достовірності прийнятих даних. Достовірність прийнятих даних характеризує ймовірність спотворення для кожного переданого біта (середній час напрацювання машини на один збій – Bit Error Rate, BER). Величина BER для каналів зв'язку без додаткових засобів захисту від помилок (наприклад, самокоригувальних кодів) становить, як правило,  $10^{-4}$  –  $10^{-6}$ . Завадостійкість лінії визначає її здатність зменшувати рівень завад, які створюються навколишнім середовищем, на внутрішніх провідниках. Завадостійкість лінії залежить від типу використовуваного фізичного середовища, а також від екранувальних і тих, що придушують завади, засобів самої лінії [7]. Найменш завадостійкими є радіолінії. Тому, передаючи дані по радіоканалу, необхідно вживати додаткові заходи для підвищення достовірності прийнятих даних.

Одним із можливих виходів із цієї ситуації є розробка і використання методів завадостійкого кодування (самокоригування кодування), які дають змогу виправляти прийняті дані на боці приймача без запитів повторної передачі. Такий підхід особливо зручний при симплексному режимі зв'язку. Використання кодування з виправленням помилок, звичайно ж, веде до надлишковості

передаваних даних, які крім інформаційних бітів містять також і контрольні. Ця властивість коду відображається у зменшенні пропускну здатності каналу. Таке кодування також називають кодуванням з прямим виправленням помилок (FEC – Forward Error Correction). Методи FEC є прийнятнішими порівняно із запитом повторної передачі в одному із таких випадків:

- Зворотний канал недоступний або затримка під час використання запитів повторної передачі занадто велика.

- Алгоритм повторної передачі неможливо реалізувати зручним способом.

- При очікуваній кількості помилок вимагається занадто багато повторних передач.

Як кінцеві пристрої прийому/передачі даних у цьому проекті використовують радіомодеми CYPRESS WirelessUSB, які мають такі основні характеристики:

- Частота роботи 2.4 ГГц входить у діапазон неліцензійних частот у всьому світі, крім Східної Європи.

- Дальність дії сягає 10 м (без підсилювача, з підсилювачем до 1 км).

- Модуляція методом розширення спектра прямою послідовністю.

- SPI інтерфейс для зв'язку з мікроконтролером.

- Високоінтегрована дешева мікросхема з мінімальною кількістю зовнішніх компонентів.

- Швидкість передачі даних до 62.5 Кбіт/с.

Детальнішу інформацію по цих радіомодемах можна знайти, звернувшись до технічної документації мікросхем CYWUSB6932/ CYWUSB6934 [2].

Однією з переваг цих радіомодемів є їхня апаратна можливість детектувати хибно прийняті біти, тим самим забезпечуються додаткові засоби, які спрощують розробку завадостійких кодів.

**Аналіз публікацій.** Наявні нароби з прямої корекції помилок в каналі передачі даних були запропоновані у реалізації протоколу для безпроводних HID-пристроїв фірми CYPRESS [5]. Метод характеризується невисокими показниками відтворення пошкоджених бітів. Він застосовується до цілого пакета інформації, який отримано з радіоканалу. Цей код відтворює затерті біти лише у різних бітових позиціях байтів. Тобто не допускається затирання двох або більше однакових бітових позицій у байтах пакета. Основною перевагою методу є його низька надлишковість (1 байт контрольної суми на пакет). З іншого боку, із збільшенням довжини пакета відтворювальні властивості коду погіршуються. На противагу до наявної реалізації був розроблений байт-орієнтований метод корекції помилок. Виправлення помилок в такому разі може здійснюватися як на рівні цілого пакета (захист контрольною сумою з можливістю відтворення як у наявному коді), так і на рівні окремого байту.

**Постановка задачі.** Основною метою роботи є покращання характеристик наявних кодів корекції для протоколу безпроводних HID-пристроїв CYPRESS. Це питання набуває актуальності із поширенням бездротових технологій серед HID-периферії ПК (миша, клавіатура, джойстики та інші маніпулятори) та розвитку мереж інтелектуальних давачів на базі радіозв'язку.

