

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ЯЦКІВ ВАСИЛЬ ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 004.75

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ І СТРУКТУРНА
ОРГАНІЗАЦІЯ КОМПОНЕНТІВ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ
ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ**

05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Науково-дослідному інституті інтелектуальних комп'ютерних систем Тернопільського національного економічного університету Міністерства освіти і науки України.

Наукові консультанти: заслужений винахідник України,
доктор технічних наук, професор
Саченко Анатолій Олексійович,
Тернопільський національний економічний університет,
завідувач кафедри
інформаційно-обчислювальних систем та управління;

доктор наук, професор
Юрген Зік (Jürgen Sieck),
Університет прикладних наук, м. Берлін, Німеччина

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дрозд Олександр Валентинович,
Одеський національний політехнічний університет,
професор кафедри комп'ютерних
інтелектуальних систем та мереж;

доктор технічних наук, професор
Дунець Роман Богданович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
завідувач кафедри спеціалізованих
комп'ютерних систем;

доктор технічних наук, професор
Опанасенко Володимир Миколайович,
Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова
НАН України, провідний науковий співробітник
відділу мікропроцесорної техніки

Захист відбудеться 1 липня 2016 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.08 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий 30 травня 2016 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, д. т. н., проф.



Я. Т. Луцик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Прогрес у галузі мікроелектроніки та безпроводних технологій передачі даних став основою для створення нового класу розподілених комп'ютерних систем – безпроводних сенсорних мереж (БСМ), які набувають дедалі ширшого застосування. БСМ є одним із сучасних і перспективних напрямків розвитку розподілених самоконфігурованих систем моніторингу й управління ресурсами та процесами.

Вузлами БСМ є малогабаритні пристрої, що виконують одночасно вимірювальні, обчислювальні й комунікаційні функції. Характерна їхня особливість полягає в обмеженості обчислювальних і комунікаційних ресурсів та вимог до тривалої роботи від автономного джерела живлення. Безпроводні вузли, як правило, не обмінюються повідомленнями між собою, а тільки передають дані своїх сенсорів і ретранслюють дані сенсорів інших вузлів на базову станцію. При цьому в системах моніторингу окремі вузли можуть знаходитись на значній відстані від базової станції, що висуває додаткові вимоги до протоколів маршрутизації та надійності передачі даних. Особливо гостро ця проблема стосується БСМ, які використовуються для збору й обробки мультимедійних даних.

Передача даних у БСМ – це найбільш енергозатратна операція, яка використовує понад 70% енергії, натомість локальна обробка даних у безпроводних вузлах дасть змогу зменшити енергозатрати на передачу даних за рахунок використання ефективних методів обробки та протоколів передачі даних.

Водночас використання БСМ у системах критичного застосування ставить підвищені вимоги до надійності та продуктивності функціонування на всіх рівнях взаємодії еталонної моделі відкритих систем.

З огляду на те, що БСМ використовують відкрите середовище передачі сигналів, важливою залишається проблема забезпечення високої надійності передачі даних, вирішення якої сприятиме підвищенню ефективності функціонування БСМ загалом.

Однак у процесі створення БСМ виникає така суперечність: у загальному випадку застосування методів обробки та передачі даних, що забезпечують високу надійність передачі, призводить до зниження продуктивності мережі або зростання обчислювальної складності і, відповідно, підвищення енергозатрат.

Існуючі підходи та методи обробки даних, які функціонують у позиційних системах числення, не можуть забезпечити підвищені вимоги до надійності передачі даних без зниження продуктивності мережі при обмежених апаратних ресурсах і використанні автономного живлення.

Значний теоретичний внесок у розвиток системи залишкових класів та її застосування в обчислювальній техніці зробили такі вчені: І. Я. Акушський, Д. І. Юдицький, В. М. Амербаєв, В. А. Торгашев, А. О. Коляда, В. А. Краснобаєв, Я. М. Николайчук, М. І. Червяков, О. А. Фінько, А. Омоді (A. Omondi), Б. Премкумар (B. Premkumar), Дж. Кардарілі (G. Cardarilli). Дослідження, що сприяли розвитку безпроводних сенсорних мереж та мережного кодування даних належать іншим відомим науковцям, серед яких: С. Г. Бунін, В. О. Романов,

В. А. Романюк, І. Акиїлдіз (I. Akyildiz), Р. Ахлсведе (R. Ahlswede), К. Фрагоулі (C. Fragouli) та ін.

Однак наявні праці у сфері обробки даних у системі залишкових класів та модулярній арифметиці не враховують ряд обмежень, які доцільно взяти до уваги при створенні безпроводних сенсорних мереж.

Таким чином, актуальною є науково-технічна проблема підвищення продуктивності та надійності функціонування безпроводних сенсорних мереж, вирішення якої зумовлює необхідність розробки комплексу методів, засобів і механізмів обробки даних на основі модулярної арифметики та системи залишкових класів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Розробка основних положень дисертаційного дослідження здійснювалась відповідно до планів НДР, програм і договорів, що виконувалися у Тернопільському національному економічному університеті:

– НДР на тему “Методи та засоби побудови безпроводних мультимедійних сенсорних мереж на основі модулярної арифметики” (номер державної реєстрації 0112U007886);

– НДР на тему “Безпроводні мультимедійні сенсорні мережі на основі модулярної арифметики та кодів Галуа для систем відеоспостереження” у межах програми двостороннього співробітництва між Україною та Китайською Народною Республікою у сфері науки і технологій (номер державної реєстрації 0113U004321);

– НДР на тему “Розробка теоретичних засад методів формування та цифрового опрацювання даних у розподілених спеціалізованих комп'ютерних системах” (номер державної реєстрації 0112U008458);

– НДР на тему “Розробка теорії та комп'ютерних засобів спеціалізованих комп'ютерних систем на основі теоретико-числових базисів Крестенсона – Галуа” (номер державної реєстрації 0106U012530);

– НДР на тему “Розробка теорії, методології побудови та технічних засобів спеціалізованих комп'ютерних систем” (номер державної реєстрації 0102U005764).

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи – підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом розвитку теоретичних основ та засобів перетворення, обробки і передачі даних.

Досягнення визначеної мети передбачає вирішення таких задач:

– проаналізувати сучасний стан та шляхи удосконалення методів обробки і передачі даних в безпроводних сенсорних мережах;

– розробити методи підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах на основі модулярної арифметики;

– розробити метод мережного кодування даних на основі перетворення системи залишкових класів;

– розробити метод обробки та стиснення зображень у сенсорних мережах;

– створити концепцію побудови безпроводних сенсорних мереж на основі принципів колективного інтелекту;

– удосконалити метод передачі даних на основі розширення спектра сигналів методом стрибкоподібної зміни частоти;

– синтезувати нові й удосконалити відомі алгоритми і протоколи передачі даних у безпроводних сенсорних мережах;

– побудувати структури та реалізувати на програмованих логічних інтегральних схемах компоненти безпроводних сенсорних мереж на основі розроблених методів.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення, обробки і передачі даних у безпроводних сенсорних мережах.

Предмет дослідження – методи та засоби перетворення, обробки і передачі даних у безпроводних сенсорних мережах на основі системи залишкових класів та модулярної арифметики.

Методи дослідження. При розв'язанні комплексу задач вирішуваної у дисертаційній роботі проблеми використовувались: теорія інформації та кодування, методи теорії чисел, методи завадостійкого кодування даних при розробці модулярних коректуючих кодів і методу мережного кодування; методи побудови розподілених комп'ютерних систем та принципи інтелекту рою при розробці концепції побудови безпроводних сенсорних мереж на основі колективного інтелекту; прикладна теорія цифрових автоматів, методи синтезу й аналізу цифрових схем при розробці пристроїв багаторівневого перетворення даних у системі залишкових класів; теорія та методи стиснення даних при розробці методу обробки зображень; теорія, методи і засоби проектування й імплементації цифрових систем на кристалі, мови опису апаратури при апаратній реалізації пристроїв перетворення та обробки даних.

Наукова новизна одержаних результатів:

1) вперше розроблено метод мережного кодування даних, який базується на перетворенні системи залишкових класів і забезпечує підвищення загальної пропускну здатності безпроводної сенсорної мережі за рахунок поділу пакетів даних на підпакети з використанням взаємно простих модулів різної розрядності та об'єднання пакетів даних у спільних вузлах для їхньої подальшої передачі;

2) вперше розроблено метод виправлення багатократних помилок на основі модулярних коректуючих кодів, який базується на розв'язанні системи модулярних рівнянь і забезпечує високу швидкодію та низьку обчислювальну складність процесів виявлення і виправлення помилок;

3) вперше розроблено метод контролю помилок при виконанні арифметичних операцій додавання, віднімання та множення даних на основі модулярних коректуючих кодів, який забезпечує виявлення і корекцію помилок при виконанні арифметичних операцій;

4) вперше розроблено метод перетворення та обробки зображень у системі залишкових класів, який забезпечує стиснення зображень без втрат і підвищення швидкодії процесу кодування / декодування за рахунок поділу зображення на частини та паралельної обробки окремих частин зображення;

5) розроблено концепцію побудови безпроводних сенсорних мереж на основі принципів колективного інтелекту та розподіленого процесора, яка, на відміну від відомих підходів, забезпечує виділення частини обчислювальних ресурсів безпроводних сенсорів для функціонування розподіленого процесора і високу живучість мережі за рахунок децентралізованого управління;

б) удосконалено модулярні коректуючі коди, які відрізняються від відомих тим, що обробляють дані, подані в позиційній системі числення, забезпечують високу швидкодію процесів обробки даних за рахунок паралельного виконання операцій модулярного множення та можливість адаптивної зміни коректуючої здатності кодів без зміни алгоритму роботи;

7) удосконалено метод передачі даних на основі стрибкоподібної зміни частоти, який базується на псевдовипадковій зміні частотного каналу і відрізняється від відомих методів тим, що забезпечує можливість виявлення помилок на фізичному рівні безпровідних сенсорних мереж за рахунок поділу даних у системі залишкових класів із розширеною системою модулів та передачі залишків на різних частотних каналах;

8) отримав подальший розвиток метод підвищення надійності передачі мультимедійних даних у безпровідних сенсорних мережах, який відрізняється від відомих методів можливістю виправлення пакетів помилок за рахунок формування транспонованої матриці даних, захищених модулярним коректуючим кодом, у кодері та виконання оберненої операції в декодері.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці засобів підвищення надійності та корисної пропускну здатності безпровідних сенсорних мереж. Зокрема, практичну цінність мають такі результати:

1) структурні та схемотехнічні рішення пристроїв завадостійкого кодування / декодування даних на основі модулярних коректуючих кодів для виправлення однократних символічних помилок на ПЛІС, які характеризуються низькою апаратною складністю та високою швидкістю обробки даних;

2) синтезовано на ПЛІС пристрій декодування даних на основі модулярних коректуючих кодів для виправлення помилок в двох символах, в якому пошук мультиплікативних обернених елементів реалізовано у вигляді таблиць, що забезпечило підвищення швидкодії виправлення помилок;

3) створено генератор Verilog-коду для синтезу на ПЛІС декодера модулярних коректуючих кодів, який автоматично генерує Verilog-код за заданими параметрами, що дозволило підвищити швидкість розробки та уникнути помилок при написанні коду;

4) розроблено пристрій перетворення 12-розрядних даних 16 сенсорів, при цьому перетворення вхідних даних сенсорів, поданих у системі залишкових класів, у двійкову систему числення реалізовано на основі попарного об'єднання залишків за двома модулями, що дозволило зменшити розрядність даних у процесі виконання проміжних обчислень;

5) розроблено протокол передачі даних на основі запропонованого методу мережного кодування даних, що дозволило підвищити загальну пропускну здатність каналів зв'язку безпровідних сенсорних мереж.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено:

– на підприємстві ТОВ “Тернопільське конструкторське бюро радіозв'язку “Стріла” при розробці системи контролю електричних підстанцій з використанням технології безпровідних сенсорних мереж;

- на підприємстві ТОВ “Яваре” при розробці розподіленого програмного забезпечення систем моніторингу;
- у корпорації “Cypress Semiconductor” при розробці апаратно-програмного забезпечення модулів CY8CKIT-050 PSoC 5 і CyFi (CYRF7936) для підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах;
- у КП “Тернопіль Інтеравіа” для підвищення ефективності роботи системи централізованого відеоспостереження міста Тернополя;
- при виконанні науково-дослідних робіт, які виконувались у Тернопільському національному економічному університеті;
- у навчальному процесі кафедр спеціалізованих комп’ютерних систем та інформаційно-обчислювальних систем і управління Тернопільського національного економічного університету при проведенні лекційних та лабораторних робіт з курсів “Проектування реконфігурованих апаратно-орієнтованих процесорів на програмованих логічних інтегральних схемах”, “Дослідження і проектування вбудованих КС”, “Системи передавання даних”, “Безпроводні комунікаційні системи”, а також при підготовці магістерських робіт зі спеціальностей “Спеціалізовані комп’ютерні системи” та “Інформаційні управляючі системи і технології”.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, які містяться в дисертації, отримані здобувачем особисто. В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: [1, 30] – запропоновано метод виявлення та виправлення помилок на основі модулярних коректуючих кодів; [2, 51, 52] – запропоновано метод перетворення і стиснення зображень у системі залишкових класів; [3] – запропоновано метод обробки та передачі даних на основі системи залишкових класів та багатошляхової маршрутизації; [5, 18, 34] – запропоновано модифікований метод стрибкоподібної зміни частоти та побудовано структуру передавача і приймача сигналів; [6] – запропоновано метод підвищення ефективності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах; [7] – розроблено алгоритм та структуру пристрою виявлення і виправлення помилок на основі модулярних коректуючих кодів; [8, 38] – розроблено алгоритм виправлення помилок на основі двовимірних коректуючих модулярних кодів; [10, 27] – запропоновано концепцію побудови безпроводних сенсорних мереж на основі колективного інтелекту; [16, 33] – запропоновано нелінійний метод перетворення даних у безпроводних сенсорних мережах; [20] – запропоновано метод передачі даних у безпроводних оптичних каналах зв’язку; [21, 48] – розроблено спецпроцесор обробки даних у системі залишкових класів; [22, 23, 35, 54] – запропоновано метод завадостійкого кодування сигналів на фізичному рівні комп’ютерних мереж; [26] – розроблено структуру пристрою перетворення паралельного двійкового коду у код системи залишкових класів; [28, 39] – запропоновано підхід до виявлення багатократних символічних помилок на основі модулярних коректуючих кодів; [29] – побудовано структуру та визначено функції безпроводної мережі системи контролю аварійних ситуацій; [31, 32] – розроблено алгоритм пошуку оптимальних маршрутів для стаціонарних та мобільних вузлів на основі методу мурашиних колоній; [36] – розроблено алгоритм шифрування даних в системі залишкових класів; [37] – проведено дослідження ефективності

розділення каналів зв'язку в системі залишкових класів; [40] – розроблено структуру модуля безпроводної сенсорної мережі системи контролю лісових пожеж; [43] – здійснено реалізацію на ПЛІС кодера / декодера модулярних коректуючих кодів; [49, 50] – запропоновано метод мережного кодування в системі залишкових класів.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи обговорювались і доповідались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, зокрема на: 3-rd, 5-th, 7-th, 8-th IEEE Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: IDAACS'2005 (Sofia, Bulgaria, 2005), IDAACS'2009 (Rende-Cosenza, Italy, 2009), IDAACS'2013 (Berlin, Germany, 2013), IDAACS'2015 (Warszawa, Poland, 2015); 1st and 2nd IEEE International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: IDAACS-SWS-2012, IDAACS-SWS-2014 (Offenburg, Germany, 2012, 2014); International Conference on Network Security, Wireless Communication and Trusted Computing, NSWCTC'2009, NSWCTC'2011, (Wuhan, China, 2009, 2011); International Conference Information Technology and Management Engineering "ITME 2011" (China, 2011); International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science", TCSET (Lvov-Slavsko, 2002, 2012, 2014); 6-th International Conference Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application. ACSN' 2013 (Lviv, Ukraine, 2013); 9-th International Scientific and Technical Conference Computer Science and Information Technologies, CSIT'2014 (Lviv, 2014); Міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні інформаційні і електронні технології, СІЕТ" (м.Одеса, 2009, 2010, 2012, 2013); 5-й Міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій" (м. Запоріжжя, 2010 р.); 4-й Науково-практичній конференції "Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації" (м. Вінниця, 2013); VI - й Українсько-польській науково-практичній конференції "Електроніка та інформаційні технології", ЕЛІТ-2014 (сmt Чинадієво, Україна, 2014); Міжнародній конференції "Контроль і управління в складних системах" (м. Вінниця, 2012, 2014).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 55 наукових праць, у тому числі: 22 статті в провідних фахових виданнях, з них 7 – у періодичних виданнях іноземних держав, 4 – у фахових виданнях України, які внесено до міжнародних наукометричних баз, 3 патенти України на винахід та 30 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій. 14 наукових праць індексовано в наукометричних базах *Web of Science* та *Scopus*.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаної літератури і додатків. Загальний обсяг роботи становить 327 сторінок, у тому числі 253 сторінки основного тексту, 117 рисунків, 27 таблиць та 7 додатків на 47 сторінках. Список літератури налічує 232 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень; показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульовано мету та основні задачі

досліджень; подано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів; визначено особистий внесок здобувача; наведено дані про апробацію, публікації за темою роботи та використання результатів дослідження.

У першому розділі проведено аналіз стану розробки безпроводних сенсорних мереж та сфер їхнього застосування. Розроблено узагальнену класифікацію БСМ за ознаками: технологія передачі, середовище передачі, тип вузла, тип живлення, площа розгортання і сфери застосування. Розкрито переваги використання програмованих логічних інтегральних схем як апаратних платформ безпроводних мультимедійних сенсорних мереж, які забезпечують високу обчислювальну потужність та можливість реконфігурації вузлів. Серед перспективних методів підвищення корисної пропускної здатності БСМ виділено методи мережного кодування і стиснення даних.

