

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний економічний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії

БОЙЧУК Володимир Васильович

**Адаптивні алгоритми передачі даних в
безпроводних сенсорних мережах / Adaptive
Algorithms for Data Transmission in Wireless
Sensor Networks**

спеціальність: 123 - Комп'ютерна інженерія
магістерська програма - Комп'ютерна інженерія

Магістерська робота

Виконав студент групи КІм-21
В. В. Бойчук

Науковий керівник:
к.т.н., доцент, В. В. Яцків

Магістерську роботу допущено
до захисту:

11 " 01 " 2018 р.

Завідувач кафедри


 О. М. Березький

ТЕРНОПІЛЬ - 2018

Тернопільський національний економічний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії
Освітній ступінь «магістр»
спеціальність: 123 - Комп'ютерна інженерія
магістерська програма - Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 О.М. Березький
"___" _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ



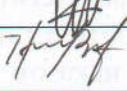

Бойчуку Володимирі Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи «Адаптивні алгоритми передачі даних у безпроводних сенсорних мережах / Adaptive Algorithms for Data Transmission in Wireless Sensor Networks»
керівник роботи д.т.н., професор Яцків В. В.
затверджені наказом по університету від 11 жовтня 2016 р. № 669.
2. Строк подання студентом роботи «15» січня 2018 року
3. Вихідні дані до магістерської роботи
Об'єкт дослідження – процес передачі даних у безпроводних сенсорних мережах.
Предмет дослідження – адаптивні алгоритми передачі даних.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
 - провести аналіз методів та алгоритмів передачі даних у безпроводних сенсорних мережах;
 - провести порівняльний аналіз адаптивних алгоритмів передачі даних у безпроводних сенсорних мережах;
 - дослідити вимоги до адаптивних алгоритмів передачі даних в безпроводних сенсорних мережах;
 - розробити адаптивний алгоритм передачі даних на основі модулярних корегуючих кодів;
 - розробити експериментальну установку для дослідження алгоритму передачі даних;
 - здійснити програмну реалізацію адаптивного алгоритму передачі даних у безпроводних сенсорних мережах.

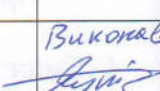

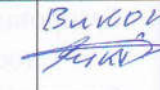
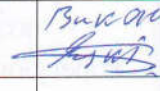
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
- тема, мета, завдання, методи досліджень, наукова новизна, практичне значення;
 - аналіз методів передачі даних у безпроводних сенсорних мережах;
 - структура безпроводного вузла;
 - структура безпроводної сенсорної мережі;
 - класифікація безпроводних сенсорних мереж;
 - алгоритм адаптивної передачі даних на основі модулярних корегуючих кодів;
 - алгоритм мережного кодування в системі залишкових класів;
 - структура протоколу передачі даних;
 - структурна схема середовища передачі даних;
 - програмно-апаратна реалізація алгоритму передачі даних.

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Антиплагіат	Мельник Г.М., доцент		
Нормо-контроль	Гураль І. В., викладач		

7. Дата видачі завдання «13» жовтня 2016 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Аналіз методів та алгоритмів передачі даних у безпроводних сенсорних мережах	3.11.2016 – 1.01.2017	Виконав 
2	Адаптивний алгоритм контролю помилок у безпроводних сенсорних мережах	2.01.2017 – 31.05.2017	Виконав 
3	Програмно апаратна реалізація та дослідження адаптивного алгоритму передачі даних	1.06.2017 – 25.01.2018	Виконав 
4	Нормоконтроль, попередній захист	16.01.2018 – 2.02.2018	Виконав 
5	Захист	4.02.2018	

Студент


(підпис)

Бойчук В.В.

Керівник магістерської роботи


(підпис)

д.т.н., професор Яцків В. В.

Вступ.....	3
1 Аналіз методів та алгоритмів передачі даних у безпроводних сенсорних мережах	
1.1 Безпроводні сенсорні мережі та їхнє застосування	
1.2 Програмні засоби передачі даних	
1.2.1 OPNET Modeler (Optimized Network Engineering Tools).....	
1.2.2 OMNeT ++ (Objective Modular Network Testbed in C ++).	
1.2.3 Вибір програмних засобів.....	
1.3 Постановка завдання.....	
2 Адаптивні алгоритми контролю помилок у безпроводних сенсорних мережах.....	
2.1 Адаптивний алгоритм передачі даних на основі модулярних корегуючих кодів.....	
2.2 Алгоритм передачі даних на основі мережного кодування.....	
2.3 Підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах на основі декомпозиції	
2.4 Модель передачі даних на основі модулярних корегуючих кодів.....	
3 Програмно-апаратна реалізація та дослідження адаптивного алгоритму.	
3.1 Програмно-апаратна реалізація алгоритму передачі даних.....	
3.2 Моделювання роботи мережі при використанні схем контролю помилок.....	
3.3 Експериментальне тестування каналу зв'язку безпроводної сенсорної мережі.....	
Висновки.....	
Список використаних джерел.....	

ВСТУП

Актуальність теми. Прогрес у галузі мікроелектроніки та безпроводних технологій передачі даних на сучасному етапі є 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.

Передача даних у БСМ – це найбільш енергозатратна операція, в якій використовується понад 70% енергії. Проте саме локальна обробка даних у безпроводних вузлах дасть змогу зменшити енергозатрати на передачу даних за допомогою застосування найбільш ефективних методів обробки протоколів передачі даних. Вищеокреслені питання зумовили актуальність авторського дослідження.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської роботи є вивчення поширених і розробка адаптивних алгоритмів передачі даних у безпроводних сенсорних мережах.