**Описання FEC-коду.** Згідно з властивостями кодів прямого виправлення помилок, розроблено завадостійкий код для радіомодемів CYPRESS WirelessUSB. У такому разі для підвищення достовірності прийнятих даних використовується додаткова інформація від приймача про хибно відкорельовані біти. Така можливість радіомодемів сприяє розробленню самокоригувальних кодів з високим ступенем корекції. Оскільки наявні засоби апаратного виправлення “затертих” бітів, тоді суть алгоритмів корекції зводиться до відновлення невідомих розрядів, без програмних витрат з їхнього виявлення. Тим не менш, існує дуже низька ймовірність того, що біт даних буде прийнято спотвореним, але корелятор розпізнає його як правильний. Така ситуація можлива тільки у разі наявності інтерференції у каналі передачі. Специфіка методу модуляції (розширення спектра прямою послідовністю) зводить таку ймовірність до мінімуму, але повністю не виключає її [1].

Основною розробленого методу корекції є код з перевіркою парності. Посилка одного байта інформації реалізується у два етапи: 1-й – кодування і передача молодшої тетради; 2-й – кодування і передача старшої тетради. Надлишковість коду досягає 100 %. Нижче наведена формула утворення коду:

$$\begin{aligned}
 \text{CODE} &= [S, m_4, m_3, m_2, m_1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= [S + m_4, m_4 + m_3, m_3 + m_2, m_2 + m_1, m_1 + m_4, m_3, S + m_2, m_1]
 \end{aligned} \tag{1}$$

Знак “+” у (1) означає операцію додавання за модулем 2 (виключне АБО). Розряди  $m_4, m_3, m_2, m_1$  виражають значення тетради, а біт  $S$  – визначає тип тетради (0 – молодша, 1 – старша). Введення цього біту було зумовлено тим, що він використовується на боці приймача для коректного формування байтів із потоку закодованих тетрад. Протокол передавання байта визначає спочатку послілку молодшої тетради, а потім старшої. Рис.1 відображає умовну часову діаграму передавання даних. Для зручності тетради показані не в закодованому вигляді.

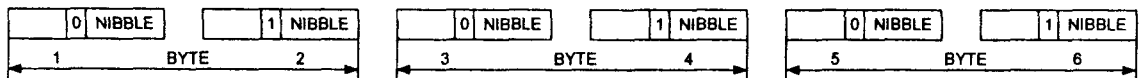


Рис.1. Часова діаграма передачі байтів по радіоканалу

При коректному прийомі даних, тетради 1 і 2, 3 і 4, 5 і 6 перетворюються відповідно у один байт корисних даних. Але, наприклад, внаслідок деяких умов, приймач почав працювати на межі першої та другої тетради. Тоді, якби не було розряду  $S$ , формування байтів виявилось наступним 2 і 3, 4 і 5, 6 і 7, що звичайно ж, неправильно. Тому біт  $S$  дає змогу коректно виявляти такі ситуації і він фактично є засобом синхронізації приймача до вхідного потоку даних.

Декодування вхідних даних здійснюється на основі прийнятої закодованої тетради і відповідного слова коректності цих даних. Наприклад, після прийому байта, радіомодем представляє таку інформацію:

DATA: xxxxxxxx – прийнятий байт;

VALID:10111101 – слово правильності прийнятого байта. Одиниця (1) в деякій позиції говорить про те, що у відповідному розряді слова DATA біт відкорельований правильно, а 0 – що цей біт “затертий”.

Декодування і корекцію виконують з урахуванням цієї інформації і їх здійснюють, розв’язуючи систему рівнянь:

$$\begin{aligned}
 S &= k_7 + m_4; \quad S = k_1 + m_2 \\
 m_1 &= k_0; \quad m_1 = k_3 + k_6 + k_2; \quad m_1 = k_4 + k_5 + k_2 \\
 m_2 &= k_4 + k_0; \quad m_2 = k_5 + k_2; \quad m_2 = k_1 + S \\
 m_3 &= k_2; \quad m_3 = k_6 + k_3 + k_0; \quad m_3 = k_5 + k_4 + k_0 \\
 m_4 &= k_3 + k_0; \quad m_4 = k_6 + k_2; \quad m_4 = k_7 + S \\
 \\ 
 k_7 &= S + m_4; \quad k_6 = m_4 + m_3; \quad k_5 = m_3 + m_2; \\
 k_4 &= m_2 + m_1; \quad k_3 = m_4 + m_1; \quad k_1 = S + m_2;
 \end{aligned} \tag{2}$$

Значення бітів  $k_7, \dots, k_0$  пояснює рис. 2.

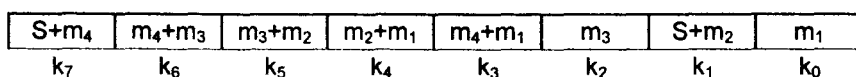


Рис. 2. Пояснення до (2)

Розв’язують систему, циклічно проходячи по кожному біту ( $S, m_1, m_2, m_3, m_4, k_7, \dots, k_0$ ) і пробуючи його відновити, якщо це можливо (відомі всі біти у правій частині рівняння). Умова закінчення циклу одна з двох:

– Всі інформаційні біти відновлені ( $S, m_4, m_3, m_2, m_1$ ).