Показано, що для підвищення надійності передачі даних у БСМ необхідно вирішити проблему розробки нових коректуючих кодів, які забезпечуватимуть низьку складність алгоритмів обробки даних, матимуть низькі апаратні вимоги до реалізації алгоритмів (розрядність, тактова частота мікроконтролера, обсяг пам'яті) та даватимуть змогу реалізувати адаптивні схеми контролю помилок. Розкрито переваги використання системи залишкових класів для обробки і передачі даних у БСМ, зокрема малорозрядність, рівноправність, незалежність залишків та відсутність переносів між розрядами, що забезпечує можливість паралельного виконання арифметичних операцій. Виявлено недоліки й обмеження використання у БСМ коректуючих кодів СЗК, які накладаються умовою вибору зростаючої послідовності взаємно простих модулів при кодуванні даних, додатковими затратами ресурсів для перетворення даних у СЗК, а також значне зростання складності алгоритмів декодування при збільшенні розрядності повідомлень.

Проаналізовано критерії ефективності роботи безпроводних сенсорних мереж і визначено основні критерії, які необхідно враховувати при проектуванні БСМ. На основі проведеного аналізу окреслено перспективні напрямки підвищення ефективності роботи БСМ, серед яких: 1) обробка вхідних даних у безпроводних вузлах (стиснення, агрегування та перетворення даних); 2) підвищення загальної й корисної пропускної здатності каналів зв'язку (методи мережного кодування даних, протоколи багатошляхової маршрутизації, зменшення кількості службових даних у протоколах передачі); 3) підвищення надійності передачі даних (використання коректуючих кодів та адаптивних схем контролю помилок); 4) мінімізація обчислювальних затрат на всіх етапах руху даних сенсорів.

Другий розділ присвячений розробці методів ефективного використання і підвищення корисної пропускної здатності безпроводних сенсорних мереж.

Розроблено новий метод мережного кодування даних у БСМ на основі перетворення системи залишкових класів, суть якого полягає в наступному: нехай потрібно передати повідомлення X_1 і X_2 вузлу S . Для цього вибираємо взаємно прості модулі p_1, p_2, p_3, p_4 . У вузлі A повідомлення X_1 розділяємо на залишки з використанням модулів p_1, p_2 , отримаємо: $b_1 = X_1 \pmod{p_1}$, $b_2 = X_1 \pmod{p_2}$. У вузлі B повідомлення X_2 розділяємо на модулі p_3, p_4 : $b_3 = X_2 \pmod{p_3}$, $b_4 = X_2 \pmod{p_4}$. Отримані залишки передаємо відповідними маршрутами (рис. 1).

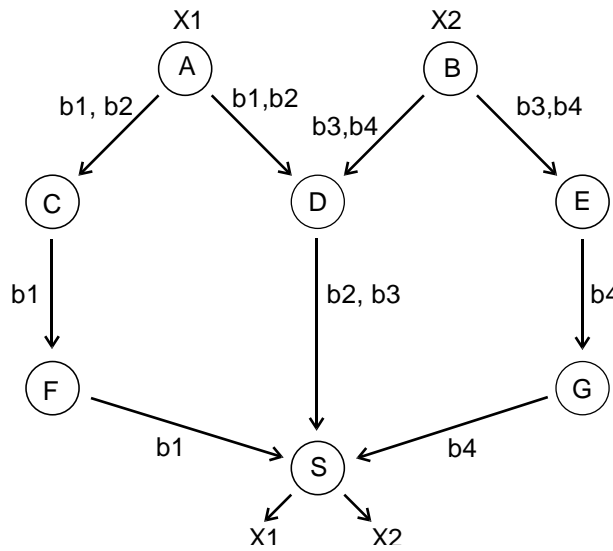


Рисунок 1 – Передача залишків при мережному кодуванні

У проміжному вузлі D відбувається об'єднання залишків b_1, b_2, b_3, b_4 за формулою:

$$X = \left(\sum_i^n B_i \cdot b_i \right) \bmod P, \quad (1)$$

де n – кількість модулів; B_i – базисні числа, $B_i = \delta_i \cdot m_i$, $\delta_i = \frac{R}{p_i}$, $P = \prod_{i=1}^n p_i$,

$\delta_i \cdot m_i \equiv 1 \pmod{p_i}$; m_i – коефіцієнт, який знаходиться в діапазоні $0 < m_i < p_i$, і формування нових залишків за модулями p_2, p_3 :

$$b_5 = X \pmod{p_2}, \quad b_6 = X \pmod{p_3},$$

або

$$b_5 = X \pmod{p_5},$$

де $p_5 = p_2 \cdot p_3$.

В результаті формується пакет даних, який містить залишки та значення взаємно простих модулів:

$$\{b_1, b_2, \dots, b_i \dots b_n \mid p_i, p_{i+1}\}.$$

У вузлі S відбувається об'єднання залишків за формулою (1) та здійснюється обчислення значень $X1 = X \pmod{p_1 \cdot p_2}$ і $X2 = X \pmod{p_3 \cdot p_4}$.

Для рівномірного розподілу навантаження в мережі запропоновано вибирати взаємно прості модулі різної розрядності таким чином, щоб незалежними маршрутами (A-C-F-S) та (B-E-G-S) передавались залишки більшої розрядності, а спільним маршрутом (D-S) – залишки меншої розрядності (див. рис. 1).

Оцінювання загальної пропускної здатності мережі проведено на топології, яка налічує $l = 50$ вузлів. Швидкість передачі даних згідно зі стандартом IEEE 802.15.4 дорівнює 250 кбіт/с. Джерело інформації (сенсор) формує повідомлення X розрядністю 32 біти. Для кожного вузла мережі вибираємо два взаємно простих модулі з умови $X_{\max} < p_i \cdot p_j$. Модулі для одного вузла мережі вибираються різної розрядності: $\lceil \log_2 p_i \rceil = 22$ біт і $\lceil \log_2 p_{i+1} \rceil = 11$ біт. Необхідна кількість модулів становить $n = 2 \cdot l$.

На основі проведеного розрахунку часу передачі повідомлень побудовано залежності загальної пропускної здатності мережі від розміру повідомлення, який становить 8 – 64 біт (рис. 2).

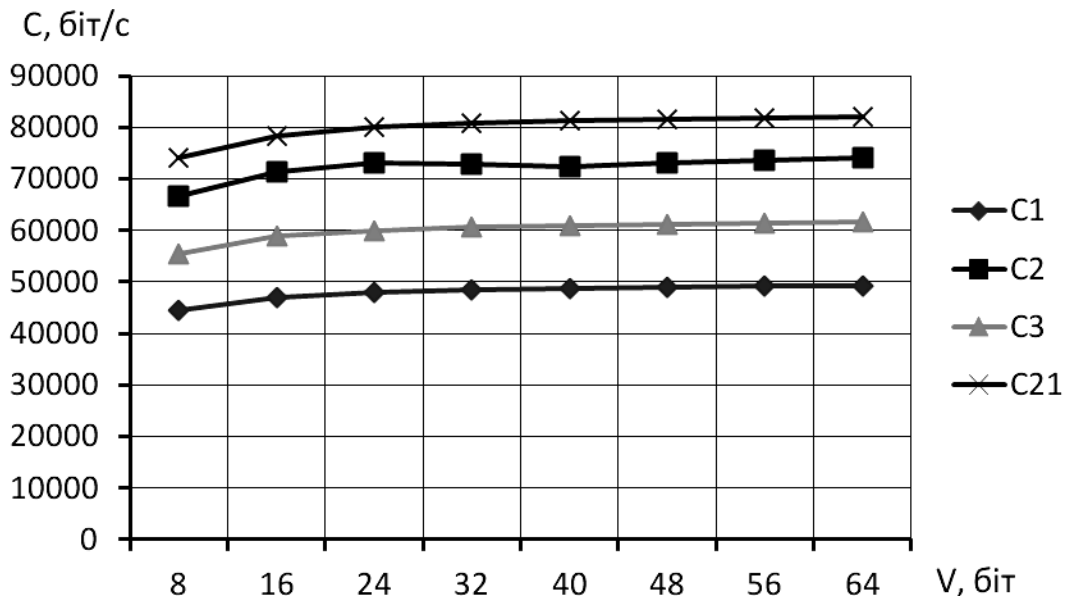


Рисунок 2 – Залежність загальної пропускної здатності мережі від розміру повідомлень для різних схем мережного кодування: C1 – передача двох залишків на кінцевий вузол; C2 – передача окремих залишків різними маршрутами; C3 – передача двох залишків на сусідні вузли з подальшою ретрансляцією тільки одного залишку; C21 – об'єднання залишків у спільних вузлах маршруту з використанням модулів різної розрядності

Найбільшу пропускну здатність мережі забезпечує схема C21, в якій залишки передаються по окремих маршрутах (див. рис. 2). Оскільки взаємно прості модулі вибрано різної розрядності, то розрядність залишків, які передаються по спільному маршруту, приблизно дорівнює розрядності залишків на окремих маршрутах. Це дало змогу досягти рівномірного розподілу навантаження на канали передачі БСМ.

Розроблено модифікований метод перетворення та передачі даних, який базується на розширенні спектра сигналу методом стрибкоподібної зміни частоти і перетворенні системи залишкових класів. Двійковий код числа N , яке підлягає передачі, подається у вигляді залишків b_i за вибраною системою модулів $(p_1, p_2, \dots, p_{k-1}, p_k)$:

$$N = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_k\}.$$

Отримані залишки передаються за допомогою визначених наборів частот $f_1 \dots f_n$, вибір яких здійснюється за псевдовипадковим законом (рис. 3). Зміна частотного каналу відбувається через визначені інтервали часу, протягом якого відбувається передача бітів, що відповідає розрядності залишків b_i . У приймачі відбувається зворотне перетворення даних, поданих у системі залишкових класів, у позиційну систему числення. Для виправлення помилок у залишку за одним модулем достатньо розширити систему модулів з $(p_1, p_2, \dots, p_{k-1}, p_k)$ до $(p_1, p_2, \dots, p_{k-1}, p_k, p_{k+1}, p_{k+2})$ або зменшити робочий діапазон до $(p_1, p_2, \dots, p_{k-2})$.

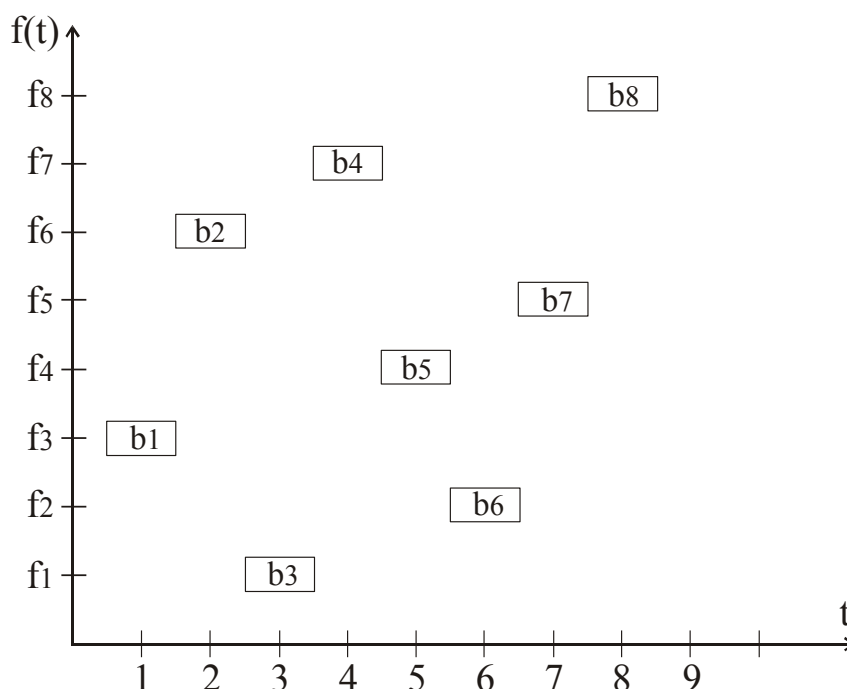


Рисунок 3 – Передача залишків методом стрибкоподібної зміни частоти

Розроблений метод забезпечує захист від спланованих завад за рахунок передачі залишків на різних частотах і таким чином підвищує надійність передачі даних на фізичному рівні БСМ. Оскільки вибір несучої частоти здійснюється за псевдовипадковим законом, то поява випадкових чи спланованих завад на одній із несучих частот призведе до спотворення залишків тільки за одним модулем, що можна виправити за допомогою двох перевірочних модулів.

Розроблено метод перетворення та обробки зображень у безпроводних сенсорних мережах, який базується на переході від додання пікселів зображення у двійковій системі числення до їхнього подання у системі залишкових класів. Оскільки пікселі зображення при 8-бітному поданні приймають значення в діапазоні від 0 до 255, то для їхнього подання у СЗК вибираємо систему взаємно простих модулів: $\{p_1 = 5, p_2 = 7, p_3 = 8\}$, оскільки $P = 5 \times 7 \times 8 = 280$. З цифрової камери компоненти зображення у форматі RGB надходять на перетворювач з двійкового коду в код СЗК, на виході якого отримуємо залишки b_i від ділення значень пікселів на вибрану систему модулів p_i (рис. 4).

$$A = \begin{pmatrix} 95 & 111 & 119 & 125 & 132 & 130 \\ 95 & 111 & 120 & 127 & 134 & 130 \\ 95 & 112 & 121 & 130 & 134 & 128 \\ 100 & 115 & 122 & 131 & 135 & 130 \\ 105 & 118 & 124 & 132 & 137 & 132 \\ 104 & 119 & 124 & 131 & 137 & 135 \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{ccc} \swarrow & \downarrow & \searrow \\ A \pmod{5} & A \pmod{7} & A \pmod{8} \end{array}$$

$$A \pmod{5} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 4 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 4 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 4 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 4 & 2 & 2 & 2 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A \pmod{7} = \begin{pmatrix} 4 & 6 & 0 & 6 & 6 & 4 \\ 4 & 6 & 1 & 1 & 1 & 4 \\ 4 & 0 & 2 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 3 & 5 & 2 & 4 \\ 0 & 6 & 5 & 6 & 4 & 6 \\ 6 & 0 & 5 & 5 & 4 & 2 \end{pmatrix}$$

$$A \pmod{8} = \begin{pmatrix} 7 & 7 & 7 & 5 & 4 & 2 \\ 7 & 7 & 0 & 7 & 6 & 2 \\ 7 & 0 & 1 & 2 & 6 & 0 \\ 4 & 3 & 2 & 3 & 7 & 2 \\ 1 & 6 & 4 & 4 & 1 & 4 \\ 0 & 7 & 4 & 3 & 1 & 7 \end{pmatrix}$$

Рисунок 4 – Розділення зображення у СЗК

Отримані масиви залишків надходять на кодер, який здійснює подальшу обробку (стиснення) зображення, поданого залишками, з використанням методу арифметичного кодування (рис. 5). З виходу кодерів стиснуті послідовності залишків надходять на передавальні пристрої.

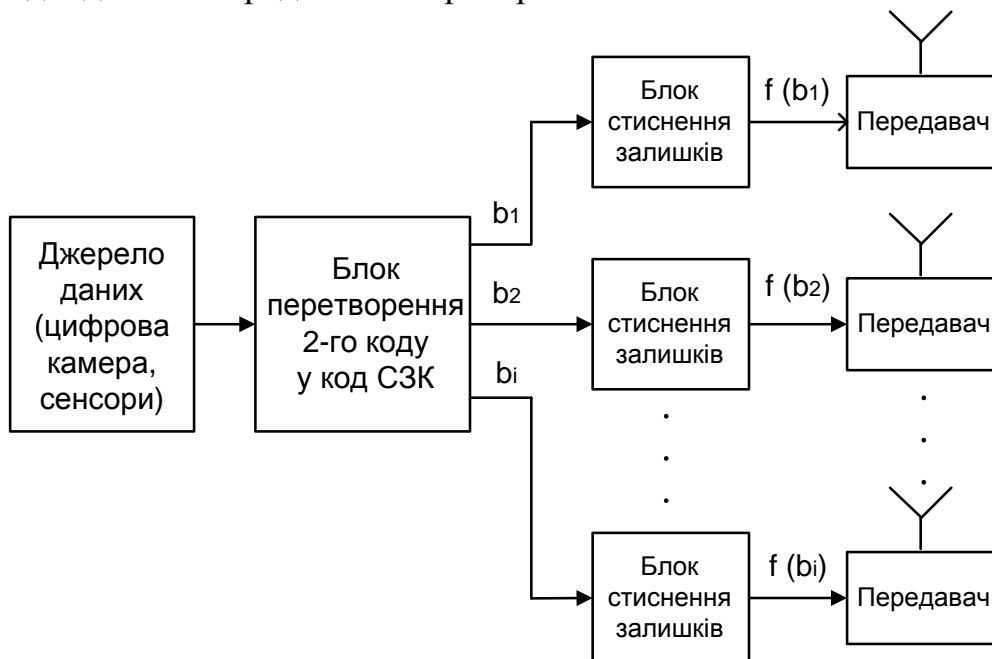


Рисунок 5 – Схема перетворення та обробки зображення

В декодері відбувається відновлення повідомлень з використанням алгоритму арифметичного декодування. Після відновлення залишки надходять на блок перетворення з коду СЗК у двійковий код (рис. 6).

З огляду на те, що зворотне перетворення СЗК повністю відновлює вхідні дані, запропонований метод забезпечує стиснення зображень без втрат якості. Дослідження коефіцієнта стиснення частин зображень, поданих залишками, проводилися на тестових зображеннях та файлах інших типів (табл. 1).