Досягнення визначеної мети передбачає вирішення таких завдань:

- проаналізувати методи та алгоритми передачі даних;
 - здійснити порівняльний аналіз обчислюваної складності адаптивних алгоритмів передачі даних;
 - дослідити вимоги до адаптивних алгоритмів передачі даних у безпроводних сенсорних мережах;
 - розробити асиметричний за складністю адаптивний алгоритм передачі даних;
 - здійснити програмну реалізацію адаптивного алгоритму передачі даних;
 - дослідити обчислювану складність адаптивного алгоритму передачі даних;
 - дослідити функціональні параметри безпроводної сенсорної мережі з використанням адаптивного алгоритму передачі даних;
- Об'єкт дослідження – безпроводні сенсорні мережі.

Предмет дослідження – адаптивні алгоритми передачі даних.

Методи дослідження. При вирішенні комплексу завдань використовувались такі методи: 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 при розробці концепції побудови безпроводних сенсорних мереж на основі колективного інтелекту, теорія та методи передачі даних.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Безпроводні сенсорні мережі та їхнє застосування

Безпроводні сенсорні мережі (БСМ) – це мережі розподілених мініатюрних автономних пристроїв, які використовують для вимірювання, обробки та передачі даних про фізичні параметри і процеси навколишнього середовища. Нині реалізація БСМ є можливою в результаті розвитку галузі мікроелектроніки та досліджень на стику таких напрямків, як вимірювання, обчислення та безпроводні комунікації (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Суміжні напрямки досліджень БСМ

Дослідження у сфері БСМ інтенсивно проводяться за такими основними напрямками.

1) схемотехніка:

- зменшення потужності споживання;
- розробка мікроелектромеханічних систем (MEMS);
- зменшення розмірів;
- зниження вартості;

- використання джерел енергії, що відновлюються;

2) обчислення:

- обчислювальна потужність;
- вбудоване програмне забезпечення;
- обробка даних у вузлі;
- спільні методи обробки;

3) мережні технології:

- самоконфігурація;
- масштабованість;
- динамічна топологія;
- управління топологією;
- гібридні мережі;
- розподілена маршрутизація і планування;

4) безпроводний зв'язок:

- багатоінтервальна маршрутизація;
- енергоефективність;
- короткотривалий цикл роботи;
- ефективне управління доступом;
- комунікації в спільній частотній області.

Структура безпроводного сенсорного вузла (рисунок 1.2) передбачає наявність таких шести основних компонентів: блоку сенсорів, аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), процесора, пам'яті, радіомодуля та блоку живлення. Блок обробки даних, який складається із процесора і пам'яті, є найбільш важливим компонентом безпроводного сенсорного вузла. Саме блок обробки даних здійснює приймання цих даних від АЦП, виконує арифметичні та логічні операції, забезпечує зберігання отриманих даних і їхню передачу на радіомодуль.

Дослідженнями та розробкою апаратного і програмного забезпечення БСМ займаються відомі університети та провідні фірми на ринку електроніки, такі як «Intel», «IBM», «Texas Instruments», «Microchip», «Freescale», «NXP», «Atmel» та інші.

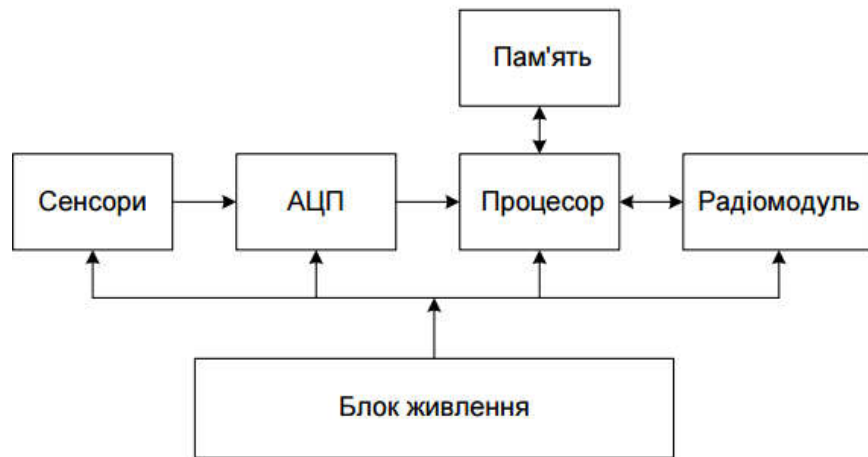


Рисунок 1.2 – Структурна схема безпроводного сенсорного вузла

На даний час успішно виконано проекти з розробки та впровадження БСМ у різних галузях діяльності, наприклад, у технічному й екологічному моніторингу, системах точного землеробства, цифровому зоопарку та інших.

Разом з тим, при розробці БСМ виникає багато проблем, пов'язаних переважно з відмовами передачі, обмеженими апаратними й обчислювальними ресурсами, живленням. Безпроводні сенсорні мережі здатні збирати інформацію про стан фізичного середовища, виконувати просту обробку зібраних даних і передавати їх на віддалений сервер. БСМ, які застосовуються в завданнях моніторингу, найчастіше використовують топологію кластерного дерева (рисунок 1.3). У цій топології сусідні вузли на шляху до базової станції є як джерелами інформації, так і ретрансляторами даних інших вузлів. Як правило, базова станція здійснює передачу даних через безпроводний канал зв'язку (Wi-Fi, GSM або супутниковий канал) на віддалений сервер, під'єднаний до мережі Інтернет.