– Якщо у результаті проходження циклу жоден біт не був відновлений – умова неможливості декодування вхідного слова.

Використовуючи запропоноване завадостійке кодування, вдається відновити 100 % одинарних помилок, 93 % – подвійних і 64 % – потрійних. У загальному код дає змогу виправляти 27 % помилково прийнятих слів від всіх можливих.

**Апаратна реалізація.** Апаратне рішення цього проекту представляється у двох аспектах: на внутрішньому рівні мікроконтролера PSoC, а також зовнішніми компонентами. Розглянемо кожний із них окремо.

Структурна схема системи безпроводного зв'язку подана на рис. 3. Ядром системи є мікроконтролер PSoC. Він виконує функції кодера/декодера, забезпечує інтерфейс з радіомодемом, а також підтримує зв'язок з персональним комп'ютером, який у такому разі використовується для тестових потреб. Радіомодем WirelessUSB виступає в ролі ресивера кодованих даних, тобто він забезпечує прослуховування радіоканалу і трансляцію даних в нього. Інтерфейс RS-232 використовують для полегшення тестування системи і по ньому передається інформація в некодованому вигляді. В остаточній реалізації деякого пристрою цей інтерфейс може бути упущено.

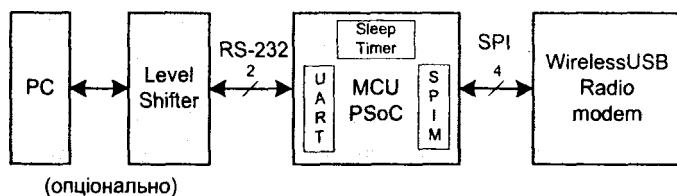


Рис. 3. Структурна схема радіосистеми

Необхідно звернути увагу на інтегральну компактність виконання радіовузла. Така можливість надається відмінними рисами використовуваної елементної бази. У цій розробці використовувалися системи на кристали фірми CYPRESS – PsoC і RSoC (PRoC). Програмована система на кристалі представлена мікроконтролером, який об'єднує в собі інтерфейсні вузли – SPI і UART, модуль таймера, а також програму, яка управляє всім процесом прийомо-передачі. Функції радіосистеми на кристалі виконує високоінтегрована дешева мікросхема CYWUSB6934 з мінімальною кількістю зовнішніх компонентів. Отже, отримують компактну систему з низькими ціновими показниками.

**Програмна реалізація.** Програмне забезпечення цього проекту складається з таких основних модулів:

– Підпрограми, які реалізують алгоритми завадостійкого кодування і декодування.

– Набір інтерфейсних функцій, що забезпечують зв'язок із радіомодемом.

– Підпрограми обробників переривань.

Розглянемо алгоритми приймання (рис. 5) та передавання (рис. 4) байта даних.