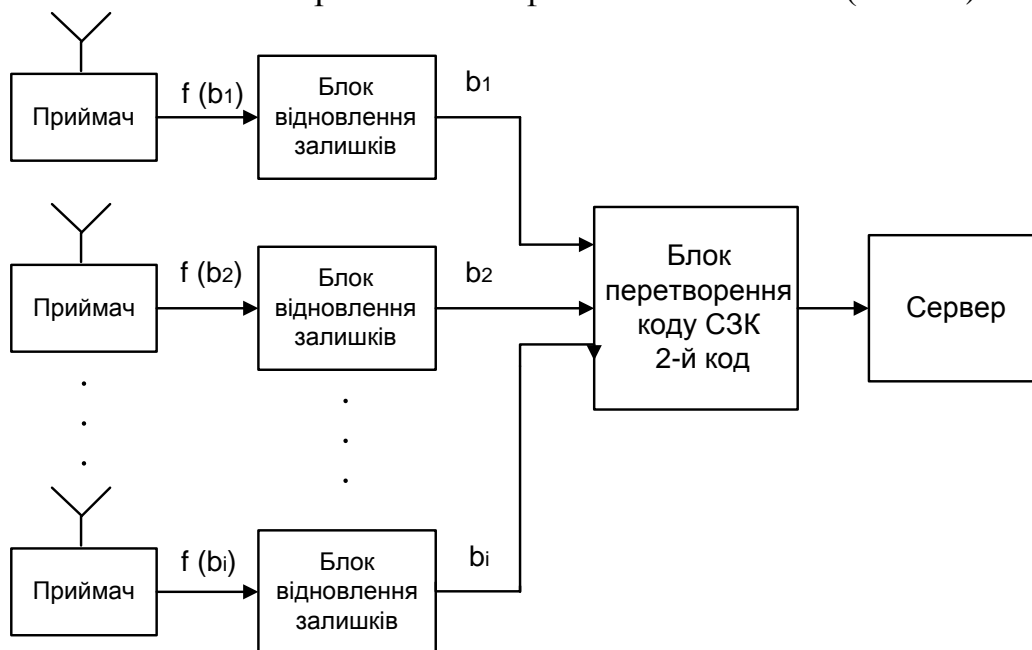


Рисунок 6 – Схема приймання та відновлення зображення

Таблиця 1 – Стиснення даних поданих у системі залишкових класів

Назва і тип файлу	Розмір файлів із залишками за модулями, байт			Розмір стиснутих файлів із залишками, байт			Коефіцієнт стиснення, %
	P_1	P_2	P_3	P_1	P_2	P_3	
laptop.jpg	1173641	1219937	1237525	431314	487334	514055	13,9
intel.jpg	276539	283346	292528	102439	116094	121131	14,8
imagePi.jpg	137331	140767	143709	51596	58127	60939	17,3
lena.tiff	517321	531654	534935	196056	222433	232466	17,2
numb.tiff	156115	159553	160167	60434	68516	71658	23,5
monarch.tif	680073	689737	690486	266415	301166	315092	25,2
info.doc	27543	27649	27327	8795	9657	9434	54,6
sensor1.txt	58589	58589	58589	13978	15654	16911	69,4
sensor2.txt	697304	697304	697304	167502	191626	207780	68,7
sensor.zip	58813	61517	62226	21413	24447	25967	12,9

Результати досліджень показали, що запропонований метод перетворення та обробки забезпечує коефіцієнт стиснення в діапазоні від 13% до 24% і залежить від формату зображення, для файлів з розширенням txt та doc вказаний коефіцієнт знаходиться в діапазоні від 54% до 69%. За рахунок обробки даних малої розрядності (розрядність залишків становить 3 біти) і паралельної роботи блоків стиснення отримуємо підвищення швидкодії стиснення зображення в 2–3 рази (табл. 2).

Таблиця 2 – Час стиснення вхідного файлу та файлів залишків

Назва і тип файлу	Розмір файлу, байт	Час стиснення вхідного файлу, мс	Час стиснення файлу залишків, мс	Підвищення швидкодії, разів
laptop.jpg	1664005	2217	852	2,60
intel.jpg	398977	557	226	2,46
imagePi.jpg	206281	318	146	2,18
lena.tiff	786572	1038	572	1,81
numb.tiff	262278	342	154	2,22
monarch.tif	1179784	1299	407	3,19
info.doc	61440	90	46	1,96
sensor1.txt	152332	147	59	2,49
sensor2.txt	1812992	1003	582	2,24
sensor.zip	82500	146	65	2,25

У третьому розділі розглянуто питання підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах. Розроблено коректуючі коди на основі модулярної арифметики, в яких пакет даних у двійковому коді, що підлягає передаванню, розбивається на блоки однакової довжини (тетради або байти). Нехай $X \equiv (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k)$ – кортеж символів заданої розрядності, який необхідно передати; $E_i \equiv (0, 0, \dots, e_i, \dots, 0)$ – код помилки; $X' \equiv (x'_1, x'_2, \dots, x'_i, \dots, x'_k)$ – кортеж символів у результаті дії завад:

$$\begin{aligned} (x'_1, x'_2, \dots, x'_i, \dots, x'_k) &= (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k) + \\ &+ (0, 0, \dots, e_i, \dots, 0) = (x_1, |x_2 + e_i|_P, \dots, x_i, \dots, x_k). \end{aligned}$$

Значення перевірного символу

$$x_{k+1} = |(v_1 \cdot x_1 + v_2 \cdot x_2 + \dots + v_i \cdot x_i + \dots + v_k \cdot x_k)|_P, \quad (2)$$

де v_i – коефіцієнти взаємно прості з P ; $|\bullet|_P$ – операція отримання залишку за модулем P ; x_i – повідомлення в позиційній системі числення розрядністю 4 або 8 біт.

На основі прийнятих даних $(x'_1, x'_2, \dots, x'_i, \dots, x'_k)$ декодер обчислює значення перевірного символу:

$$x'_{k+1} = |(v_1 \cdot x'_1 + v_2 \cdot x'_2 + \dots + v_i \cdot x'_i + \dots + v_k \cdot x'_k)|_P. \quad (3)$$

Виявлення помилки відбувається на основі обчислення синдрому δ , який показує різницю між отриманим перевірочним символом і перевірочним символом, обчисленим на приймальній стороні (в декодері):

$$\delta = |x'_{k+1} - x_{k+1}|_P.$$

Отже, якщо синдром дорівнює нулю $\delta = 0$, то помилки немає.

За відсутності помилки $x'_i = x_i$ і, відповідно, $x'_{k+1} = x_{k+1}$, тобто якщо $\delta \neq 0$ є помилка, отже, $x'_i \neq x_i$, і, як наслідок $x'_{k+1} \neq x_{k+1}$.

Для виправлення помилок необхідно, щоб значення синдрому δ було унікальне для всіх можливих варіантів помилки. Ця умова виконується при дотриманні таких співвідношень:

1) значення контрольного модуля $P > 2 \cdot k \cdot (2^m - 1)$, де k – кількість інформаційних символів; m – розрядність символів;

2) коефіцієнти v_i – взаємно прості з P , тобто найбільший спільний дільник $\gcd(v_i, P) = 1$.

Локалізація помилки здійснюється шляхом порівняння синдрому δ з таблицею попередньо знайдених розв'язків рівняння $S_{ij} = |v_i \cdot e_{ij}|_P$ для всіх $-2^m - 1 < e_{ij} < 2^m - 1$, де $i = 1, \dots, k$, $j = -2^m - 1, \dots, 2^m - 1$.

На основі аналізу значень S_{ij} можна визначити символ, в якому відбулася помилка. Для виправлення помилки в одному символі необхідно розв'язати рівняння:

$$\delta = |x'_{k+1} - x_{k+1}|_P = |v_i \cdot |x'_i - x_i|_P|_P.$$

Оскільки $x'_i = |x_i + e_j|_P$, то $|v_i \cdot ||x_i + e_j|_P - x_i|_P|_P = S_{ij}$,

$$|v_i \cdot x_i + v_i \cdot e_j - v_i \cdot x_i|_P = S_{ij},$$

звідси випливає, що

$$S_{ij} = |v_i \cdot e_j|_P. \quad (4)$$

З рівняння (4) знаходимо значення помилки e_j . Відповідно, правильне значення інформаційного символу дорівнює: $x_i = x_i' - e_j$. Отже, наявність одного перевірного символу забезпечує виправлення помилки у будь-якому одному інформаційному символі.

Розроблено метод виявлення та виправлення багатократних помилок. Метод виправлення багатократних помилок розглянемо на прикладі виправлення помилок у двох інформаційних символах. Для цього вводимо додатковий перевірений символ x_{k+2} і вибираємо взаємно прості коефіцієнти w_i .

Значення перевірного символу

$$x_{k+2} = |(w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + \dots + w_i \cdot x_i + \dots + w_k \cdot x_k)|_P, \quad (5)$$

а з урахуванням помилки:

$$x_{k+2}' = |(w_1 \cdot x_1 + v_2 \cdot x_2 + \dots + w_i \cdot x_i' + \dots + w_k \cdot x_k)|_P.$$

В результаті отримаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} |(v_1 \cdot x_1 + v_2 \cdot x_2 + \dots + v_i \cdot x_i + \dots + v_k \cdot x_k)|_P = x_{k+1} \\ |(w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + \dots + w_i \cdot x_i + \dots + w_k \cdot x_k)|_P = x_{k+2} \end{cases}$$

і визначимо синдром

$$\delta_1 = |v_1 \cdot (x_1' - x_1) + v_2 \cdot (x_2' - x_2) + \dots + v_i \cdot (x_i' - x_i) + \dots + v_k \cdot (x_k' - x_k)|_P, \quad (6)$$

$$\delta_2 = |w_1 \cdot (x_1' - x_1) + w_2 \cdot (x_2' - x_2) + \dots + w_i \cdot (x_i' - x_i) + \dots + w_k \cdot (x_k' - x_k)|_P. \quad (7)$$

При $\delta_1 = 0$ і $\delta_2 = 0$ помилки відсутні, в іншому випадку наявні помилки.

Припустимо, що помилки відбулися у двох символах (за відсутності помилки $x_i' - x_i = 0$), тоді рівняння (6) і (7) набудуть вигляду:

$$|v_i \cdot (x_i' - x_i) + v_{i+1} \cdot (x_{i+1}' - x_{i+1})|_P = \delta_1, \quad (8)$$

$$|w_i \cdot (x_i' - x_i) + w_{i+1} \cdot (x_{i+1}' - x_{i+1})|_P = \delta_2. \quad (9)$$

Розв'язавши рівняння (8) і (9), отримаємо правильні значення інформаційних символів x_i і x_{i+1} .

Для виявлення помилок в r інформаційних символах у кортежі даних, який складається із k інформаційних символів, необхідно здійснити $C_k^r = \frac{k!}{r!(k-r)!}$

ітерацій, наприклад, для $k=8$, $r=2$, $C_8^2 = 28$ ітерацій. Розроблений метод виправлення помилок у двох інформаційних символах може бути використаний для виправлення багатократних помилок.

Особливістю розроблених коректуючих кодів є можливість зміни розрядності та кількості інформаційних символів без зміни алгоритму формування перевірючих символів. Інакше кажучи, при збільшенні ймовірності помилки в каналі зв'язку достатньо збільшити кількість перевірючих символів. Така можливість дає змогу забезпечити необхідну надійність передачі даних при зміні характеристик каналів передачі даних у БСМ.

Для використання розробленого модулярного коректуючого коду на MAC рівні протоколу стандарту IEEE 802.15.4 поля MHR і MAC payload поділимо на п'ять блоків (D1 – D5) (рис. 7) з довжиною інформаційного блоку $k_i = 17$ байт. Перевірочні блоки R1 – R5 формуються за відповідним блоком даних і зберігаються після останнього блоку даних (рис. 7).

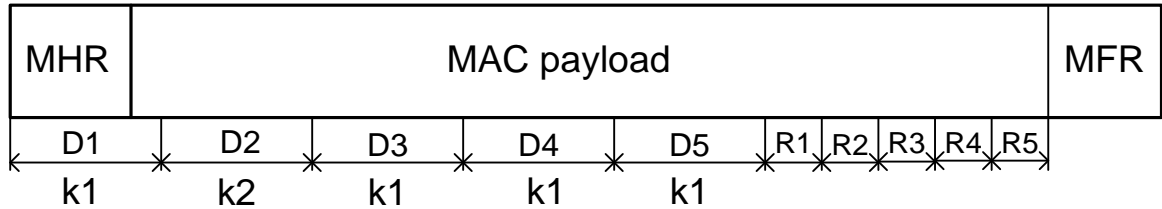


Рисунок 7 – Структура протоколу з використанням коректуючих кодів

При отриманні пакета даних здійснюється перевірка цілісності пакета з використанням CRC кодів. При виявленні у пакеті помилок здійснюється їхнє виправлення з використанням розроблених модулярних коректуючих кодів. Експериментальні дослідження часу формування перевірочних символів проводилися в середовищі Matlab для кодів Ріда – Соломона RS (127, 87), коректуючих кодів СЗК (R-код СЗК) та модулярних коректуючих кодів (М-код) з параметрами: $n = 25$, $k = 17$, $r = 8$, $t = 4$, де t - кількість помилок, які виправляє код.

Результати досліджень показали, що модулярний коректуючий код (М-код) дає змогу приблизно в 5 разів зменшити час формування коду порівняно з R-кодом СЗК і кодом RS (127, 87) при приблизно однаковій швидкості коду (табл. 3).

Таблиця 3 – Порівняння коректуючих кодів

Код	Тривалість формування коду, (мс)	Швидкість коду, $R = \frac{k}{n}$
М-код	22,5	0,680
R-код СЗК	117,5	0,640
RS (127, 87)	109,7	0,685

Ефективність кодування G визначається як зменшення величини E_b/N_0 , що досягається при використанні коректуючих кодів:

$$G = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_u - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_c \text{ (dB)},$$

де $(E_b/N_0)_u$ і $(E_b/N_0)_c$ – необхідне значення E_b/N_0 без кодування і з кодуванням; E_b – енергія біта; N_0 – спектральна густина потужності шуму.

Графічні залежності (рис. 8) розраховано для модуляції Offset Quadrature Phase-shift keying (OQPSK), яка використовується в стандарті IEEE802.15.4, та розробленого модулярного коректуючого коду.

Отже, використання завадостійкого кодування дає змогу зменшити значення E_b/N_0 з 10,5 дБ до 7,5 дБ при збереженні заданої надійності передачі, тобто ефективність кодування дорівнює 3 дБ. Використання коректуючих кодів у БСМ дозволяє підвищити загальну пропускну здатність за рахунок зменшення кількості повторних передач. При цьому розділення повідомлення на блоки і розміщення перевірочних символів у кінці поля даних забезпечує сумісність з існуючими мережами стандарту IEEE 802.15.4.

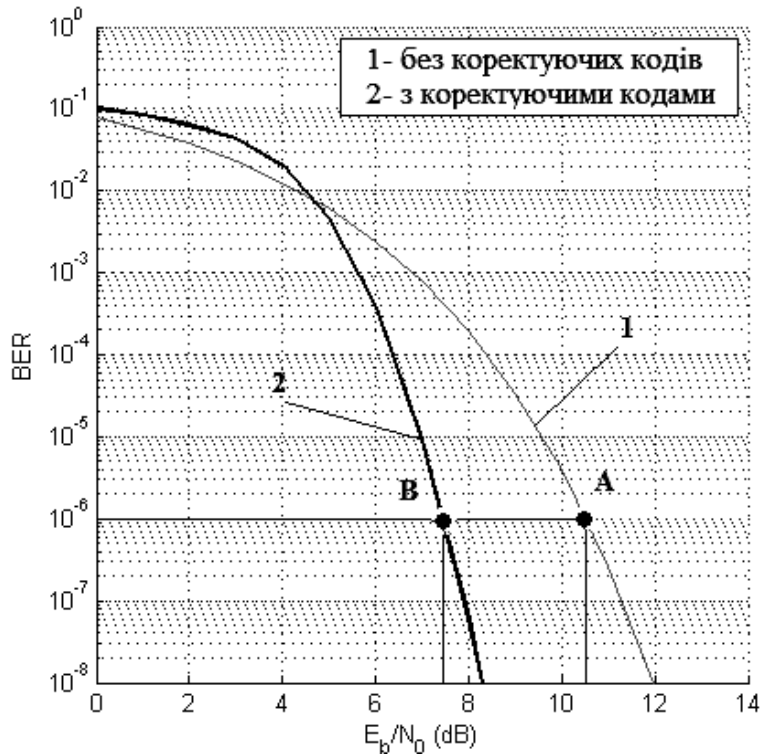


Рисунок 8 – Порівняння надійності передачі даних при використанні схеми без кодування і з кодуванням: BER – ймовірність бітової помилки

Розроблено метод виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій на основі модулярних коректуючих кодів.

Нехай арифметичні операції виконуються над операндами A , B , де $A = (a_{k-1}, \dots, a_i, \dots, a_1, a_0)$; $B = (b_{k-1}, \dots, b_i, \dots, b_1, b_0)$, a_i , b_i – розряди чисел A , B , подані в позиційній системі числення. Суть запропонованого методу полягає в наступному: для чисел A , B , над якими виконуються арифметичні операції, обчислюються контрольні символи:

$$a_k = |(v_{k-1} \cdot a_{k-1} + \dots + v_i \cdot a_i + \dots + v_0 \cdot a_0)|_P, \quad (10)$$

$$b_k = |(v_{k-1} \cdot b_{k-1} + \dots + v_i \cdot b_i + \dots + v_0 \cdot b_0)|_P, \quad (11)$$

де P – просте число; v_i – коефіцієнти, взаємно прості з P .

Арифметичні операції додавання, віднімання і множення виконуються над інформаційними і контрольними розрядами чисел відповідно A , B . З отриманого результату виконання арифметичних операцій над інформаційними символами обчислюється контрольний символ. Далі порівнюються значення контрольного символу, отриманого в результаті додавання контрольних символів чисел, та контрольного символу результату додавання інформаційних розрядів.

Операція додавання. Додавання інформаційних розрядів:

$$\begin{aligned} & (a_{k-1}, \dots, a_i, \dots, a_1, a_0) \\ & + (b_{k-1}, \dots, b_i, \dots, b_1, b_0), \\ & \hline & (c_{k-1}, \dots, c_i, \dots, c_1, c_0) \end{aligned}$$

де c_i – сума чисел a_i , b_i без урахування переносів між розрядами.

Сума контрольних символів:

$$|a_k + b_k|_P = c_k.$$

Обчислюємо контрольний символ із результату отриманого при додаванні операндів:

$$c'_k = |(v_{k-1} \cdot c_{k-1} + \dots + v_i \cdot c_i + \dots + v_0 \cdot c_0)|_P.$$

Для виявлення помилки обчислюємо різницю між двома контрольними символами:

$$s = |(c'_k - c_k)|_P,$$

якщо $s = 0$ – помилки нема, відповідно при $s \neq 0$ – наявна помилка.

Покажемо, що за відсутності помилок значення контрольних символів рівні: $c'_k = c_k$. Для цього запишемо їхні відповідні значення:

$$c'_k = |(v_{k-1} \cdot (a_{k-1} + b_{k-1}) + \dots + v_i \cdot (a_i + b_i) + \dots + v_0 \cdot (a_0 + b_0))|_P \quad (12)$$

і

$$c_k = |a_k + b_k|_P = |(v_{k-1} \cdot (a_{k-1} + b_{k-1}) + \dots + v_i \cdot (a_i + b_i) + \dots + v_0 \cdot (a_0 + b_0))|_P. \quad (13)$$

Оскільки праві частини виразів (12) і (13) однакові, то ліві частини за відсутності помилок також будуть однаковими.