На сучасному етапі основою для розробки БСМ є стандарт IEEE 802.15.4 та стек протоколів ZigBee. Його розробником виступив альянс компаній «Invensys», «Honeywell», «Mitsubishi Electric», «Motorola», «Philips» та інші, який називається «ZigBee».

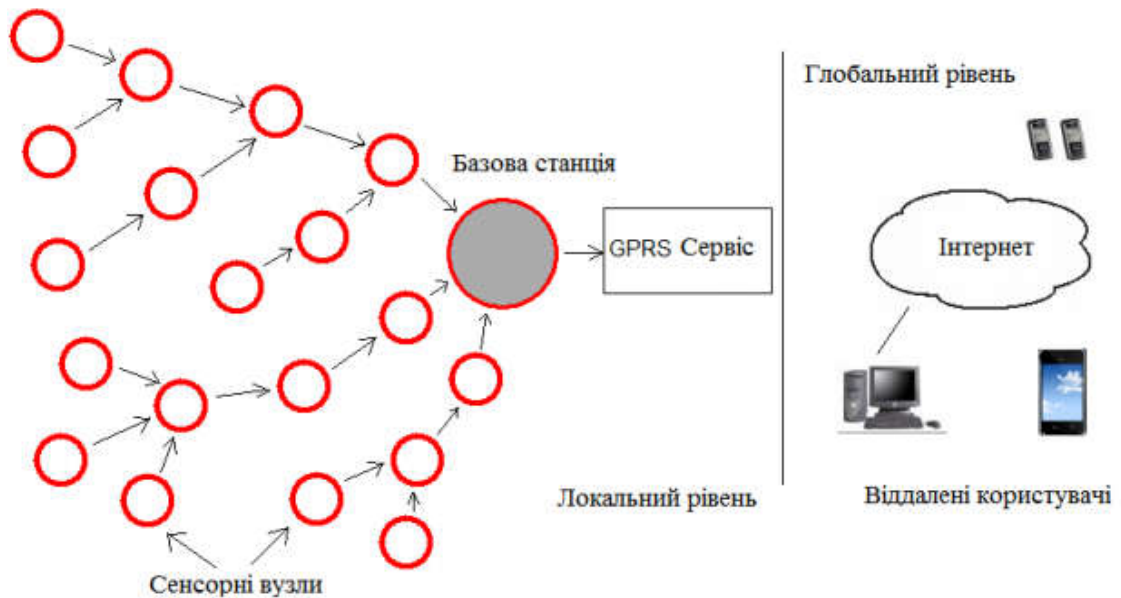


Рисунок 1.3 – Структура БСМ

Стек протоколів ZigBee побудований за принципом ієрархічної семирівневої моделі протоколів передачі даних у відкритих системах OSI (Open System Interconnection). Стек вміщає рівні стандарту IEEE 802.15.4, що відповідають за реалізацію каналу зв'язку, програмні мережні рівні та рівні підтримки додатків, визначені специфікацією альянсу ZigBee (рисунок 1.4).

Передача даних на фізичному рівні сенсорних мереж здійснюється відповідно до стандарту IEEE 802.15.4 [156]. Як середовище передачі даних використовується радіоканал або відкритий інфрачервоний канал.



Рисунок 1.4 – Стек протоколів ZigBee

Стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) передбачає роботу в трьох частотних діапазонах: один канал у діапазоні 868,0 – 868,6 МГц (для Європи); 10 каналів у діапазоні 902 – 928 МГц (крок центральних частот – 2 МГц); 16 каналів у діапазоні 2450 МГц (крок центральних частот – 5 МГц) (рисунок 1.5).

Основною вимогою до вузлів БСМ є мінімальне споживання струму при забезпеченні заданої функціональності. Це забезпечить тривалий час роботи від автономного джерела живлення. Одним з основних споживачів енергії вузла є радіотрансівер. Отже, завдання зменшення енергозатрат при передачі даних є актуальною проблемою.

До безпроводних вузлів висуваються такі вимоги:

- мінімальні розміри та вага;
- споживання мінімальної кількості енергії;
- робота з великою кількістю вузлів на обмеженій території;
- автономність і можливість роботи без обслуговування;
- адаптація до навколишнього середовища;
- низька вартість виробництва.