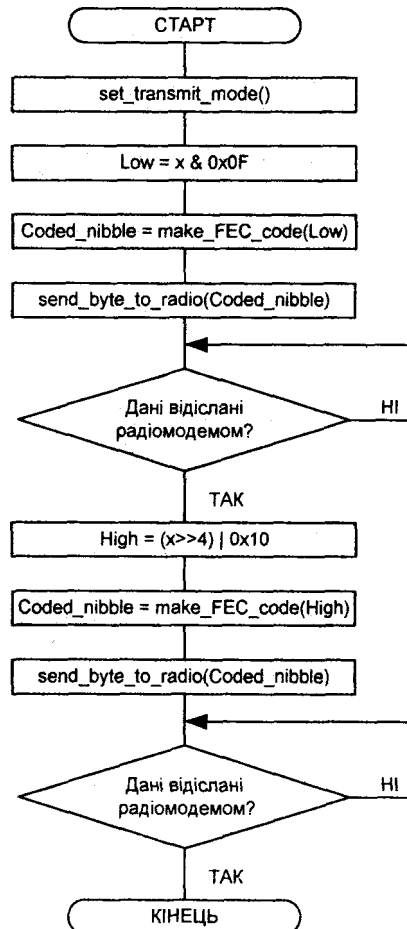


Рис. 4. Блок-схема послілки байта

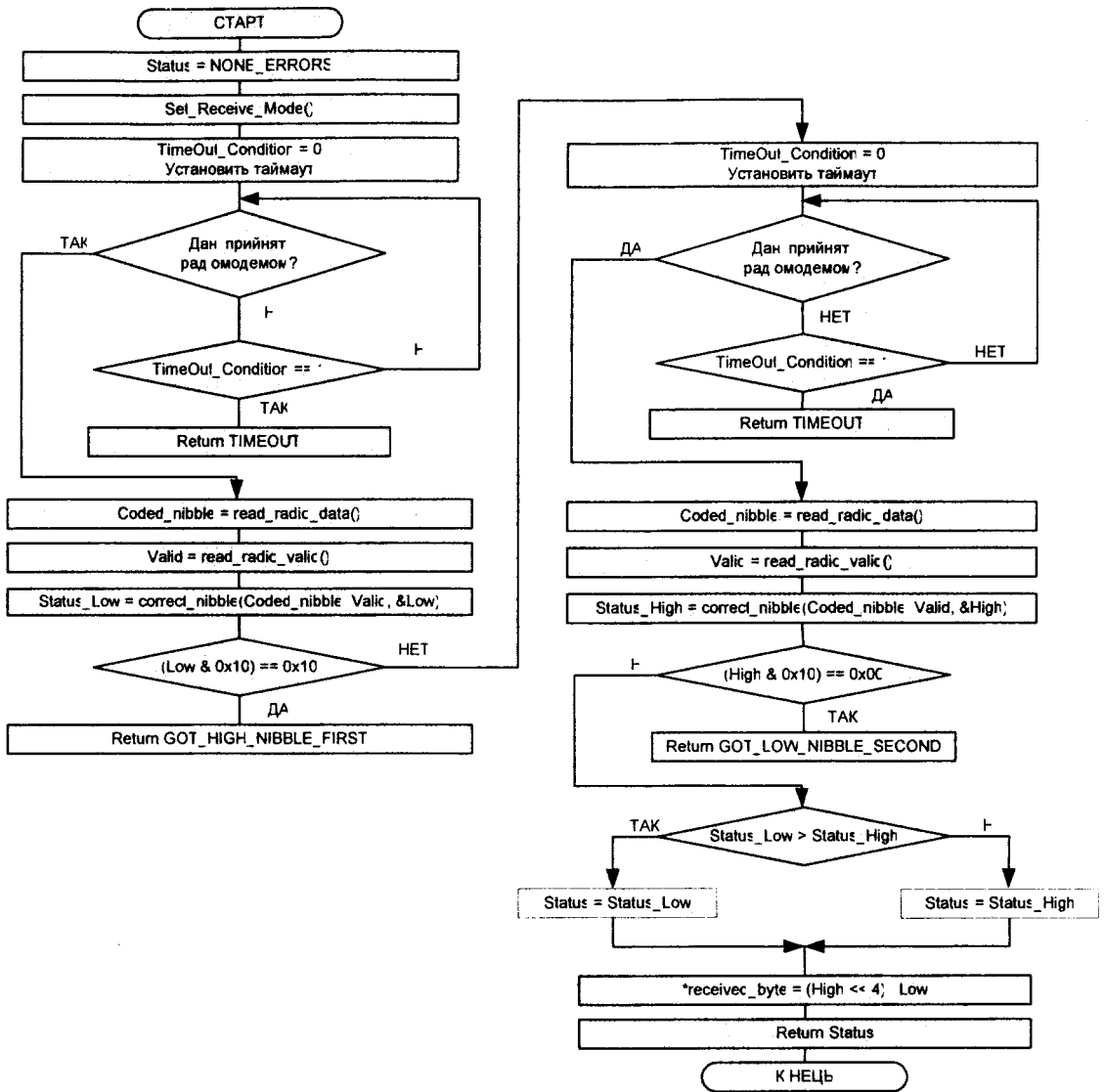


Рис. 5. Блок-схема прийому байта

**Тестові програми.** Як тестові програми використовувалися дві – приймач і передавач, а збір статистичних даних здійснювався на ПК по інтерфейсу RS-232.

Такий підхід візуалізує поточний стан радіоканалу, виводячи отримані дані, а у разі наявності помилок прийому – виводить тип дійсної нештатної ситуації (витік таймаут, помилки виправлені, неусувні помилки тощо).