Розглянемо виявлення помилок при виконанні операції *віднімання* двох чисел. Віднімання інформаційних розрядів двох чисел A, B :

$$(a_{k-1}, \dots, a_i, \dots, a_1, a_0) - (b_{k-1}, \dots, b_i, \dots, b_1, b_0) = d_{k-1}, \dots, d_i, \dots, d_1, d_0,$$

де d_i – різниця чисел a_i, b_i за модулем P , $d_i = |a_i - b_i|_P$.

Значення контрольних символів обчислюються за формулами (10) і (11), а різниця контрольних символів:

$$|a_k - b_k|_P = d_k.$$

Значення контрольного символу визначається за різницею операндів на основі формули:

$$d'_k = |(v_{k-1} \cdot d_{k-1} + \dots + v_i \cdot d_i + \dots + v_0 \cdot d_0)|_P.$$

Для виявлення помилки обчислюємо різницю між двома контрольними символами:

$$s = |(d'_k - d_k)|_P,$$

аналіз якої показує наявність помилки у випадку, якщо $s \neq 0$, або її відсутність при $s = 0$.

Аналогічно при виконанні операції додавання за відсутності помилок значення контрольних символів будуть рівними, тобто $d'_k = d_k$.

Операція множення. Для виявлення помилок при виконанні операції множення чисел A, B обчислимо лінійну згортку розрядів двох чисел $(a_{k-1}, \dots, a_i, \dots, a_1, a_0)$ і $(b_{k-1}, \dots, b_i, \dots, b_1, b_0)$ за формулою:

$$m(n) = \sum_{i=0}^n a(i) \cdot b(n-i),$$

де $n = 0 \dots (2 \cdot N - 2)$ при розрядності чисел $N - 1$.

При лінійній згортці розряди чисел зсуваються один відносно іншого, попарно перемножуються і додаються. В результаті отримуємо послідовність $(m_{2 \cdot k-1}, \dots, m_i, \dots, m_1, m_0)$, де m_i – розряди послідовності, які відображають добуток чисел A, B без урахування переносів між розрядами.

Контрольний символ операції множення обчислюємо як добуток контрольних символів чисел A, B :

$$|a_k \cdot b_k|_p = m_k.$$

За результатами згортки контрольний символ від послідовності $(m_{2 \cdot k-1}, \dots, m_i, \dots, m_1, m_0)$:

$$m'_{2k} = |(z_{2k-1} \cdot m_{2k-1} + \dots + z_i \cdot m_i + \dots + z_0 \cdot m_0)|_p,$$

де z_i – значення, отримані в результаті згортки коефіцієнтів v_i .

Для виявлення помилки обчислюємо різницю між двома перевірочними символами:

$$s = |(m'_{2k} - m_k)|_p.$$

Якщо $s = 0$ – помилки нема, відповідно при $s \neq 0$ – наявна помилка.

Виправлення помилки відбувається так само, як і при передачі даних, з використанням модулярних коректуючих кодів.

На основі розробленого методу синтезовано структурну схему пристрою виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій (рис. 9).

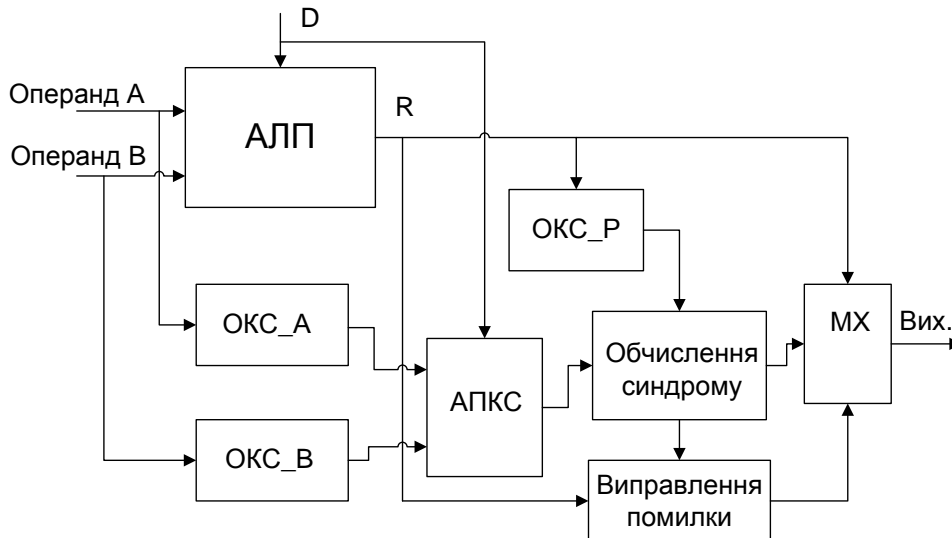


Рисунок 9 – Структурна схема блоку виявлення помилок при виконанні арифметичних операцій: АЛП – арифметико – логічний пристрій, ОКС_А – обчислювач контрольного символу А; ОКС_В – обчислювач контрольного символу В; ОКС_Р – обчислювач контрольного символу результату; АПКС – арифметичний пристрій виконання операцій над контрольними символами; МХ – мультиплексор, R – результат обчислення операндів; D – код операції

Операнди A, B надходять на АЛП (див. рис. 9), а також на ОКС_А і ОКС_В, де відбувається обчислення контрольного символу кожного операнда. Отримані значення подаються на вхід блоку АПКС, де виконується задана арифметична операція над контрольними символами операндів. Результат виконання

арифметичної операції R в АЛП надходять у блок ОКС $_R$, в якому обчислюється контрольний символ результату виконання арифметичної операції. У блоці обчислення синдрому визначається різниця між контрольним символом результату арифметичної операції і значенням, отриманим при виконанні арифметичної операції над контрольними символами операндів. Якщо результат обчислення синдрому дорівнює нулю, то на вихід мультиплектора МХ надходять дані з АЛП. При отриманні результату, відмінного від нуля, на вихід мультиплектора надходять дані з блоку виправлення помилок.

Таким чином, запропонований метод виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій (додавання, віднімання, множення) на основі модулярних коректуючих кодів забезпечує виправлення помилки в одному десятковому розряді при використанні одного контрольного символу.

Отримав подальшого розвитку метод виправлення пакетів помилок при передачі мультимедійних даних у безпроводних сенсорних мережах за рахунок використання декомпозиції пакетів і модулярних коректуючих кодів.

Нехай необхідно передати масив даних $A_1, A_2, \dots, A_k, A_{k+1}$, захищених модулярним коректуючим кодом:

$$\begin{aligned} A_1 &= (x_1^1, x_2^1, \dots, x_i^1, \dots, x_k^1, x_{k+1}^1), \\ A_2 &= (x_1^2, x_2^2, \dots, x_i^2, \dots, x_k^2, x_{k+1}^2), \\ A_j &= (x_1^j, x_2^j, \dots, x_i^j, \dots, x_k^j, x_{k+1}^j), \\ A_k &= (x_1^h, x_2^h, \dots, x_i^h, \dots, x_k^h, x_{k+1}^h), \end{aligned}$$

де x – інформаційний символ розрядності ω ; k – кількість інформаційних символів в пакеті; h – кількість рядків у масиві.

Принцип декомпозиції полягає в тому, що після обчислення перевірочних символів x_{k+1}^h нові пакети формуються по стовпцях, тобто в такій послідовності:

$$(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^h), (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^h), \dots, (x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^h), (x_{k+1}^1, x_{k+1}^2, \dots, x_{k+1}^h),$$

де $h = k + r$; r – кількість перевірочних символів.

При такій організації передачі даних і пакета помилок, довжина якого не перевищує k символів, спотворень можуть зазнати один або два сусідніх символи x_i^{j*} :

$$(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^h), (x_2^{1*}, x_2^{2*}, \dots, x_2^{h*}), (x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^h), (x_{k+1}^1, x_{k+1}^2, \dots, x_{k+1}^h),$$

або

$$(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^h), (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^{h*}), (x_k^{1*}, x_k^{2*}, \dots, x_k^h), (x_{k+1}^1, x_{k+1}^2, \dots, x_{k+1}^h).$$

На приймальній стороні прийняті пакети стають основою для формування початкового масиву даних, в якому пошкоджені символи потрапляють у різні блоки, що забезпечує виправлення помилок. Таким чином, використавши принцип декомпозиції даних та модулярні коректуючі коди, можемо виправляти пакети помилок довжиною k символів при одному перевірочному символі. При використанні двох перевірочних символів можна виправляти пакети помилок довжиною $2 \cdot k$, оскільки в одному рядку буде знаходитись не більше, ніж два пошкоджені символи.

У четвертому розділі запропоновано концепцію побудови БСМ на основі мурашкового інтелекту, яка базується на наступному. Управління БСМ здійснюється розподіленим процесором. При цьому кожний безпроводний вузол мережі є частиною цього розподіленого процесора. Інакше кажучи, безпроводний вузол виділяє частину своїх обчислювальних ресурсів для функціонування розподіленого процесора (рис. 10). Інша частина ресурсів задіяна у виконанні локальних операцій, зокрема у зборі та обробці даних сенсорів. Пам'ять безпроводного вузла розподілена на два сегменти: сегмент розподіленого процесора та сегмент локальних команд. Функціонування цього процесора забезпечується системою елементарних комунікацій між вузлами мережі. Розподілений процесор – спеціалізоване програмне забезпечення, яке фізично міститься у вузлах БСМ та відповідає за виконання таких функцій: управління топологією, маршрутизацією, енергоресурсами вузлів, розподілу ресурсів та балансування навантаження в мережі й ін.

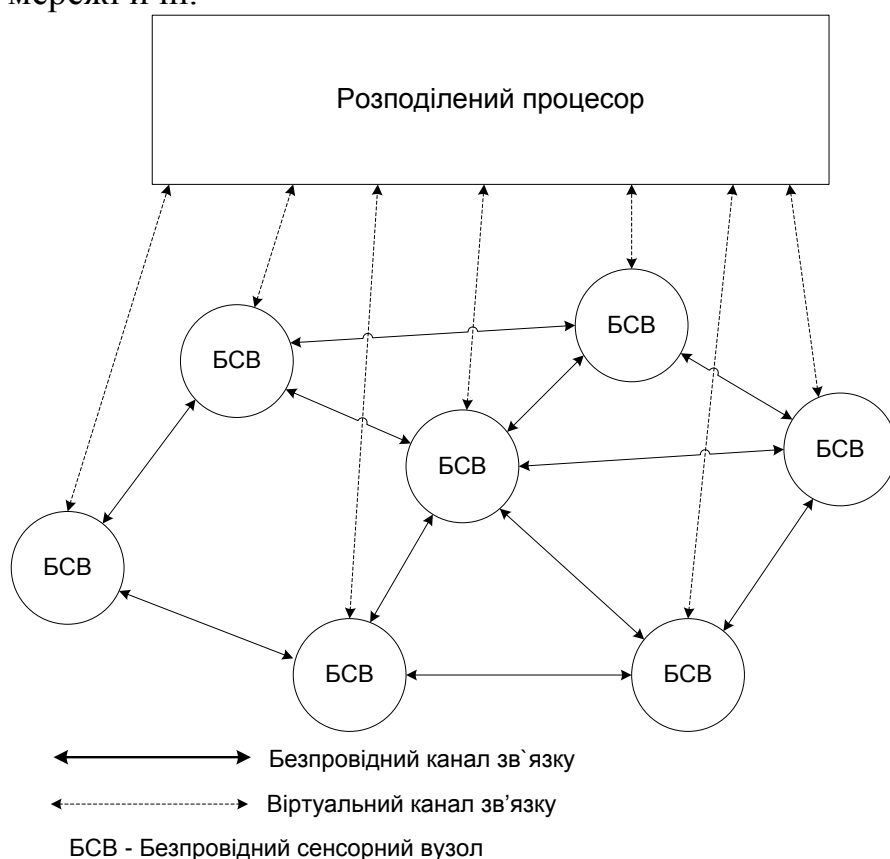


Рисунок 10 – Організація розподіленого процесора

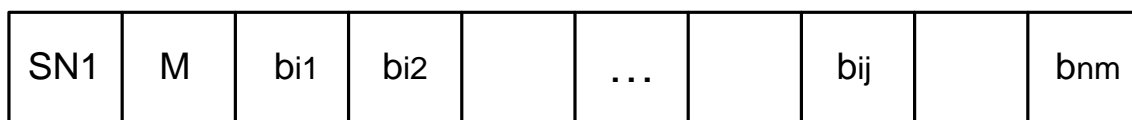
Крім функцій оптимального управління мережею, розподілений процесор може використовувати обчислювальні ресурси безпроводних вузлів для виконання складних задач, тобто проводити розподілені обчислення.

Для реалізації фізичної надлишковості за принципом мурашиних колоній у пропонованій концепції побудови БСМ частина вузлів, приблизно 20%, в яких розміщені особливо важливі програми і дані розподіленого процесора, працює в режимі економії енергії.

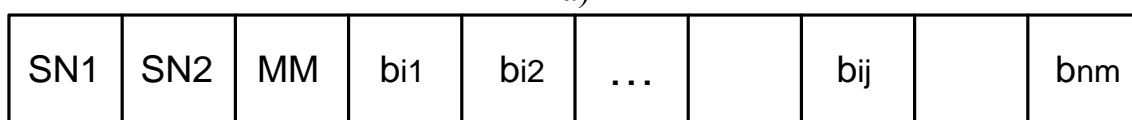
Це дає змогу відновити роботу мережі після виходу з ладу деякої частини її вузлів. Відновлення необхідних сегментів розподіленого процесора відбувається шляхом реконфігурації безпроводних вузлів. Реалізація запропонованої концепції дає змогу підвищити живучість БСМ. Висока живучість мережі досягається за рахунок резервування важливих сегментів програмного забезпечення розподіленого процесора у вузлах та децентралізованого управління мережею.

На основі запропонованого методу мережного кодування даних у системі залишкових класів розроблено протокол передачі даних у БСМ, в якому модифіковано субполе «тип кадру» за рахунок зарезервованих у стандартному

протоколі значень. При цьому значення субполя 100 означає, що передаються залишки за одним модулем, а 101 – залишки за двома модулями. Поле даних містить три типи субполів, зокрема субполе номера кадру даних SN1, SN2, значення модуля та залишків – b_{ij} (рис. 11). Якщо пакет даних містить залишки за одним модулем, то формується пакет даних наведений на рис. 11 а, а у випадку об'єднання пакетів даних за двома модулями використано формат, наведений на рис. 11 б.



а)



б)

Рисунок 11 – Формат поля даних кадру: а) передача залишків за одним модулем; б) передача залишків за двома модулями: SN1, SN2 – номер кадру даних; M – значення модуля; b_{ij} – залишки; MM – добуток модулів

Дослідження розробленого протоколу мережного кодування даних проведено в середовищі Riverbed Modeler Academic Editor 17.5, яке містить бібліотеки вже реалізованих протоколів безпроводних сенсорних мереж ZigBee. Досліджувана мережа містила 30 вузлів, з яких 1 координатор, 4 маршрутизатори та 24 кінцевих пристрої, час моделювання становив 10800 с. Розроблено два сценарії роботи мережі: scenario1, що використовує стандартний протокол ZigBee, і scenario 2_NC, що використовує протокол, розроблений на основі методу мережного кодування.

Результати моделювання роботи мережі в координаторі (node_8) та маршрутизаторах (node_2, node_3, node_4, node_5) наведено відповідно на рис. 12 – рис. 14.

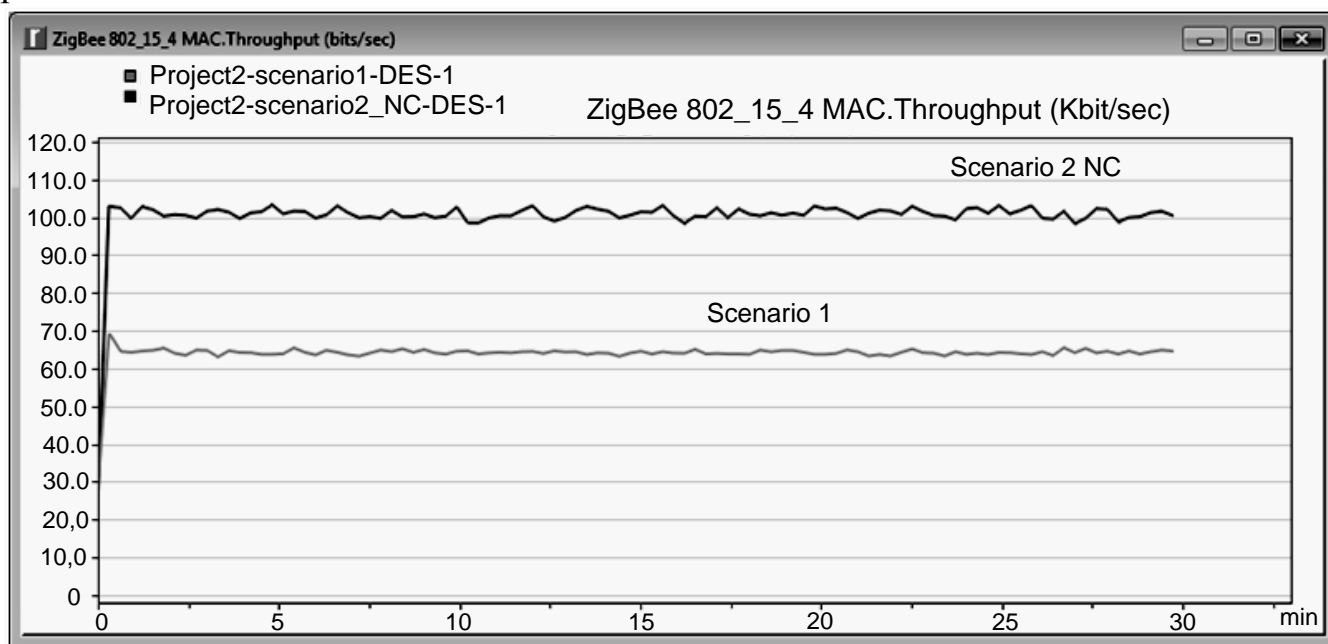


Рисунок 12 – Пропускна здатність мережі (координатор)