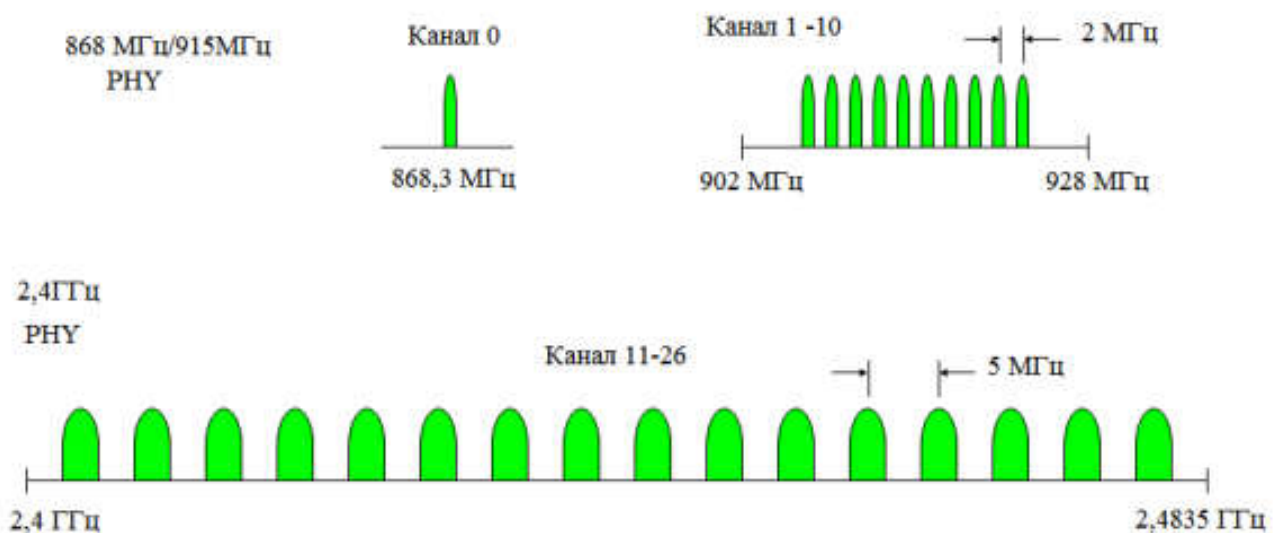


Рисунок 1.5 – Розподіл частотних каналів

Розроблено класифікацію БСМ, яка охоплює технологію передачі, середовище передачі, тип вузлів, тип живлення, площу розгортання та сферу застосування (рисунок 1.6).

Технологія передачі. Як середовище передачі у БСМ використовують радіоканал, безпроводний оптичний канал та канал на основі магнітної індукції.

Середовище передачі. Залежно від середовища передачі даних розрізняють БСМ, які працюють на землі, під землею, під водою (див. рисунок 1.6).

Наземні БСМ характеризуються великою кількістю недорогих вузлів (від сотень до тисяч), які передають дані на базову станцію. Оскільки джерело живлення обмежене і, як правило, не замінюється, вузли сенсорів можуть використовувати відновлювальні джерела енергії, наприклад, сонячні батареї. Для збереження енергії вузли використовують багатоінтервальну маршрутизацію.

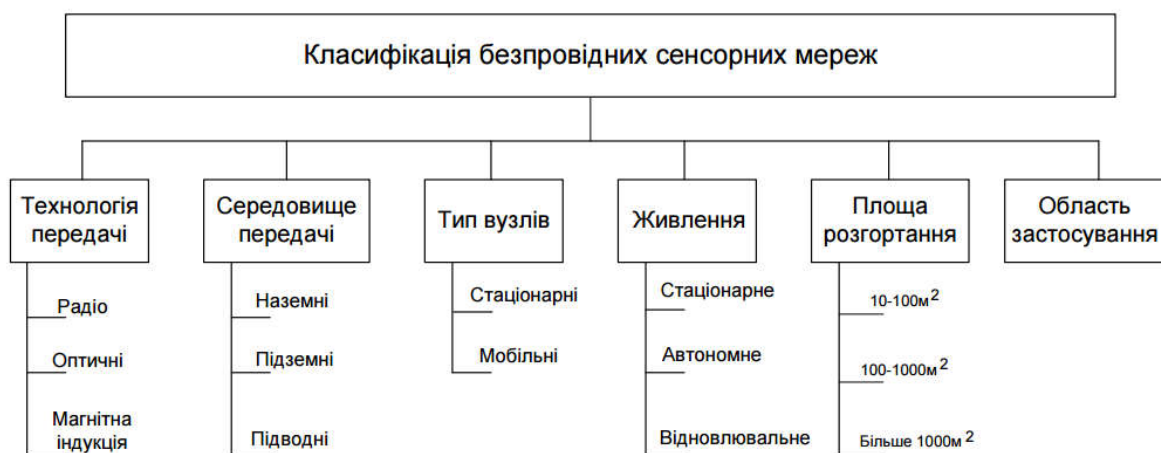


Рисунок 1.6 – Класифікація безпроводних сенсорних мереж

Підземні БСМ складаються з набору вузлів датчиків, розміщених під землею або в закритому просторі, такому як печери, шахти або метро. Основна відмінність між підземними і наземними БСМ – це середовище передачі, яке характеризується високим рівнем загасання і втрати сигналу, що необхідно враховувати при розробці протоколів передачі даних.

Підводні БСМ складаються з датчиків, розміщених під водою, наприклад, для моніторингу морів та океанів. Підводні мережі використовують акустичні хвилі і відповідно мають обмежену пропускну здатність, тривалу затримку поширення сигналу і проблеми щодо завмирання сигналу. Підводні вузли мають мати можливість самостійно адаптуватися до екстремальних умов навколишнього середовища океану. Підводні БСМ використовуються для моніторингу забруднення, сейсмічного моніторингу, моніторингу обладнання та підводної робототехніки.

Мобільні БСМ. Вузли мобільних БСМ можуть переміщатися і взаємодіяти з фізичним середовищем. При розробці БСМ із мобільними вузлами можуть виникнути проблеми, пов'язані з локалізацією вузлів, навігацією й управлінням рухомими вузлами, підтримкою зв'язності мережі, мінімізацією споживання енергії при русі та розробкою динамічних протоколів маршрутизації. При розробці протоколів маршрутизації необхідно враховувати швидкість руху вузлів і максимальну відстань, на яку можуть змінитися координати вузла.

Сфера застосування безпроводних сенсорних мереж. БСМ залежно від застосування можуть використовувати різні типи сенсорів, зокрема температури, вологості, руху, тиску, стану ґрунту, рівня шуму, диму, визначення хімічного складу (речовин, повітря), наявності або відсутності певних видів об'єктів, визначення швидкості, напрямку і розміру об'єкта, аудіо- та відеоданих. Серед основних сфер застосування БСМ необхідно виокремити такі: екологічний та технічний 25-й моніторинг, точне землеробство, охорона здоров'я, інтелектуальні будинки та системи безпеки.