Результати тестування показали, що радіосистема стійко працює з частотою проходження корисної інформації у середньому 450 байт/с. Теоретично можлива швидкість передавання корисних даних сягає 970 байт/с, що було виміряно на практиці. Але через обмежені можливості радіомодемів при роботі в байт-орієнтованому режимі, більшої швидкості, ніж 450 байт/с, досягти складно. Це зумовлено необхідністю організації невеликої паузи (що видно на рис. 1), перед тим, як передати наступний байт у радіоканал, що дає можливість корелятору приймача виявити границю між двома сусідніми байтами. Якщо ж цього не зробити, то можлива така ситуація. Припустимо, що пауза між передаванням двох сусідніх байтів практично дорівнює нулю. Тоді, якщо передавач почав транслювати дані в ефір, а приймач почав їх слухати з затримкою на деякий час, то приймач почне корелювати дані з вхідного потоку біт не на границі байта, а десь у його середині. Така ситуація приведе до того, що дані приймача будуть отримані зі зсувом на декілька біт в кожному черговому байті, що звичайно, ж буде неправильним. Тому для досягнення стабільної роботи системи було зменшено пропускну здатність каналу до 450 байт/с (при частоті передачі даних радіомодемом 15.625 Кбіт/с).

**Висновки.** У результаті виконаних робіт було розроблено метод прямої корекції помилок для радіомодемів CYPRESS WirelessUSB. Використання запропонованого методу повинно збільшувати достовірність прийнятих даних і надійність роботи радіосистеми. Це завдяки кодуванню є надлишковим, що веде до зменшення пропускну здатності радіоканалу вдвічі. Розроблене програмне забезпечення, дало змогу отримати стабільну передачу корисної інформації на швидкості близько 450 байт/с. Використовуючи запропоноване кодування, вдається відновити 100 % одинарних помилок, 93 % – подвійних і 64 % – потрійних. Загалом код дає змогу виправляти 27 % помилково прийнятих слів від усіх можливих. Не можна забувати, що метод не захищений від помилок корелятора внаслідок наявності інтерференції у радіоканалі, але ймовірність такого випадку мізерно мала. Цей метод зручно застосовувати у низькошвидкісних застосуваннях з симплексним режимом роботи.

1. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение.* – М., 2003.  
2. CYPRESS. *WirelessUSB™ LS 2.4-GHz DSSS Radio SoC. CYWUSB6932/ CYWUSB6934.* 3. CYPRESS. *WirelessUSB™ LS Theory of Operation.* 4. Cypress MicroSystems, *PSoC™ Mixed Signal Array CY8C29x66, CY8C27x66, CY8C27x43, CY8C24x23, and CY8C22x13 Technical Reference Manual.* 5. *WirelessUSB™ LS 1-Way HID Networks.* 6. *WirelessUSB™ LS 2-Way HID Systems.* 7. *Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В.Г.Олифер, Н.А.Олифер.* – СПб., 2001.

УДК 681.3

В.Т. Кремінь, А.С. Сметана

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронних обчислювальних машин

## МЕРЕЖА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ДАВАЧІВ НА БАЗІ PSoC

© Кремінь В.Т., Сметана А.С., 2005

Пропонується реалізація провідної мережі давачів із централізованим керуванням для використання в побутовій і офісній автоматичній, у промисловості, для сигналізації в пожежних і охоронних системах, для віддаленого керування освітленням та іншими застосуваннями, що потребують низькошвидкісного двостороннього обміну інформацією. Підкреслено переваги мікроконтролерів PSoC для виконання апаратної частини проекту, у результаті чого кінцева реалізація мережі має низьку вартість.

**The implementation of wired sensor network with centralized direction is proposed. It can be used for home/office automation, remote technological process monitoring and control, in various security/alarm system, remote light controlling and other applications which require the low-cost, low-speed bidirectional data communication. The PSoC's advantages are marked in the hardware project's side, which reflexes on the economical aspects of system utilization.**

**Вступ.** Нині – в епоху стрімкого прогресу мікроелектронної техніки і її впровадження практично в усі сфери людської діяльності (як на побутовому, так і на професійному рівнях), інженерам-розробникам необхідно створювати системи, які могли б спростити користування людини продуктами нових досягнень, та й просто заощадити час і людський ресурс там, де це можливо. Наприклад, присутність людини намагаються скоротити у багатьох виробничих циклах, замінюючи його автоматичними установками. Часто така ротація веде до підвищення продуктивності й загальної надійності роботи системи. Подібно й у побуті, особливо це застосовно до тенденції створення “розумних будинків”.

Отже, насиченість простору мікроелектронними вузлами (давачами, електронними кнопками тощо) повинна привести до створення центральних диспетчерських вузлів, які займалися б