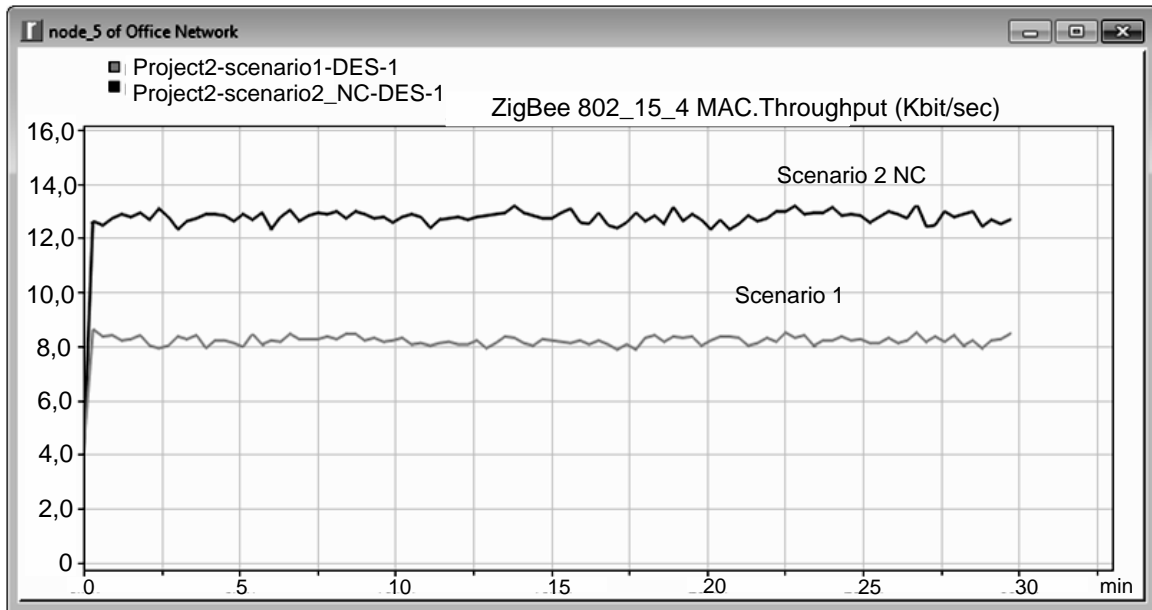


Рисунок 13 – Пропускна здатність мережі (кінцевий вузол)

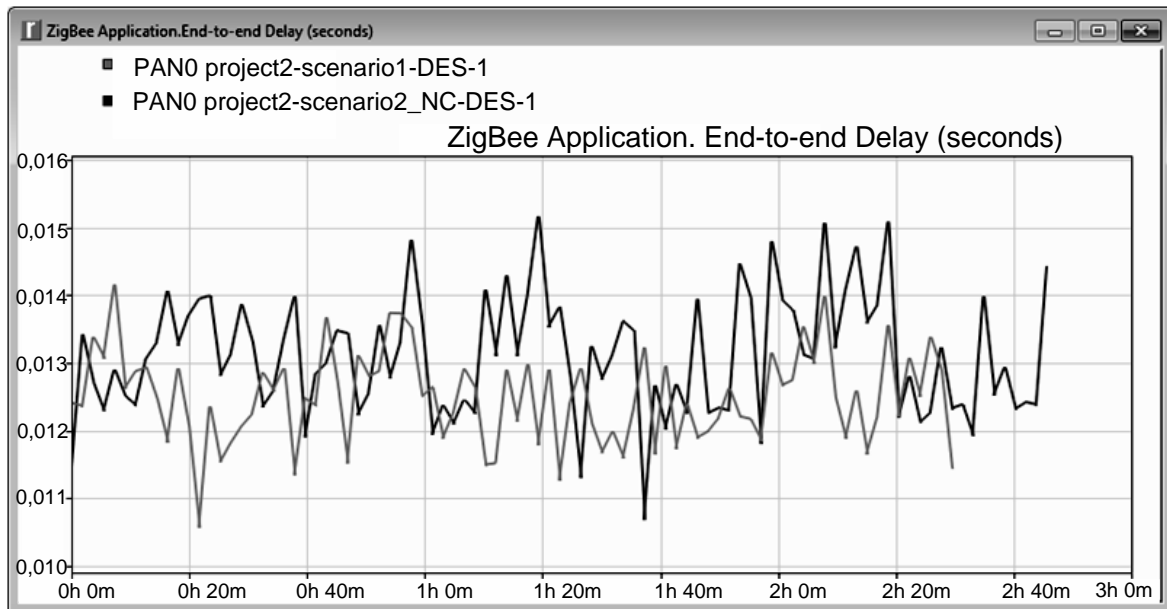


Рисунок 14 – Затримка передачі пакетів у мережі

Проведені дослідження пропускної здатності безпроводної сенсорної мережі показали, що використання розробленого протоколу мережного кодування підвищує пропускну здатність мережі в середньому на 54% при збільшенні затримки передачі пакетів на 9%.

П'ятий розділ присвячений розробці компонентів безпроводних сенсорних мереж та їх реалізації на ПЛІС. На основі розроблених модулярних коректуючих кодів синтезовано узагальнену структуру кодера. Для реалізації паралельного виконання операцій модулярного множення рівняння (2) запишемо у вигляді:

$$x_{k+1} = \left| v_1 \cdot x_1 \Big|_p + v_2 \cdot x_2 \Big|_p + \dots + v_i \cdot x_i \Big|_p + \dots + v_k \cdot x_k \Big|_p \right|_p, \quad (14)$$

де x_i – інформаційні символи; v_i – коефіцієнти взаємно прості з модулем p .

Кодер складається з блоків модулярного множення і блоку додавання за модулем (рис. 15). Кількість блоків множення відповідає кількості інформаційних символів у повідомленні.

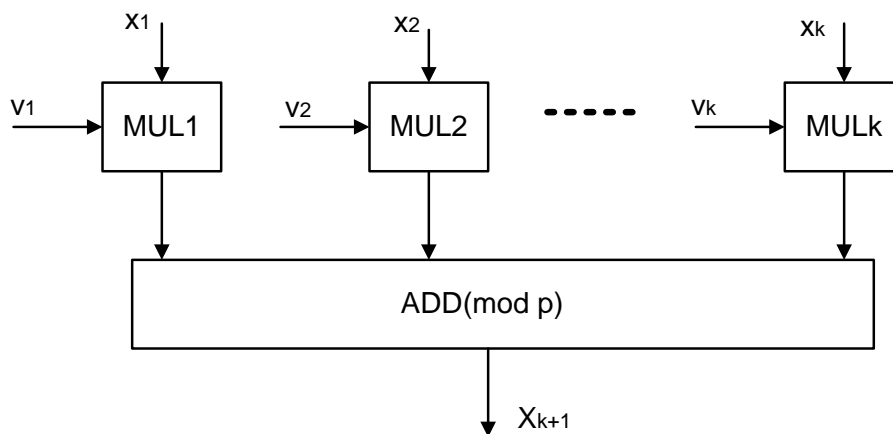


Рисунок 15 – Узагальнена структура кодера: MUL_i – блоки множення за модулем p ; ADD – блок додавання за модулем p

Структура кодера описана мовою Verilog та реалізована на ПЛІС фірми “Altera” серії MAX II мікросхема EPM240T100C3. Загальна кількість логічних елементів для реалізації кодера становить 58 / 240 (24%). Максимальна затримка формування коректуючого символу – 43,7 нс. Експериментально встановлено, що реалізація кодера на основі рівняння (14) зменшує затримку формування коректуючого символу приблизно на 30% за рахунок паралельної роботи блоків множення за модулем p з використанням методу індексного множення.

Проведено експериментальні дослідження апаратних затрат при реалізації на ПЛІС кодерів коректуючих кодів СЗК (код СЗК) і розроблених модулярних коректуючих кодів (МКК). Як видно з рисунку 16, апаратні затрати на реалізацію кодера модулярних коректуючих кодів в середньому в 16 разів менші, ніж затрати на реалізацію кодера коректуючих кодів СЗК. При цьому затримка формування вихідних сигналів у кодері модулярних коректуючих кодів приблизно в 2,2 раз менша порівняно з коректуючими кодами СЗК (рис. 17).

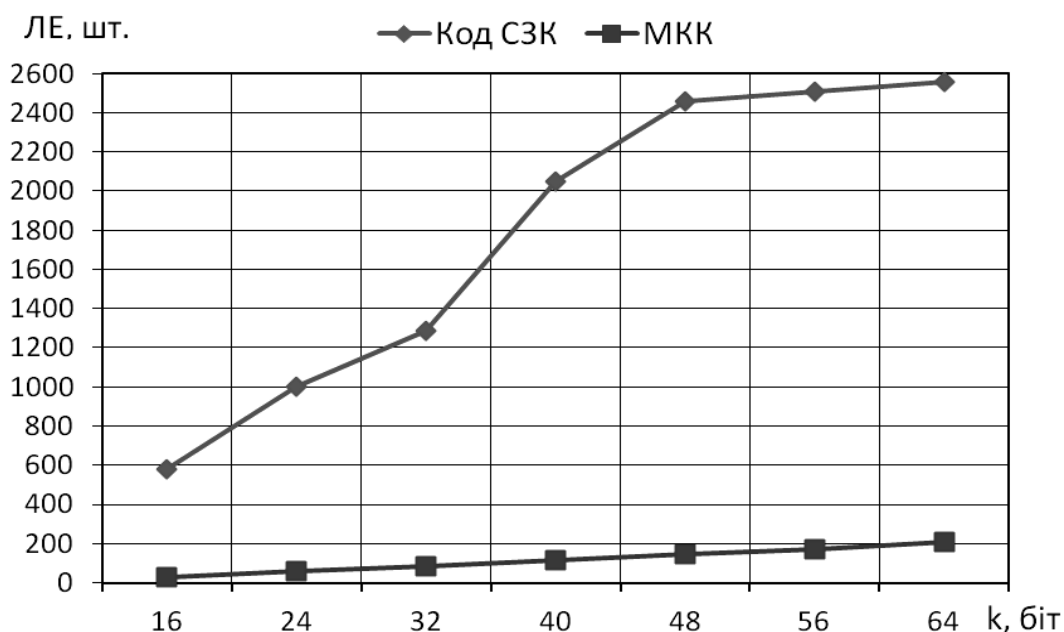


Рисунок 16 – Залежність апаратних затрат від розрядності вхідних даних: ЛЕ – логічні елементи; k – розрядність вхідних даних

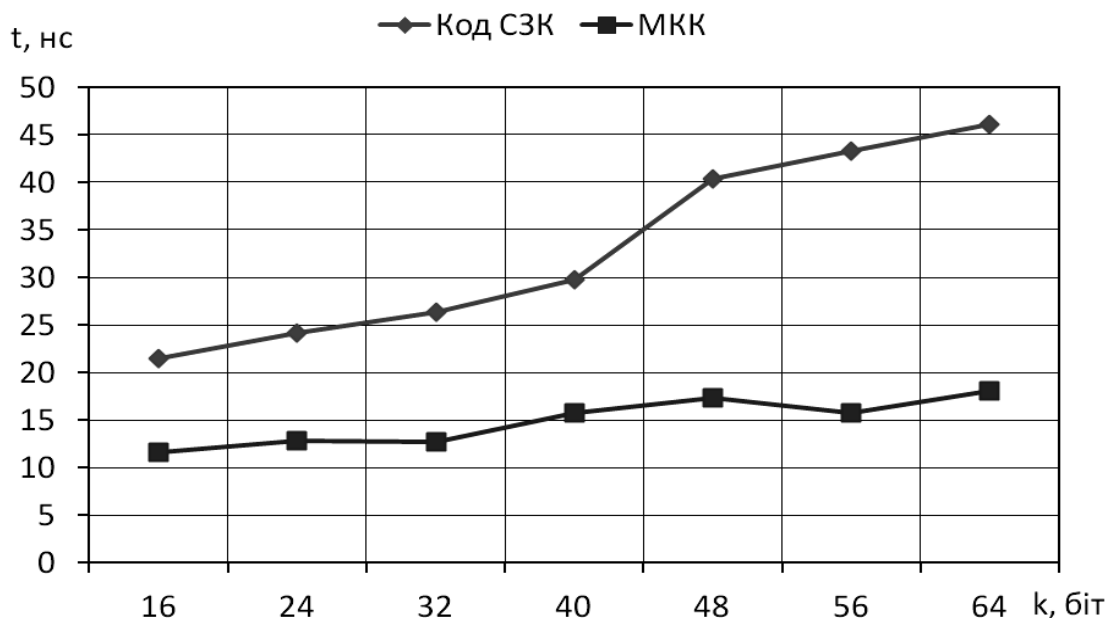


Рисунок 17 – Залежність часу формування вихідних сигналів від розрядності даних

На основі запропонованого алгоритму декодування модулярних коректуючих кодів розроблено структуру декодера для виправлення однократних помилок (рис. 18).

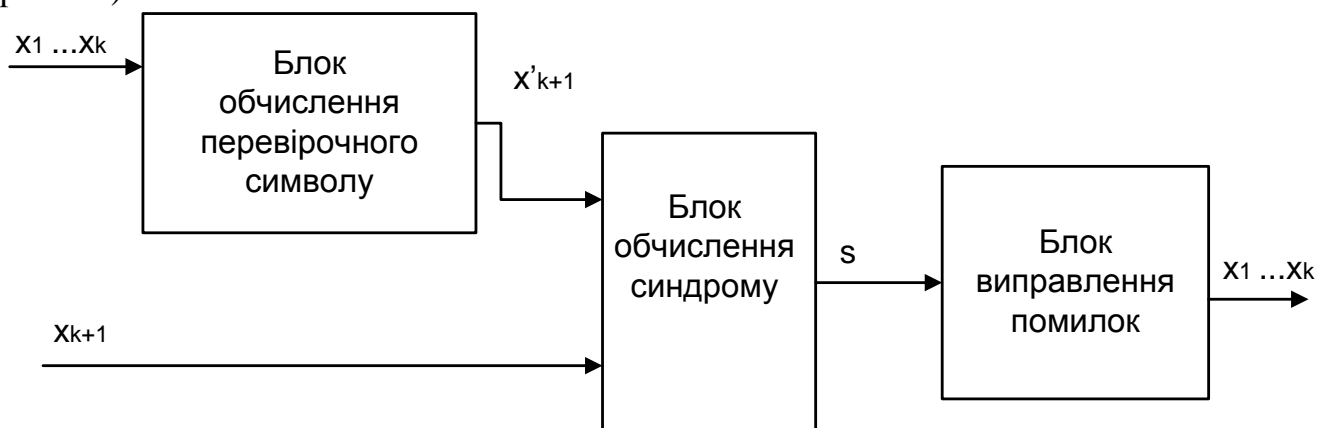


Рисунок 18 – Узагальнена структура декодера

Виправлення помилок здійснюється шляхом порівняння значення синдрому з попередньо обчисленими значеннями синдрому при всіх можливих варіантах помилки для кожного блоку даних. Апаратні затрати оцінювались кількістю логічних елементів, яка становила 1108, з максимальною затримкою формування вихідних сигналів, що дорівнює 62,6 нс.

На основі методу виправлення багатократних помилок (розділ 3) розроблено пристрій обробки даних, який забезпечує виявлення та виправлення помилок у двох інформаційних символах. Виправлення помилок реалізовано в декодері. Вхідні дані X^i надходять на блок вхідних регістрів, з виходу яких інформаційні символи подаються у блок обчислення перевірочних символів і блок виправлення помилок. Значення синдрому, обчислене на основі отриманих перевірочних символів X^{n+k} , надходять на блок виправлення помилок (рис. 19).

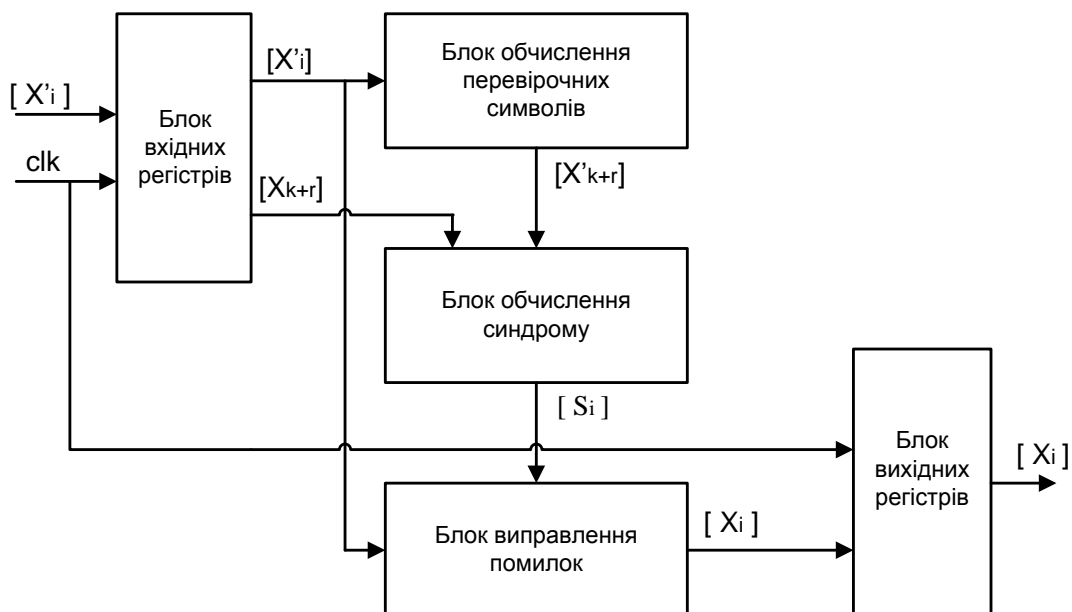


Рисунок 19 – Структурна схема декодера

Результати моделювання роботи декодера підтвердили коректність його функціонування (рис. 20).