Екологія. В екологічних додатках БСМ застосовуються для відстеження руху птахів, дрібних тварин і комах; моніторингу стану навколишнього середовища, параметри якого впливають на урожай і тваринництво; точного землеробства; біологічного моніторингу, моніторингу забруднення навколишнього середовища: повітря, водних ресурсів, у тому числі морів; виявлення лісових пожеж; метеорологічних або геофізичних досліджень.

Охорона здоров'я: фізіологічний моніторинг (частота серцевих скорочень, кров'яний тиск, температура тіла, частота дихання, рівень стресу та інші параметри життєдіяльності); невідкладна допомога; моніторинг поведінки літніх людей; моніторинг персоналу і пацієнтів усередині лікарні. Фізіологічні дані, зібрані за допомогою сенсорних мереж, можуть зберігатися протягом тривалого періоду і використовуватися для медичних досліджень.

Інтелектуальні будинки. З розвитком технологій безпроводні вузли будуть вмонтовані у побутові прилади, такі як пилососи, мікрохвильові печі, холодильники, люстри, мульти- і кавоварки та інші. Це дасть змогу побутовим приладам взаємодіяти один з одним і з зовнішньою мережею через мережу Інтернет або супутниковий канал зв'язку.

Системи технічного моніторингу. БСМ ефективно використовуються в системах технічного моніторингу, зокрема для контролю мостів, нафтових танкерів і газопроводів, моніторингу будівель та споруд у сейсмічно активних районах, а також у системах обліку енергоресурсів для індивідуального та промислового використання.

Системи безпеки. БСМ застосовують в індивідуальних та промислових системах безпеки, зокрема системах контролю периметру, визначення вторгнення, віддаленого спостереження та інших.

Запропонованим способом здійснюється оперативне перемикання світлофорів з метою організації «зеленого коридору» для автомобілів спеціального призначення на основі технології безпроводних сенсорних мереж. Автомобілям спеціального призначення надається безпроводний пульт із запрограмованим кодом доступу. При в'їзді автомобіля в зону дії безпроводного модуля (0,1 – 1,0 км), який міститься у світлофорі, передається код доступу, за допомогою якого відбувається перемикання світлофора в режим «увага» (жовтий миготливий колір) за визначеним алгоритмом. При виїзді із зони дії зв'язку світлофор переходить у нормальний режим роботи (рисунок 1.7). Для усунення несанкціонованого доступу до керування світлофорами всі команди передаються у зашифрованому вигляді. Для захисту команд використано

алгоритм 128-бітного AES-шифрування та модифікований метод стрибкоподібної зміни частоти.

Безпроводні модулі, які розміщені на одному перехресті, з'єднуються в мережу для коректного перемикання світлофорів у зоні перехрестя (рисунок 1.8). Мережа організована на основі однотипних ZigBee-модулів-маршрутизаторів за топологією мережі «зірка», або «mesh».

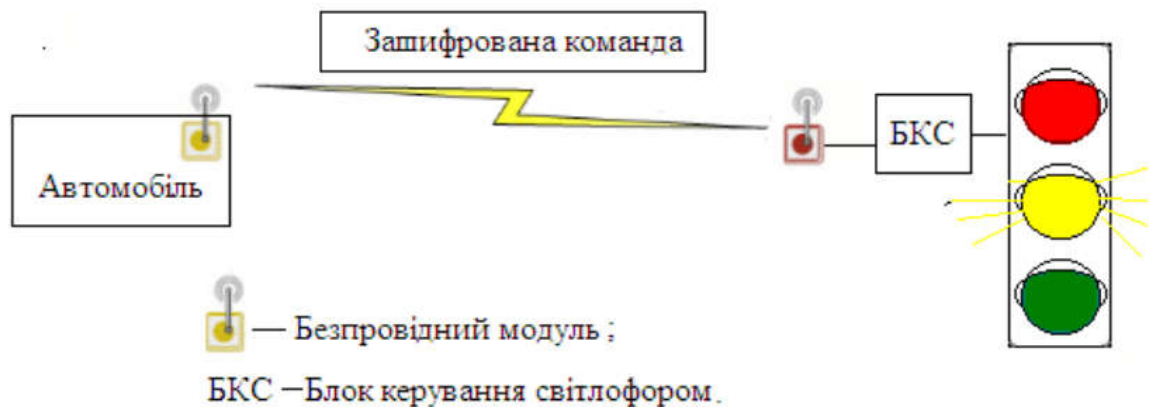


Рисунок 1.7 – Принцип безпроводного керування світлофором із використанням ZigBee-модулів

У ZigBee-модулях, які розміщені в світлофорі, передбачена функція документування, яка зберігає у флеш-пам'яті час та код пристрою, з якого відбулося керування світлофором. За необхідності дані з флеш-пам'яті можна зчитати через безпроводний інтерфейс. Ця мережа при підімкненні відеосенсорів може бути використана для моніторингу дорожнього руху.