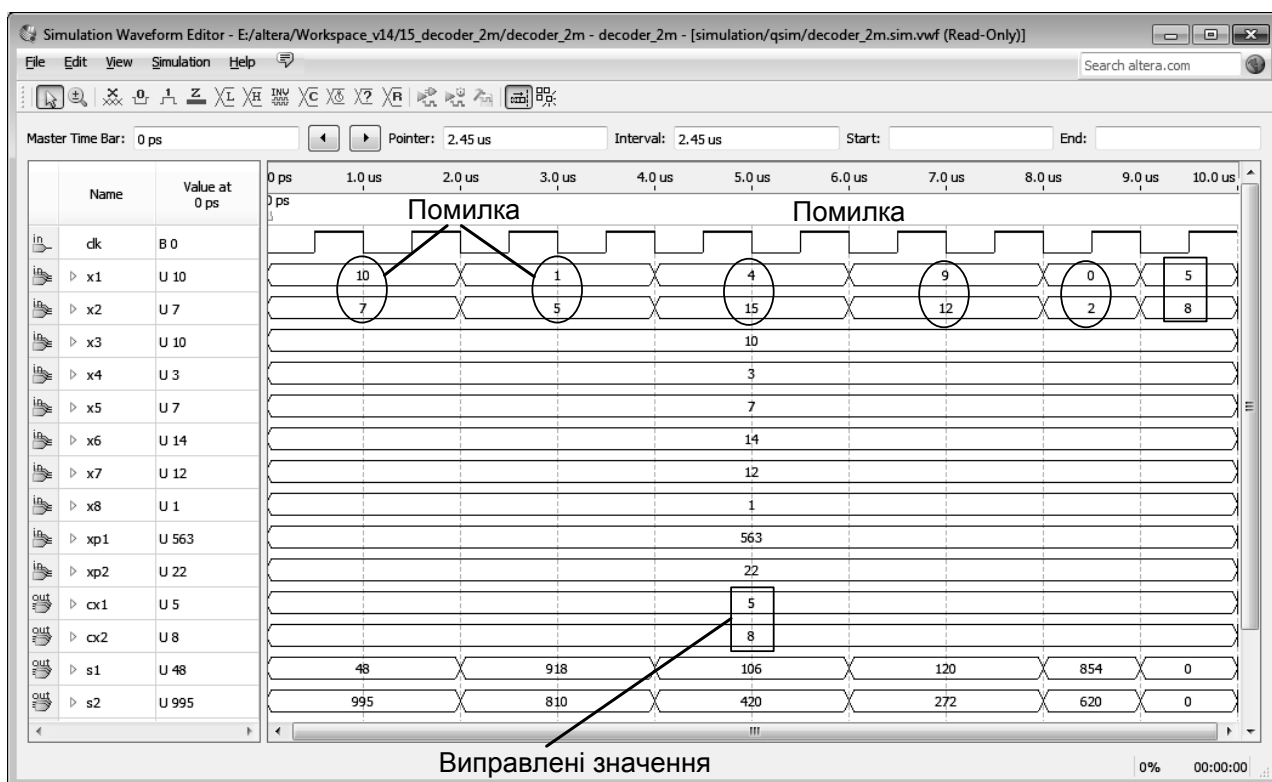


Рисунок 20 – Результати моделювання роботи декодера: x1-x8 – інформаційні символи; xp1, xp2 – перевірочні символи; cx1, cx2 – виправлені символи

Декодер реалізовано на ПЛІС фірми “Altera” серія Cyclone IV GX мікросхема EP4CGX22CF19C6, при цьому для реалізації декодера, який виправляє помилки у двох інформаційних символах, необхідно 6986 логічних елементів.

Для підвищення ефективності передачі малорозрядних (8 – 16 біт) даних сенсорів розроблено пристрій, який здійснює об’єднання вхідних даних сенсорів на основі перетворення СЗК. Перетворення базується на китайській теоремі про

залишки та паралельно-послідовному відновленні позиційного подання числа за двома залишками.

Відновлення позиційного подання числа X за двома залишками:

$$X = x_j + \left\| x_i - x_j \right\|_{p_i} \cdot k_0 \Big|_{p_i} \cdot p_j, \quad (15)$$

де x_i, x_j – залишки за модулями p_i, p_j ; k_0 – обернений елемент до p_j за модулем p_i , $k_0 = \left\| p_j^{-1} \right\|_{p_i}$.

На основі формули (15) синтезовано структурну схему блоку відновлення позиційного подання числа за двома залишками і структурну схему відновлення позиційного подання числа за n залишками (рис. 21). Перевага розробленої структури полягає у зменшенні розрядності даних у процесі виконання перетворення, що дало змогу зменшити апаратні затрати.

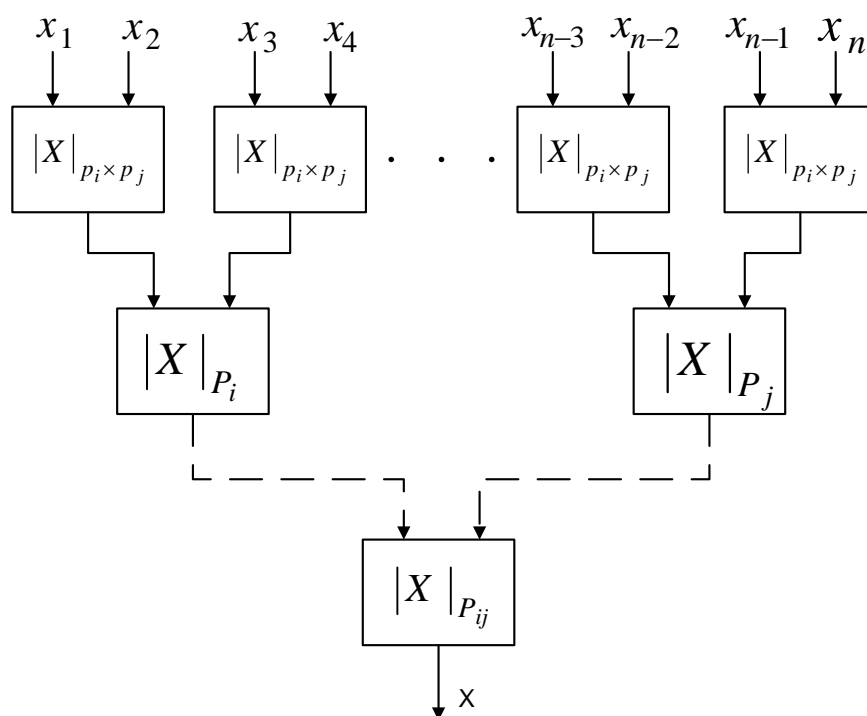


Рисунок 21 – Структурна схема відновлення позиційного подання числа за n залишками

На основі розробленої структури на ПЛІС реалізовано пристрій перетворення даних 16 сенсорів температури розрядністю 12 біт. Апаратні затрати на реалізацію пристрою на мікросхемі *EP4CGX110DF31C7* серії Cyclone IV GX становлять: логічні елементи – 34461 шт., регістри – 783 шт., вбудовані дев'ятибітні перемножувачі – 135 шт., максимальна затримка формування вихідних сигналів становить 17,264 нс.

Створено генератор Verilog-коду для синтезу на ПЛІС декодера модулярних коректуючих кодів, який автоматично генерує Verilog-код за заданими параметрами (кількість, розрядність символів, взаємно прості коефіцієнти та значення модуля), що дало змогу підвищити швидкодію розробки та уникнути помилок при написанні коду.

У шостому розділі розроблено методику і проведено дослідження надійності каналів зв'язку БСМ та затрат енергії при використанні схем контролю помилок на основі розроблених модулярних коректуючих кодів. З метою виявлення ефективних схем застосування модулярних коректуючих кодів проведено оцінювання затрат енергії при використанні двох різних схем виявлення помилок у БСМ: 1) контроль помилок у кінцевому вузлі; 2) контроль помилок у проміжних вузлах.

Розраховано кількість пакетів, прийнятих з помилками (n_{err}), залежно від значення E_b/N_0 для різної кількості проміжних вузлів у маршруті $H = 2, \dots, 10$. Як видно з рис. 22, при $E_b/N_0 < 7$, що відповідає ймовірності помилки $BER \approx 10^{-3}$, різко зростає кількість пакетів, прийнятих з помилками.

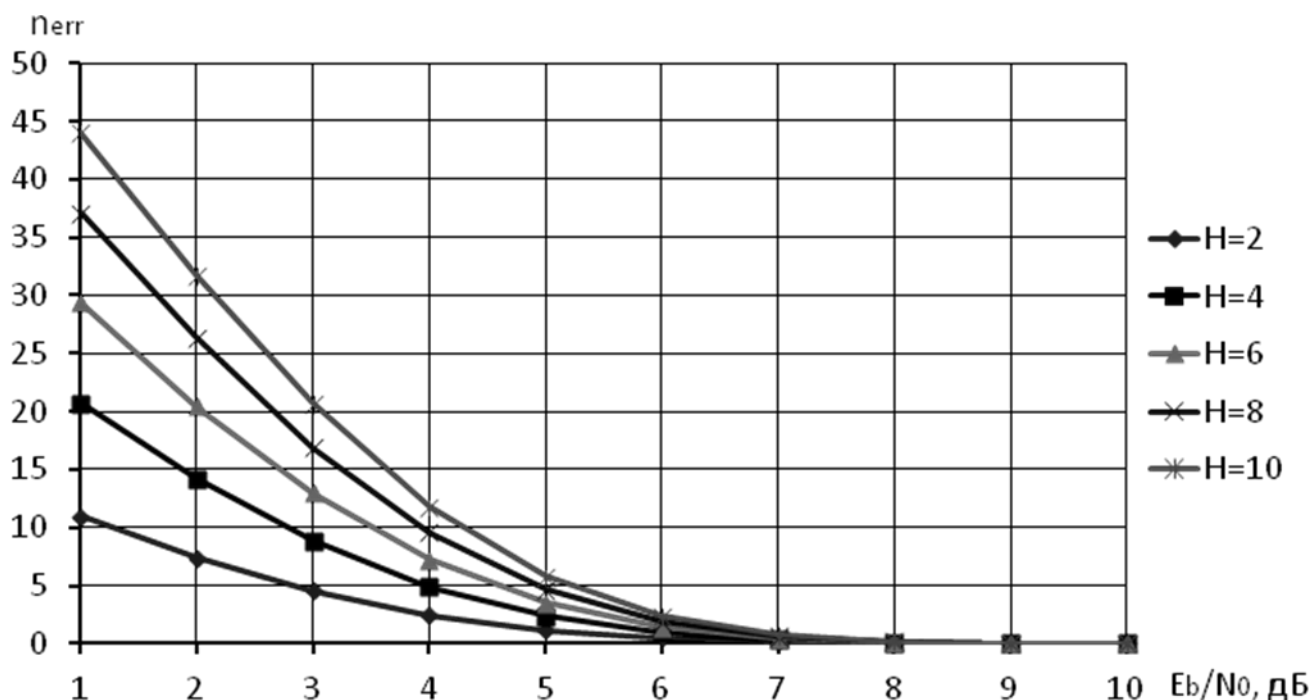


Рисунок 22 – Кількість отриманих пакетів даних з помилками залежно від значення E_b/N_0 для маршрутів з різною кількістю вузлів

Затрати енергії на повторну передачу пакетів, отриманих з помилками, переважно залежать від кількості проміжних вузлів та зростають на 10 – 40% при зміні значення E_b/N_0 (рис. 23).

Друга схема контролю помилок передбачає відновлення пакетів в усіх проміжних вузлах маршруту. При значенні $E_b/N_0 < 3$ використання коректуючих кодів з $R=0,4$ забезпечує менші затрати енергії (рис. 24). Отже, використання схеми контролю помилок з відновленням у проміжних вузлах має переваги при рівні завад $BER > 10^{-3}$ і вище, а схема ретрансляції пакетів (з відновленням у кінцевому вузлі) ефективніша при рівні завад $BER < 10^{-3}$ та при передачі даних, чутливих до затримок.

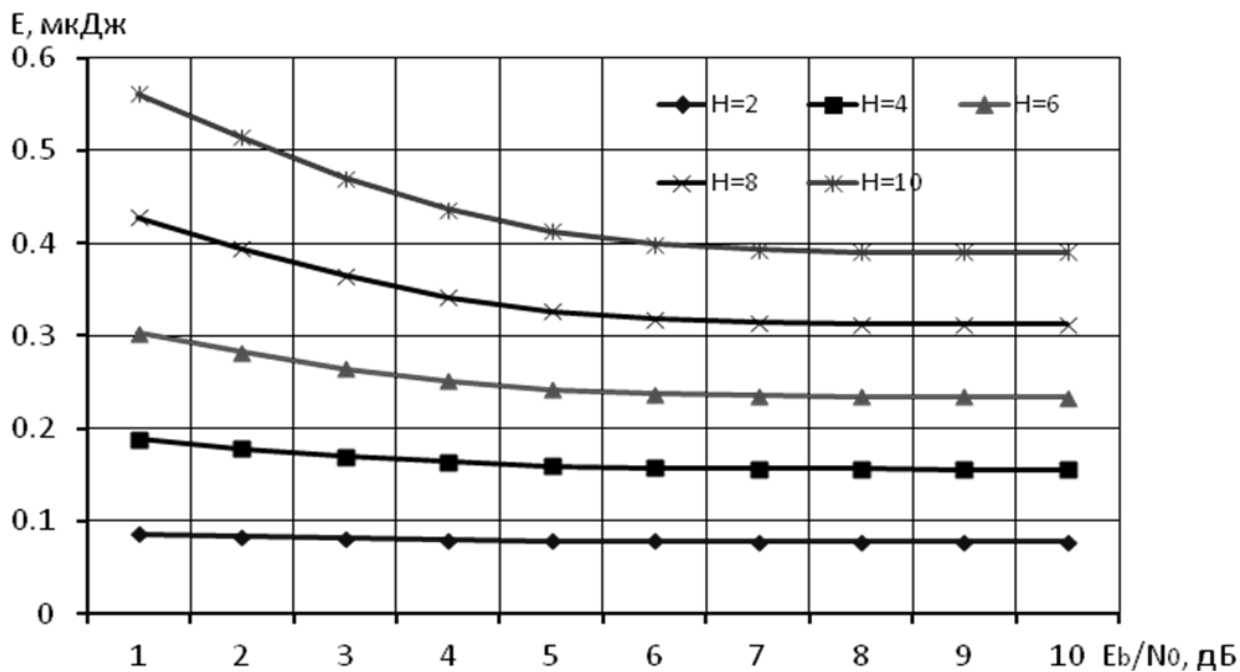


Рисунок 23 – Затрати енергії на передачу пакету даних залежно від значення E_b/N_0 при різній кількості вузлів у маршруті

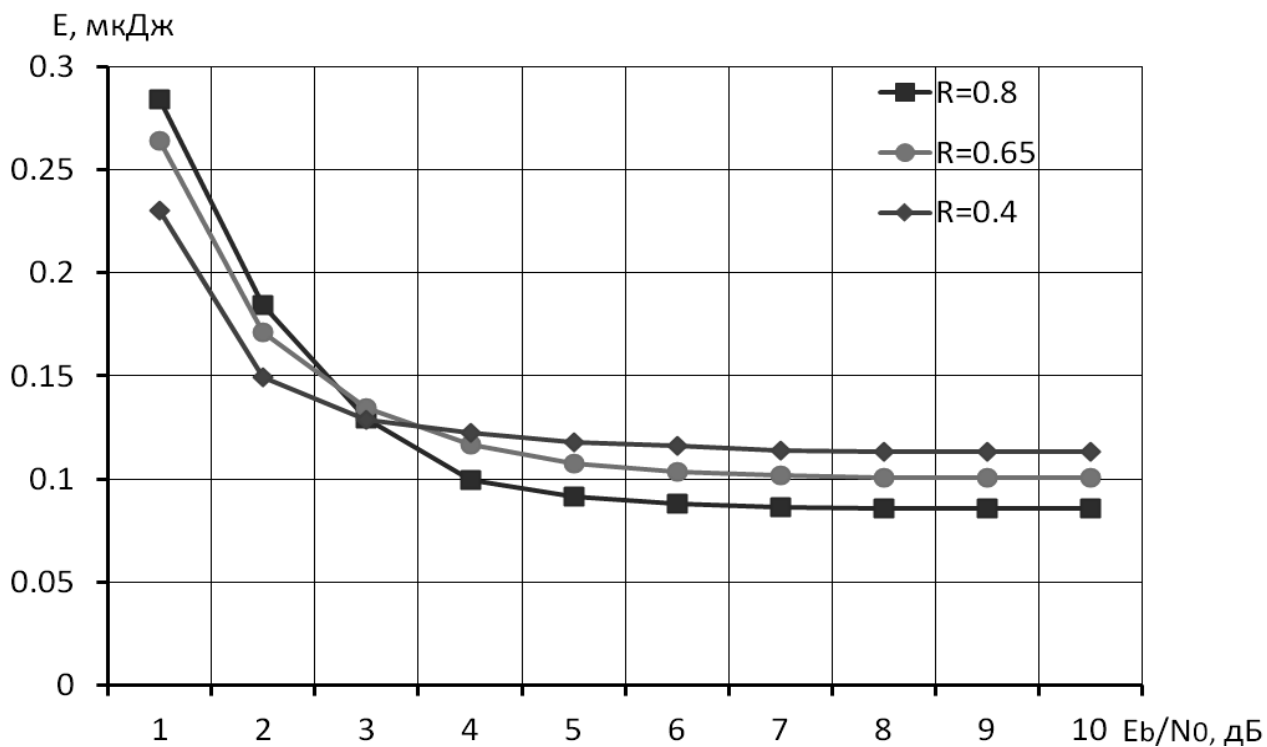


Рисунок 24 – Затрати енергії на передача пакету даних залежно від значення E_b/N_0 для різної швидкості коду R

Для вибору ефективної схеми контролю помилок у БСМ розроблено методику і програму тестування, яка визначає кількість втрачених пакетів Packet Error Rate (PER) у мережах ZigBee. Суть тестування полягає в тому, що пакети надсилаються від одного ZigBee пристрою до іншого, при цьому кількість втрачених пакетів підраховується та відображається на індикаторі або зберігається у файлі при з'єднанні з ноутбуком (рис. 25).

Значення PER визначається як відношення кількості пакетів, прийнятих з помилкою N_{error} , до загального числа прийнятих пакетів N_0 :

$$PER = \frac{N_{error}}{N_0} \cdot 100, \%$$

Пакет вважається прийнятим з помилкою, якщо спотворений хоча б один біт. Програма підтримує два режими роботи: з відправленням пакета підтвердження і без відправлення пакета підтвердження.