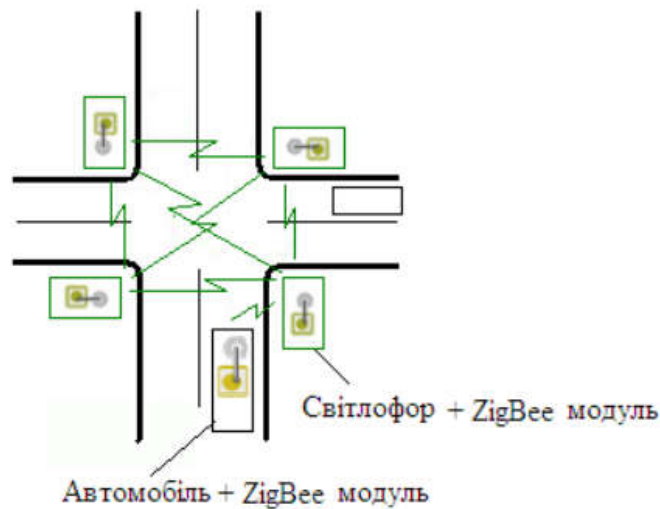


Рисунок 1.8 – Безпроводна сенсорна мережа керування світлофорами

Такий підхід організації «зеленого коридору» дасть змогу підвищити швидкість та безпеку при проїзді регульованих перехресть автомобілями спеціального призначення, а також зменшити потребу у відімкненні світлофорів на тривалий термін.

1.2 Програмні засоби передачі даних

1.2.1 OPNET Modeler (Optimized Network Engineering Tools)

OPNET Modeler – потужне середовище імітаційного моделювання дискретних подій і станів. Воно містить безліч бібліотек мережевих технологій і протоколів зв'язку, таких як TCP / IP, протокол передачі гіпертексту (HTTP), технологія асинхронного режиму передачі (ATM) і FrameRelay, IP-QoS, 802.11 (Wi-Fi), ZigBee та ін. Одним із безлічі модулів, доступних в OPNET Modeler, є бездротовий модуль. Він розширює функціональність середовища для імітаційного моделювання та аналізу бездротових мереж.

У версії OPNET Modeler 14.0 доступні моделі вузлів ZigBee, розроблені компанією «OPNET». При цьому вихідний код моделі мережевого рівня і рівня додатків прихований від користувачів. Також існує модель вузлів-сенсорів із відкритим вихідним кодом, що відповідає стандарту IEEE 802.15.4, яку

розробляє спільнота «OPEN-ZB». Різні версії цієї моделі працюють з OPNET Modeler 10.5 і вище (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Існуючі моделі OPEN-ZB для «OPNET»

OPEN-ZB-модель	Дата випуску	Версія OPNET
OPNET Simulation Model v 3.0b	20.11.2009	15.0
OPNET Simulation Model v 2.1	31.03.2009	14.5
OPNET Simulation Model v 2.0	22.05.2007	11.5
OPNET Simulation Model v 1.0	06.04.2006	10.5

Модель OPEN-ZB реалізує фізичний рівень і рівень доступу до середовища та відповідає стандарту IEEE 802.15.4. Версія моделі 2.1 підтримує тільки топологію «зірка», де комунікації відбуваються між кінцевими пристроями через центральний пристрій, який називається координатором приватної мережі.

У моделі версії 2.1 існує два типи вузлів:

- 1) `wpan_analyzer_node` – вузол, який збирає глобальні для приватної мережі статистичні дані;
- 2) `wpan_sensor_node` – вузол, який реалізує протоколи зв'язку стандарту IEEE 802.15.4-2003.

Структура вузла-сенсора, використана в моделі, складається із чотирьох функціональних блоків (рисунок 1.9):

1. Фізичний рівень формують радіопередавач (tx) і приймач (rx), які відповідно до специфікації IEEE 802.15.4 працюють на частоті 2,4 ГГц зі швидкістю обміну даними 250 Кбіт/с. Потужність передавача встановлена на рівні 1 мВт з модуляцією QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Фізичний рівень реалізований за допомогою існуючого в OPNET Modeler бездротового модуля із зазначенням параметрів, що відповідають стандарту IEEE 802.15.4.

2. Рівень доступу до середовища реалізує алгоритм CSMA/CA з фіксованими тимчасовими слотами очікування передачі (slotted CSMA/CA) і механізм гарантованих тимчасових слотів (GTS). Нечутливі до часу доставки кадри даних зберігаються в необмеженому буфері та передаються в мережу

протягом періоду активної конкуренції, відповідно до алгоритму CSMA/CA з фіксованими тимчасовими слотами очікування передачі. Цей рівень також може генерувати кадри-маркери для синхронізації пристроїв у мережі, якщо вузол працює в режимі координатора.

3. Рівень додатку складається з двох генераторів трафіку (Traffic Source і GTS Traffic Source) та одного одержувача (Traffic Sink). Джерело звичайного трафіку (Traffic Source) генерує кадри даних із прапором підтвердження доставки і без, які передаються протягом періоду конкурентного доступу (CAP). Джерело трафіку (GTS Traffic Source) з гарантованими тимчасовими слотами може використовуватися для створення кадрів даних із прапором підтвердження доставки і без, які чутливі до затримок у мережі. Модуль одержувача приймає кадри від нижніх рівнів і зважає на мережну статистику.



Рисунок 1.9 – Модель OPEN-ZB 2.1

4. Модуль батареї обчислює спожитий рівень енергії і той, який залишився. Значення за замовчуванням для моделі встановлені відповідно до специфікації MICAz.

Модель належно документована, продовжує доопрацьовуватися і підтримуватися. Більш детальна характеристика моделі подана в технічному описі.

У нещодавно розробленій версії 3.0 (beta) також реалізовані такі функції:

- мережний рівень ZigBee;
- ієрархічна маршрутизація по дереву ZigBee;
- перевірка адрес вузлів для підтримки адресної схеми дерева кластерів ZigBee.

1.2.2 OMNeT ++ (Objective Modular Network Testbed in C ++)

OMNeT ++ – це середовище імітаційного моделювання дискретних подій і станів з відкритим вихідним кодом, засноване на компонентах, що стають дедалі популярнішими. Основна сфера застосування – моделювання мереж передачі даних, IT-систем і бізнес-процесів. Компоненти OMNeT++ написані мовою програмування C++.