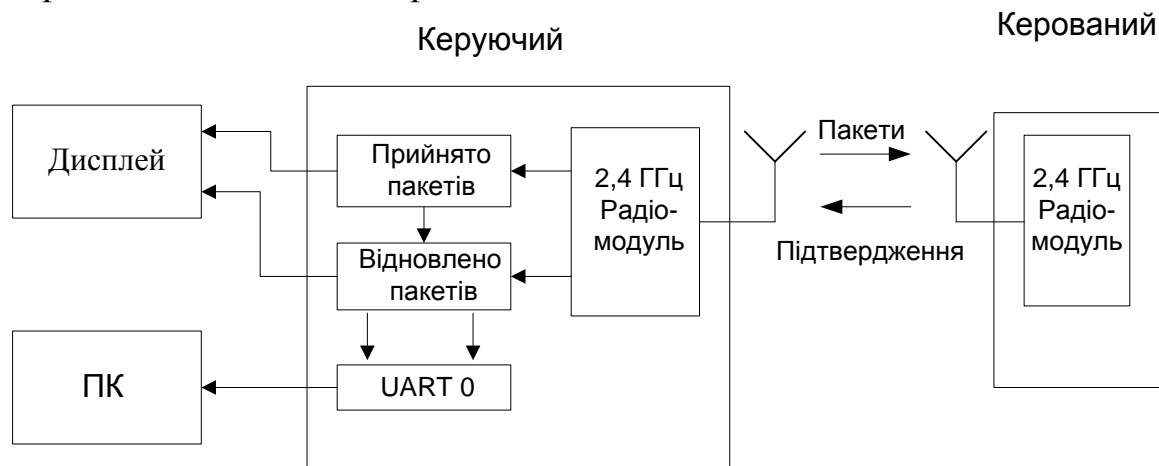


Рисунок 25 – Схема тестування каналу зв'язку БСМ без відправлення пакета підтвердження

Дослідження показали, що кількість пакетів, прийнятих з помилкою, залежить від номера каналу та становить від 3,4% до 10,6%. Найбільший відсоток пакетів прийнятих з помилкою (10,6%; 9,0%), припадає на 22 і 23 канали, що відповідає каналу № 10 мережі Wi-Fi (рис. 26).

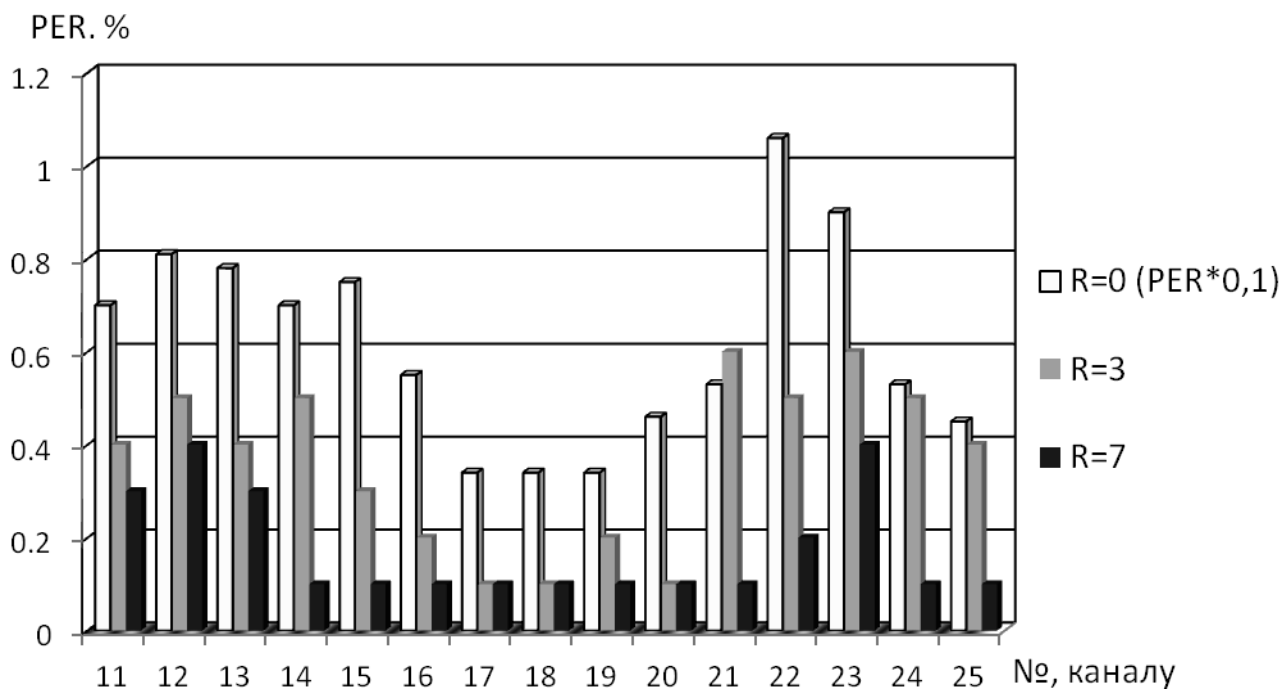


Рисунок 26 – Кількість пакетів, прийнятих з помилкою, при використанні різної кількості повторних запитів (для $R = 0$ значення наведені з коефіцієнтом 0,1)

Використання повторних запитів дає змогу зменшити відсоток пакетів, прийнятих з помилкою, у середньому в 20 разів при $R = 3$ (три повторних запити) та ще у 2,5 раз, порівняно з попереднім значенням, при $R = 7$ (див. рис. 26).

Результати тестування каналу зв'язку БСМ показали, що при виборі коректуючих кодів і схем контролю помилок необхідно враховувати вплив обладнання, яке працює в діапазоні частот 2,4 ГГц (Wi-fi, Bluetooth та ін.). Отримані експериментальні результати тестування каналів зв'язку БСМ було використано при виборі необхідних параметрів модулярних коректуючих кодів.

Для підвищення достовірності передачі даних у системі дистанційного керування технологічними процесами "СТРІЛА-М" і забезпечення сумісності із вже впровадженими на об'єктах електроенергетики системами розроблено модифіковану структуру формату кадру передачі даних з використанням модулярних коректуючих кодів (рис. 27). З урахуванням того, що максимальна довжина повідомлень у системі "СТРІЛА-М" становить 32 байти, використано модулярний коректуючий код з параметрами: розрядність символів $m=8$ біт, кількість символів $k=8$, відповідно повідомлення поділяється на чотири блоки даних. Після кожного блоку даних, який складається з 8-ми інформаційних символів, обчислюються та передаються перевірочні символи CS1 – CS4 (рис. 27). Перевірочні символи (16 біт) поділяються на дві частини по 8 біт і передаються двома кадрами формату FT1.1.

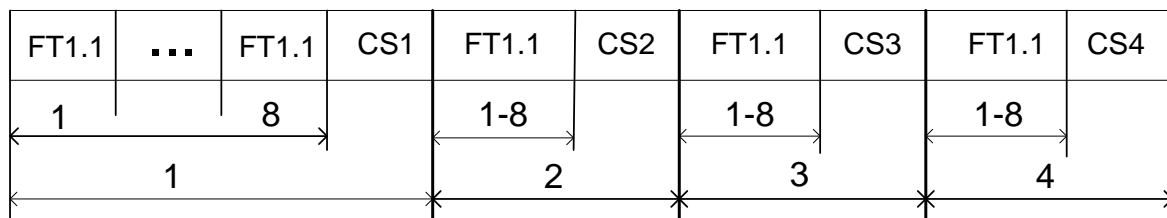


Рисунок 27 – Структура пакета передачі даних з використанням модулярних коректуючих кодів

Проведені розрахунки показали, що вдосконалення структури кадру FT1.1 за рахунок використання модулярних коректуючих кодів, які виправляють помилку в будь-якому символі, дало змогу зменшити імовірність помилки у повідомленні приблизно в 3×10^3 разів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему – підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом розвитку теоретичних основ та засобів перетворення, обробки і передачі даних на базі системи залишкових класів та модулярної арифметики. При цьому отримано такі основні теоретичні й практичні результати і наукові висновки:

1. Проведено аналіз стану розробки та сфери використання БСМ на їхній основі, сформульовано вимоги до функцій і характеристик безпроводних вузлів та мереж. Виділено переваги й існуючі обмеження, які стримують широке використання БСМ. Розроблено класифікацію БСМ. Вказано перспективи використання і виділено існуючі проблеми при створенні безпроводних мультимедійних сенсорних мереж. Досліджено перспективні методи підвищення надійності та корисної пропускну здатності безпроводних сенсорних мереж.

2. Запропоновано метод мережного кодування даних на основі системи залишкових класів, який підвищує загальну пропускну здатність мережі за рахунок поділу повідомлення на частини та передачі їх різними маршрутами. Вибір взаємно простих модулів різної розрядності забезпечує рівномірний розподіл трафіка між маршрутами мережі, оскільки розрядність залишків, які передаються спільним маршрутом, приблизно дорівнює розрядності залишків, які передаються різними маршрутами. Розроблено протокол передачі даних на основі мережного кодування даних, який забезпечує підвищення пропускну здатності мережі, порівняно з протоколом стандарту IEEE 802.15.4, в середньому на 54% при збільшенні затримки передачі пакетів на 9% (0,001 с).

3. Розроблено модифікований метод стрибкоподібної зміни частоти, який забезпечує підвищення надійності передачі даних на фізичному рівні безпровідних сенсорних мереж та захист від спланованих завад за рахунок поділу повідомлення на систему взаємно простих модулів та передачі отриманих залишків за допомогою набору несучих частот, вибір яких здійснюється за псевдовипадковим законом.

4. Запропоновано метод перетворення й обробки зображень, який забезпечує підвищення швидкодії обробки зображення в 2–3 рази за рахунок поділу зображення на модулі системи залишкових класів і паралельного стиснення отриманих залишків. Стиснення отриманих залишків методом арифметичного кодування забезпечує коефіцієнт стиснення без втрат для зображень від 13 до 24% (залежно від формату зображення) та від 54% до 69% для текстових файлів.

5. Розроблено модулярні коректуючі коди, які обробляють вхідні дані, подані двійковим кодом, і забезпечують гнучкий вибір розрядності та кількості інформаційних символів. Наявність одного перевірного символу забезпечує 100% виявлення і виправлення помилок в одному інформаційному символі.

6. Розроблено метод виправлення багатократних помилок на основі модулярного коректуючого коду, в якому перевіряючі символи формуються з використанням наборів різних коефіцієнтів та спільного модуля. Ці коди забезпечують виправлення помилок в інформаційних символах, кількість яких дорівнює кількості перевіряючих символів, при цьому час формування перевіряючих символів приблизно в 5 разів менший порівняно з коректуючими кодами СЗК і кодом Ріда – Соломона (127, 87). Апаратні затрати на реалізацію кодування у середньому в 16 разів менші порівняно з коректуючими кодами СЗК. Використання коректуючого коду в БСМ зменшує відношення E_b/N_0 на 3 дБ при збереженні заданої надійності передачі даних. Розміщення перевіряючих символів у кінці поля даних протоколу забезпечує сумісність з мережами стандарту IEEE 802.15.4.

7. Запропоновано метод виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій (додавання, віднімання, множення) на основі модулярних коректуючих кодів, який дає змогу виявляти помилки у двох десяткових розрядах та виправляти їх в одному десятковому розряді при використанні одного контрольного символу. Розроблено структурну схему блоку виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій.

8. Розроблено метод підвищення надійності передачі даних у безпровідних сенсорних мережах на основі модулярних коректуючих кодів і декомпозиції даних,

який забезпечує виправлення пакетів помилок довжиною k (k – кількість інформаційних символів) при одному перевірочному символі. Використання коректуючого коду з двома перевірочними символами забезпечує виправлення пакетів помилок довжиною $2 \cdot k$, оскільки не більше, ніж два пошкоджених символи будуть міститися в одному рядку.

9. Розроблено концепцію побудови безпроводних сенсорних мереж, яка базується на принципах колективного інтелекту та розподіленого процесора і забезпечує виділення частини обчислювальних ресурсів безпроводних сенсорів для функціонування розподіленого процесора та високу живучість мережі за рахунок резервування важливих сегментів програмного забезпечення розподіленого процесора у безпроводних вузлах і децентралізованого управління мережею.

10. Розроблено структури та реалізовано на ПЛІС кодер / декодер, який виявляє та виправляє однократні помилки на основі модулярного коректуючого коду. Апаратні затрати при реалізації на ПЛІС фірми “Altera”, серії MAX II становлять: для кодера – 58 логічних елементів, максимальна затримка формування коректуючого символу становить 42,74 нс; декодера – 1108 логічних елементів, максимальна затримка формування вихідних сигналів становить 62,6 нс.

11. Розроблено структуру пристрою виявлення і виправлення багатократних помилок на основі модулярних коректуючих кодів. Проведене оцінювання апаратних затрат при використанні різних серій ПЛІС фірми “Altera” показала, що для реалізації декодера на мікросхемі EP4CGX22CF19C6 серії Cyclone IV GX без використання вбудованих блоків необхідно 6986 логічних елементів. Розроблено генератор Verilog-коду, який автоматично генерує Verilog-код декодера модулярних коректуючих кодів за заданими параметрами, що дало змогу підвищити швидкодію розробки й уникнути помилок при написанні коду.

12. Розроблено пристрій багаторівневого перетворення даних у системі залишкових класів, який забезпечує об'єднання даних, отриманих від 16 сенсорів. Перетворення вхідних даних сенсорів, поданих у СЗК, у двійкову систему числення реалізовано на основі попарного об'єднання залишків за двома модулями, що дозволило зменшити розрядність даних у процесі виконання проміжних обчислень, а це, відповідно знизило апаратні затрати.

13. Розроблено методику тестування каналу зв'язку безпроводної сенсорної мережі, яка дає змогу вибирати необхідну схему контролю помилок та параметри коректуючого коду залежно від стану каналу передачі даних. Визначено рівень завад, при якому доцільно з позиції затрат енергії використовувати коректуючі коди. Отримані результати показали, що використання коректуючих кодів з декодуванням у проміжних вузлах необхідно застосовувати при рівні завад $BER > 10^{-3}$ і вище, а метод ретрансляції пакетів (з декодуванням у кінцевому вузлі) має переваги при рівні завад $BER < 10^{-3}$ та передачі даних, чутливих до затримок.

14. Вдосконалено структуру кадру протоколу передачі даних у системі дистанційного керування технологічними процесами “СТРІЛА-М”, що дало змогу зменшити ймовірність помилки в повідомленні приблизно у $3 \cdot 10^3$ разів за рахунок використання модулярних коректуючих кодів.

Результати дисертаційної роботи можуть бути запропоновані для використання науковими організаціями, підприємствами і компаніями, які займаються розробкою та впровадженням безпроводних сенсорних мереж з метою підвищення ефективності їхнього функціонування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових виданнях, які індексуються у міжнародних наукометричних базах та закордонних журналах

1. Hu Zhengbing. Increasing the Data Transmission Robustness in WSN Using the Modified Error Correction Codes on Residue Number System /Hu Zhengbing, V. Yatskiv, A. Sachenko // *Elektronika ir Elektrotechnika*. – 2015. –Vol 21. – № 1. – Pp. 76-81 (*Web of Science, Scopus*).

2. Su Jun. Method and Device for Image Coding & Transferring Based on Residue Number System / Su Jun, V. Yatskiv // *Sensors & Transducers Journal*, 2013. – Vol. 18, Special Issue. – Pp. 60-65 (*Scopus*).

3. Yatskiv V. Improved Data Communication in WSN Using Modular Arithmetic /V. Yatskiv, A. Sachenko, N. Yatskiv // *Wireless Communication and HTW - University of Applied Sciences Berlin*. Berlin. – 2010. – Pp. 39-49.

4. Yatskiv V. The network coding method in wireless sensor networks based on residue number system / V. Yatskiv // *Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Organizacja i Zarządzanie*. – 2013. – №. 67. – Pp. 135-144.

5. Яцків Н. Г. Метод кодирования данных в беспроводных компьютерных сетях на основе преобразования системы остаточных классов / Н. Г. Яцків, В. В. Яцків, Р. В. Крепич // *Физика, математика, информатика. Вестник Брестского государственного технического университета*. – 2007. – № 5 (47). – С. 8–10.

6. Су Цзюнь. Повышение эффективности передачи данных в беспроводных сенсорных сетях на основе многопутевой маршрутизации / Су Цзюнь, В. В. Яцків, А. О. Саченко // *Физика, математика, информатика. Вестник Брестского государственного технического университета, Брест.* – 2010. – № 5 (650). – С. 21–24.

7. Цаволик Т. Г. Метод исправления ошибок на основе модулярных корректирующих кодов / Т. Г. Цаволик, В. В. Яцків // *Физика, математика, информатика. Вестник Брестского государственного технического университета – Брест.* – 2015. – № 5 (850). – С. 36-38.

Статті в наукових фахових виданнях

8. Яцків В. В. Двовимірні коректуючі коди на основі модулярної арифметики / В. В. Яцків, Т. Г. Цаволик // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2015. – № 4 (227). – С. 144–148 (*IndexCopernicus*).

9. Яцків В. В. Виявлення та виправлення багатократних помилок на основі модулярних коректуючих кодів / В. В. Яцків // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. – 2015. – Том 33, № 2. – С. 77–82.

10. Яцків В. В. Концепція побудови безпроводних сенсорних мереж на основі колективного інтелекту / В. В. Яцків, Н. Г. Яцків // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2015. – № 2. – С. 217–221. (*IndexCopernicus*)

11. Яцків В. В. Контроль виконання арифметичних операцій на основі модулярних кодів / В. В. Яцків // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 4(53). – С. 135–138 (*IndexCopernicus*).
12. Яцків В. В. Методи виконання модулярних операцій та їх реалізація на ПЛІС / В. В. Яцків // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – № 6. – С. 218–224 (*IndexCopernicus*).
13. Яцків В. В. Метод та пристрій кодування мультимедійних даних на основі системи залишкових класів / В. В. Яцків // Праці Одеського політехнічного університету. Науковий та науково-виробничий збірник. – 2013. – №1 (40). – С. 61–66.
14. Яцків В. В. Модифіковані коректуючі коди системи залишкових класів та їх застосування / В. В. Яцків // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2013. – № 2. – С. 39–45.
15. Яцків В. В. Метод мережного кодування в системі залишкових класів / В. В. Яцків // Науковий вісник “Комп'ютерні системи та мережі” Національного університету «Львівська політехніка». Львів. – 2013. – № 773. – С. 157–164.
16. Yatskiv V. Nonlinear data coding in wireless sensor networks / V Yatskiv, Su Jun, N. Yatskiv, A. Sachenko // International Journal of Computing. – 2011. – Vol. 10, Issue 4. – Pp. 383–390.
17. Яцків В. В. Метод підвищення надійності передачі даних в безпроводних сенсорних мережах на основі системи залишкових класів / В. В. Яцків // Радіоелектроніка та інформатика. – 2010. – № 2. – С. 32–35.
18. Яцків В. В. Завадозахищений метод передавання даних в безпроводних сенсорних мережах / В. В. Яцків, Н. Г. Яцків, Д. І. Боднар // Науковий вісник Чернівецького університету: Комп'ютерні системи та компоненти. – Чернівці: ЧНУ. – 2009. – Вип. 446. – С. 117–120.
19. Яцків В. В. Безпроводні сенсорні мережі на основі оптичного каналу зв'язку / В. В. Яцків // Науковий вісник Чернівецького університету: Фізика. Електроніка. Тематичний випуск “Комп'ютерні системи та компоненти” – Чернівці: ЧНУ. – 2008. – Вип. 426, Ч. II. – С. 153–156.
20. Яцків В. В. Методи кодування сигналів в безпроводних оптичних каналах зв'язку / В. В. Яцків, Н. Г. Яцків, Д. Я. Геник // Вісник Технологічного університету Поділля. - Хмельницький. – 2005. – № 4, Ч. 1, Т. 1 – С. 246–248.
21. Яцків Н. Г. Спецпроцесор обробки даних на основі перетворення Крестенсона – Галуа / Н. Г. Яцків, Р. І. Король, В. В. Яцків, Т. Г. Федчишин // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – Т 1, № 3. – С. 105–108.
22. Яцків В. В. Методи кодування даних для фізичного рівня комп'ютерних мереж / В. В. Яцків, Ю. В. Кудряшов // Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів. – 2002. – № 443. – С. 131–134.
23. Яцків Н. Г. Методи кодування та фізичного представлення сигналів в інформаційно-керуючих системах / Н. Г. Яцків, В. В. Яцків // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Методи і засоби технічної діагностики. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ. – 2001. – Т. 8, № 38. – С. 140–144.

Патенти

24. Спосіб мережного кодування даних. Патент на корисну модель № 96835 України: МПК (2015.01), H0J 13/00, G06F 11/08 (2006.01) / Винахідник: Яцків В. В. / Власник: Яцків В. В. – № u2014 07525; заявл. 04.07.2014 р.; опубл. 25.02.2015 р., Бюл. № 4.

25. Багатоканальний адаптивний пристрій кодування та передавання даних на основі системи залишкових класів. Патент №105430 України: МПК(2014.01) H03M 7/00, H03M 718 (2006.01) H03M 1/00, G06F 11/08 (2006.01) G06F 11/00 / Винахідник: Яцків В. В. / Власник: Тернопільський національний економічний університет – № а201213700; заявл. 30.11.2012 р.; опубл. 12.05.2014р., Бюл. № 9.

26. Пристрій для перетворення паралельного двійкового коду в код системи залишкових класів. Патент №104912 України: МПК G06F 7/72 (2006.01), G06F 7/38 (2006.01), H03M 7/18 (2006.01) / Винахідники: Яцків В. В., Саченко А. О., Су Цзюнь / Власник: Тернопільський національний економічний університет – № а201204834; заявл.17.04.2012 р.; опубл. 25.03.2014 р., Бюл. № 6.

Друковані праці конференцій

27. Yatskiv V. Concept of Designing the Wireless Sensor Networks on Ant Intelligence /V. Yatskiv, N. Yatskiv, A. Sachenko, O. Volynskyy // Proceedings of the 8-th 2015 IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS'2015, Warszawa, Poland, 2015, Volume 2. – Pp. 863-866 (*Scopus*).

28. Yatskiv V. Multiple Error Detection and Correction Based on Modular Arithmetic Correcting Codes / V. Yatskiv, T. Tsavolyk, Hu Zhengbing // Proceedings of the 8-th 2015 IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS'2015, Warszawa, Poland, 2015, Volume 2. – Pp. 850-854 (*Scopus*).

29. Mobile Ad Hoc Wireless Network for Pre- and Post-Emergency Situations in Nuclear Power Plant. Robert E. Hiromoto, A.Sachenko, V. Kochan, V.Koval, V. Turchenko, O. Roshchupkin, V. Yatskiv, K. Kovalok // The 2 nd IEEE International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems 11-12 September 2014, Offenburg, Germany. – Pp.92-96 (*Scopus*).

30. Yatskiv V. The Use of Modified Correction Code Based on Residue Number System in WSN / V.Yatskiv, N.Yatskiv, Su Jun, A.Sachenko, Hu Zhengbing // Proceedings of the 7-th 2013 IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS'2013, Berlin, Germany, 2013, Volume 1. – Pp. 513-516 (*Scopus*).

31. Su Jun. Improved Method of Ant Colonies to Search Independent Data Transmission Routes in WSN / Su Jun, N. Yatskiv, A. Sachenko, V. Yatskiv // Proceedings 2012 IEEE 1st International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. IDAACS-SWS'2012. – Offenburg, Germany, 2012. – Pp. 52–57 (*Scopus*).

32. Su Jun. Data Transmission Optimal Routing in WSN Using Ant Colony Algorithm / Su Jun, V.Yatskiv, A. Sachenko, N. Yatskiv // Proc. of the International Conf. TCSET' 2012. – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2012 – Pp. 342–343 (*Scopus*).

33. Yatskiv V. Multilevel Method of data coding in WSN / V. Yatskiv, Su Jun, N. Yatskiv, A. Sachenko, O. Osolinskiy // Proceeding of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: IDAACS'2011, 2011. – Pp. 863–866 (*Scopus*).

34. Sachenko A. Modified Method of Noise-Immune Data Transmission in Wireless Sensors Networks / A.Sachenko, V. Yatskiv, R. Krepych // International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, "NSWCTC' 2009", Wuhan, China, 2009. – Volume 2. – Pp. 847–850 (*Scopus*).

35. Yatskiv V. Data Coding Method on the Basis of M – Sequences / V. Yatskiv, N. Yatskiv // Proceeding of the International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: IDAACS' 2009, 2009. – Pp. 698–700 (*Web of Science, Scopus*).

36. Sachenko A. Data Encoding in Residue Number System / A. Sachenko, V. Yatskiv, R. Krepych, A. Karachka // Proceeding of the International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: IDAACS' 2009, 2009. – Pp. 679–681 (*Web of Science, Scopus*).

37. Yatskiv V. Multiple Access on the Basis of Residue Number System Transformation / V. Yatskiv, N. Yatskiv // Proceeding of the International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: IDAACS' 2005, 2005. – Pp. 527–530 (*Web of Science, Scopus*).

38. Yatskiv V. Two-Dimensional Corrective Codes Based on Modular Arithmetic / V. Yatskiv, T. Tsavolyk // Proceedings of the XIIIth International Conference the Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronics CADSM' 2015. – Lviv-Polyana, Ukraine, 2015. – Pp. 291–294 (*Scopus*).

39. Яцків В. В. Метод завадостійкого кодування даних на основі модулярних коректуючих кодів / В. В. Яцків, Т. Г. Цаволик // Матеріали V-ї міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених Інфокомунікації – сучасність та майбутнє, 29-30 жовтня 2015 р., Одеса, ОНАЗ, 2015. – С. 111–114.

40. Yatskiv V. Wireless Sensor Networks for Forest Fires Monitoring / V.Yatskiv, A. Sachenko // Computer Science and Information Technologies. Proceedings of IXth International Scientific and Technical Conference, CSIT' 2014, Lviv, Ukraine, 18–22 November, 2014. – Pp.127.

41. Яцків В. В. Напрямки підвищення ефективності роботи безпроводних сенсорних мереж / В. В. Яцків // Матеріали XII Міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах" КУСС-2014. Вінниця, 14-16 жовтня 2014 року. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – С. 77.

42. Яцків В. В. Принципи реалізації основних модулярних операцій на ПЛІС / В. В. Яцків // Матеріали VI-ої Українсько-польської науково-практичної конференції "Електроніка та інформаційні технології" ЕЛІТ-2014, Львів – Чинадієво, Україна, 2014. – С. 20–22.

43. Yatskiv V. CPLD Encoder and Decoder for Modified Correction Codes Based on Residue Number System / V. Yatskiv, N. Yatskiv, A. Sachenko, Su Jun // Modern

Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science. Proceedings of the International Conference TCSET'2014 Lviv-Slavske, Ukraine, 2014 – Pp. 492–493.

44. Яцків В. В. Метод кодування зображень в системі залишкових класів / В. В. Яцків, Н. Г. Яцків // Труды МНПК “Современные информационные и электронные технологии” СИЭТ-2013. – Одесса, 2013. – С. 44–46.

45. Яцків В. В. Виявлення помилок на основі модифікованих коректуючи кодів системи залишкових класів / В. В. Яцків // Тези доповідей четвертої науково-практичної конференції “Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації”. Вінниця: ПП «ТД Едельвейс і К», 2013. – С. 40–43.

46. Yatskiv V. The Network Coding Method Based on Residue Number System / V. Yatskiv // Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application. Proceedings of the 6-th International Conference. ACSN - 2013. – Lviv, Ukraine, 2013. – Pp. 80–83.

47. Яцків В. В. Метод розподілу трафіку в безпроводних сенсорних мережах на основі системи залишкових класів / В. В. Яцків // Тези міжнародної науково-технічної конференції “Контроль і управління в складних системах”, КУСС – 2012, «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2012. С. 39.

48. Су Цзюнь. Спецпроцессор кодирования изображений в системе остаточных классов / Су Цзюнь., В. В. Яцкив, А. А. Саченко, Ху Чежньбин // Труды МНПК “Современные информационные и электронные технологии”, СИЭТ-2012, Одесса, 2012. – С. 95.

49. Яцків В. В. Мережне кодування в базисі Крестенсона / Яцків В. В., Су Цзюнь, Дорош В. І. // Поступ в науку. Збірник наукових праць Буцацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач, 2011. – № 7. – С. 187–190.

50. Yatskiv V. The network coding based on residue number system in wireless sensor networks / V. Yatskiv, Su Jun // Proceedings of International Conference on Information Technology and Management Engineering ITME2011, September 23-25, Wuhan, China, 2011. – Pp. 27–30.

51. Яцків В. В. Метод кодування та передавання мультимедійних даних в безпроводних сенсорних мережах / В. В. Яцків, А. О. Саченко, Су Цзюнь // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. – С. 133–135.

52. Яцків В. В. Метод стиснення зображень без втрат на основі залишків в безпроводних сенсорних мережах / В. В. Яцків, Н. Г. Яцків // Труды десятой МНПК “Современные информационные и электронные технологии” (СИЭТ-2010). – Одесса, 2010. – С. 145.

53. Яцків В. В. Метод передавання даних в сенсорних мережах / В. В. Яцків, Н. Г. Яцків // Труды десятой МНПК “Современные информационные и электронные технологии”, СИЭТ-2009, Одесса, 2009. – С. 161.

54. Yatskiv V. Data Transmission Method on the Basis of Spread Spectrum in Wireless Networks / V. Yatskiv, N. Yatskiv // Proceedings of the VIIIth International Conference the Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronics CADSM'2005. – Lviv-Polyana, Ukraine, 2005. – Pp. 166–167.

55. Яцків В. В. Проблеми створення комп'ютерних мереж на основі відкритих лазерних каналів зв'язку / В. В. Яцків // Тези міжнародної науково-технічної конференції. "Контроль і управління в складних системах", КУСС – 2003. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2003. – С. 70.

АНОТАЦІЇ

Яцків В. В. Теоретичні основи створення і структурна організація компонентів безпроводних сенсорних мереж підвищеної ефективності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний університет "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України, Львів, 2016.

У дисертації вирішено науково-прикладну проблему підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж, шляхом розвитку теоретичних основ та засобів перетворення, обробки і передачі даних на основі системи залишкових класів та модулярної арифметики.

У дисертації розроблено методи направлені на підвищення надійності передачі даних та продуктивності безпроводних сенсорних мереж. Розроблено метод мережного кодування даних, який базується на перетворенні системи залишкових класів та забезпечує підвищення загальної пропускну здатності безпроводної сенсорної мережі. Розроблено модулярні коректуючі коди, які забезпечують високу швидкодію процесів обробки даних за рахунок паралельного виконання операцій модулярного множення, виявлення помилок при виконанні арифметичних операцій та можливість адаптивної зміни коректуючої здатності кодів без зміни принципів роботи. Розроблено метод перетворення та обробки зображень в системі залишкових класів, який забезпечує стиснення зображень без втрат. Розроблено концепцію побудови безпроводних сенсорних мереж на основі принципів колективного інтелекту та розподіленого процесора, який функціонує на основі виділеної частини обчислювальних ресурсів безпроводних сенсорів. Розроблено метод передачі даних на основі стрибкоподібної зміни частоти, який базується на перетворенні системи залишкових класів та псевдовипадковій зміні частотного каналу і забезпечує можливість виявлення помилок на фізичному рівні за рахунок використання розширеної системи модулів.

Ключові слова: безпроводні сенсорні мережі, система залишкових класів, перетворення даних, обробка даних, модулярні коректуючі коди, передача даних.

Яцкив В. В. Теоретические основы создания и структурная организация компонентов беспроводных сенсорных сетей повышенной эффективности. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Национальный университет "Львовская политехника" Министерства образования и науки Украины, Львов, 2016.

В диссертации решено научно-прикладную проблему повышения эффективности функционирования беспроводных сенсорных сетей путем развития теоретических основ и средств преобразования, обработки и передачи данных на основе системы остаточных классов и модулярной арифметики. В диссертации разработаны методы, направленные на повышение общей производительности и надежности передачи данных и беспроводных сенсорных сетей. Разработан метод сетевого кодирования данных, основанный на преобразовании системы остаточных классов, обеспечивающий повышение общей пропускной способности беспроводной сенсорной сети за счет разделения пакетов данных с использованием взаимно простых модулей различной разрядности на подпакеты и дальнейшего объединения пакетов данных в общих узлах. Разработаны модулярные корректирующие коды, которые обеспечивают высокое быстродействие процессов кодирования данных за счет параллельного выполнения операций модулярного умножения, а также дают возможность адаптивного изменения корректирующей способности кодов без изменения принципов работы.

Разработан метод исправления многократных ошибок на основе модулярных корректирующих кодов, основанный на решении системы модулярных уравнений и обеспечивающий высокое быстродействие и низкую вычислительную сложность процесса декодирования. Разработан метод контроля ошибок при выполнении арифметических операций сложения, вычитания и умножения данных на основе модулярных корректирующих кодов, который позволяет исправлять ошибки при выполнении указанных операций.

Разработан метод сжатия изображений без потерь в системе остаточных классов, который обеспечивает повышение быстродействия процесса обработки за счет разделения изображения на части и параллельной обработки отдельных частей изображения.

Разработана концепция построения беспроводных сенсорных сетей на основе принципов коллективного интеллекта и распределенного процессора, которая обеспечивает выделение части вычислительных ресурсов беспроводных сенсоров для функционирования распределенного процессора и высокую живучесть сети за счет децентрализованного управления.

Разработан метод передачи данных на основе псевдослучайного изменения частоты, основанный на преобразовании системы остаточных классов и псевдослучайном выборе частотного канала для передачи остатков, и обеспечивает возможность выявления ошибок на физическом уровне беспроводных сенсорных сетях за счет использования расширенной системы модулей. Разработан метод повышения надежности передачи мультимедийных данных в беспроводных сенсорных сетях, который обеспечивает исправление пакетов ошибок за счет формирования транспонированной матрицы данных, защищенных модулярным корректирующим кодом в кодере и выполнения обратной операции в декодере. Разработаны структурные и схемотехнические решения устройств помехоустойчивой обработки данных на основе модулярных корректирующих кодов для исправления однократных символьных ошибок на ПЛИС, которые характеризуются низкой аппаратной сложностью и высоким быстродействием обработки данных.

Синтезированы на ПЛИС устройства декодирования данных на основе модулярных корректирующих кодов для исправления двукратных символьных ошибок, в которых поиск мультипликативных обратных элементов реализовано в виде таблиц, что обеспечило повышение быстродействия исправления ошибок. Разработано устройство многоуровневого преобразования данных в системе остаточных классов, которое обеспечивает объединение 12-ти разрядных данных от 16 сенсоров. Преобразования входных данных сенсоров представленных в системе остаточных классов в двоичную систему счисления реализовано на основе парного объединения остатков по двум модулям, что позволило уменьшить разрядность данных в процессе выполнения промежуточных вычислений, в свою очередь уменьшило аппаратные затраты на реализацию устройства преобразования. Разработана методика тестирования канала связи беспроводной сенсорной сети, которая позволяет выбирать необходимую схему контроля ошибок и параметры корректирующего кода в зависимости от состояния канала передачи данных.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, система остаточных классов, преобразования данных, обработка данных, модулярные корректирующие коды, передача данных.

Yatskiv V. V. The theoretical basis for the creation and organization of the structural components of increased efficiency wireless sensor networks. – Manuscript.

Thesis for the Doctor of technical sciences degree in specialty 05.13.05 – Computer systems and components. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The scientific and technical problem of increasing of data transmission reliability and efficiency in wireless sensor networks is solved in this work due to the development of theoretical fundamentals and tools of noise immunity of network and channel coding.

The methods for the increasing reliability of data transmission and efficiency of wireless sensor networks are elaborated. Network coding method based on Residue Number System is developed. It provides increasing of general capacity of wireless sensor network. The elaborated modular corrective codes allow the high processing speed in consequence of parallel execution of modular multiplication, detection of errors in arithmetic operations and adaptive changing of the code correction capability without altering the coding principles. The lossless image compression method based on Residue Number System is designed. The elaborated wireless sensor networks conception is founded on swarm intelligence principles and distributed processor which operates on separated part of computational resources of wireless sensors. The developed frequency hopping data transmission method based on Residue Number System transformation and pseudorandom channel change provides the possibility of error detection in physical layer due to the use of expanded system of modules.

Keywords: wireless sensor networks, residue number system, data transformation, data processing, modular corrective code, protocol data, data transmission.

Підписано до друку 27.05.2016 р.
Формат 60x84/16. Гарнітура Times.
Папір друк. Друк офсетний.
Умов. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 2,0.
Наклад 100 прим. Зам. № 02/16/2-б

Віддруковано у видавничому центрі "Вектор"
46018, м. Тернопіль, вул. Львівська, 12,
Тел. 8 (0352) 40-08-12

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ТР № 46 від 07 березня 2013р.
ФО Осадца Ю.В.