На базі середовища моделювання OMNeT ++ 4.1 побудований симулятор різних протоколів бездротових сенсорних мереж Castalia (поточна версія 3.1). У ньому реалізована модель також відповідає стандарту IEEE 802.15.4.

На базі розглянутого середовища моделювання існують бібліотеки INETMANET і MiXiM, які дають змогу створювати моделі бездротових сенсорних мереж, але на поточний момент готові моделі відсутні.

Castalia – це симулятор мереж із низьким рівнем енергоспоживання. Особливістю цього симулятора є те, що команда розробників у ході його створення визначила основним завданням реалізувати моделі не тільки рівнів передачі даних, а й змоделювати фізичні процеси, дані про які збираються у вузлах. У результаті бездротові сенсори пов'язані між собою не тільки

бездротовими каналами зв'язку, а й фізичним процесом, параметри якого вони вимірюють.

Внутрішня структура вузла зображена на рисунку 1.10. Суцільні стрілки позначають проходження повідомлень між модулями, а пунктирні – інтерфейс між ними з викликом простих функцій.

Модель вузла представлена такими модулями:

1. Модуль управління сенсорами дає змогу генерувати більш реальний трафік у БСС, ніж використання генераторів пакетів даних, запропонованих іншими моделями.

2. Модуль додатка найчастіше використовується користувачами симулятора для реалізації тестованих алгоритмів. У симуляторі є кілька найпростіших модулів програми, як наприклад, додаток оцінювання пропускнуої здатності мережі.

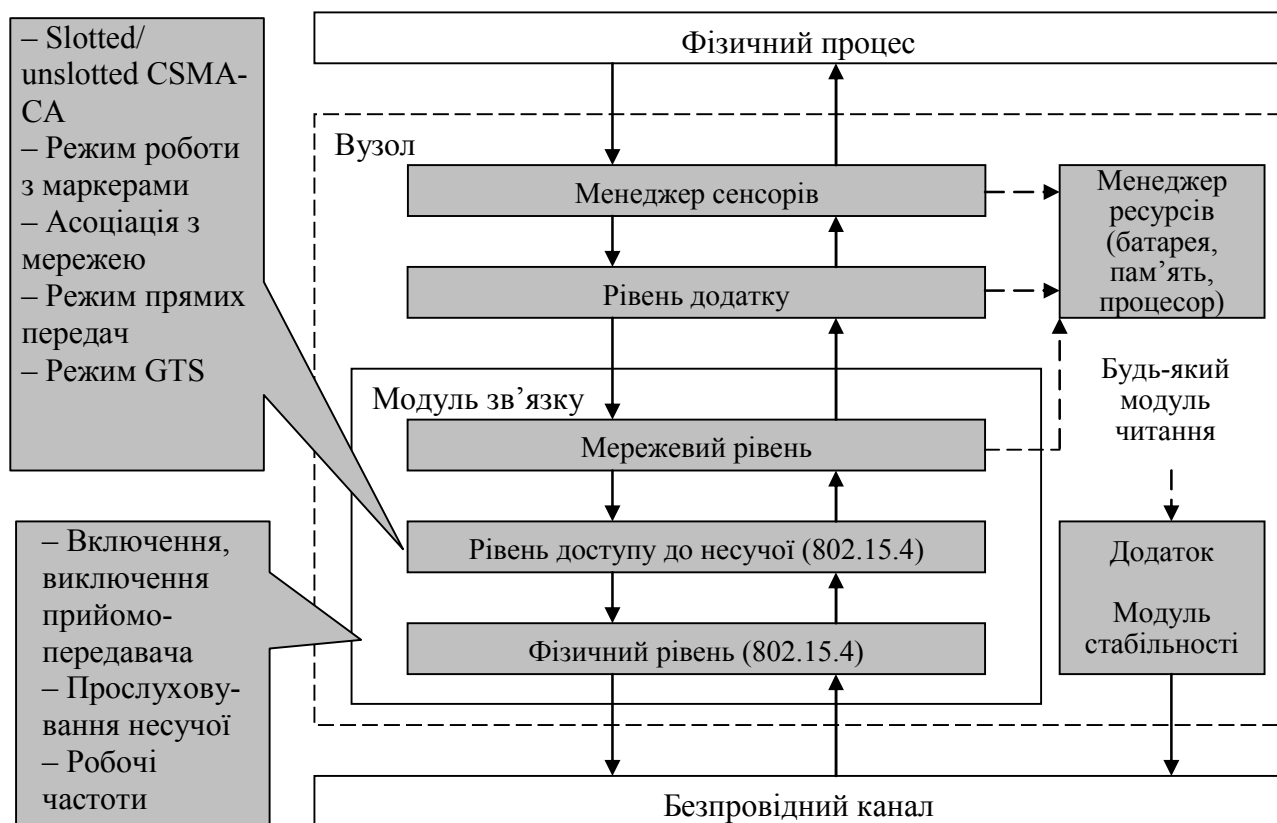


Рисунок 1.10 – Внутрішня структура вузла

3. Модуль зв'язку складається з трьох рівнів:

– мережний рівень дає змогу реалізувати різні алгоритми маршрутизації в бездротовій сенсорній мережі. На поточний момент готові найпростіші алгоритми маршрутизації (наприклад, маршрутизація по дереву);

– рівень управління доступом до середовища, в тому числі IEEE 802.15.4. У версії 3.1 реалізована основна частина завдань рівня, описана в стандарті IEEE 802.15.4-2006;

– фізичний рівень. Розробники Castalia приділили особливу увагу моделюванню фізичного рівня бездротового сенсора. У симуляторі задані параметри таких модулів: Mica2_CC1000 і TelosB_CC2420.

4. Модуль мобільності дає можливість зберегти стан інших вузлів у мережі й надає дані про становище вузла моделі радіоканалу.

5. Модуль управління ресурсами управляє різними ресурсами вузла і найбільш важливим із них – енергією, що споживається.

1.3.3 Вибір програмних засобів

Найбільш перспективними для подальшої підтримки та розвитку є моделі OPEN-ZB і Castalia. Особливу увагу необхідно звернути на модель Castalia. Оскільки команда розробників спочатку визначила завдання змоделювати всі аспекти роботи безпроводних сенсорних мереж, її вихідний код є відкритим. Найбільш важливим є те, що середовище моделювання, на основі якого вона побудована, має також відкритий вихідний код і розповсюджується безкоштовно для некомерційного використання.

Проте модель OPEN-ZB побудована на базі дуже дороговартісного комерційного продукту OPNET Modeler 10.5 і вище, безкоштовного тільки для університетів США. У таблиці 1.2 подано результати аналізу, проведеного з метою вибору найкращої моделі БСМ.

Таблиця 1.2 – Вибір найкращої моделі БСМ

	NS-2	OPNET Modeler (Open-ZB)	OMNET++ & Castalia
Розрахунок використаної вузлами енергії	–	+	+
Визначення енергії в поточному каналі	+	+	+
Відкритий код	+	–	+
Мобільність вузлів	–	–	+
Відповідність специфікації ZigBee	–	–	+
Наявність протоколів маршрутизації	–	+	+
Ціна	FREE	37000\$	FREE

1.3 Постановка завдання

У магістерській роботі визначено такі основні завдання:

- провести аналіз методів та алгоритмів передачі даних;
- здійснити порівняльний аналіз обчислюваної складності адаптивних алгоритмів передачі даних;
- дослідити вимоги до адаптивних алгоритмів передачі даних у безпроводних сенсорних мережах;
- розробити асиметричний за складністю адаптивний алгоритм передачі даних;
- здійснити програмну реалізацію адаптивного алгоритму передачі даних;
- дослідити обчислювану складність адаптивного алгоритму передачі даних;
- дослідити функціональні параметри безпроводної сенсорної мережі з використанням адаптивного алгоритму передачі даних;
- проаналізувати методи передачі даних у безпроводних сенсорних мережах;
- охарактеризувати алгоритми передачі даних у безпроводних сенсорних мережах;

- провести контроль помилок у кінцевому та проміжних вузлах безпроводної сенсорної мережі;
- розробити адаптивний алгоритм контролю помилок у БСМ;
- здійснити реалізацію адаптивного алгоритму передачі даних.

Відповідно до окреслених завдань проведено аналіз стану розробки безпроводних сенсорних мереж і сфер їхнього застосування. Розроблено узагальнену класифікацію БСМ за такими ознаками: технологією та середовищем передачі, типом вузла, типом живлення, площею розгортання та сферою застосування. Досліджено алгоритм кодування та передачі даних у безпроводних сенсорних мережах.

2 АДАПТИВНІ АЛГОРИТМИ КОНТРОЛЮ ПОМИЛОК У БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Адаптивний алгоритм передачі даних на основі модулярних корегуючих кодів

Системи моніторингу на основі технології безпроводних сенсорних мереж ефективно застосовують у різних сферах діяльності людини. Крім найбільш поширених систем технічного та екологічного моніторингу, нині дедалі більше дослідників звертає увагу на розробку людино-орієнтованих систем, тобто систем, спрямованих на підвищення рівня безпеки та забезпечення комфорту проживання людини.

БСМ щораз ближче проникають у середовище проживання людини. Це системи моніторингу екологічної обстановки у великих містах і промислових районах, інтелектуальних будинків, моніторингу здоров'я та інші.

Оскільки БСМ працюють на частоті 2,4 ГГц, а також ураховуючи інтенсивне використання в міському просторі інших безпроводних технологій (Wi-Fi, Bluetooth та ін.), актуальним нині є завдання забезпечення надійної роботи систем моніторингу, побудованих на основі стандарту IEEE 802.15.4.

При розробці протоколів передачі даних БСМ насамперед необхідно врахувати затрати енергії, оскільки більшість таких застосувань використовує автономні джерела живлення.

Використання спільних частотних каналів Wi-Fi і ZigBee призводить до різкого збільшення кількості втрачених пакетів у ZigBee-мережах.

Для забезпечення заданої надійності передачі даних у БСМ розроблено і використовуються такі схеми контролю помилок: ARQ, FEC, HARQ.

З наведених схем найбільш ефективною з позиції мінімальних енергозатрат та пропускну здатності є схема HARQ. Однак застосування цієї схеми передбачає зміну алгоритму завадостійкого кодування (вибір більш потужного коректуючого коду за необхідності), що призводить до неефективного використання обчислювальних ресурсів безпроводних модулів.

Пропонуємо адаптивну схему контролю помилок у БСМ на основі модулярних корегуючих кодів.

Особливістю таких кодів є можливість адаптивно змінювати корегуючі можливості коду без зміни алгоритму кодування.

У модулярних коректуючих кодах значення контрольного символу обчислюється за формулою:

$$x_{n+1} = |(v_1 \cdot x_1 + v_2 \cdot x_2 + \dots + v_i \cdot x_i + \dots + v_n \cdot x_n)|_P, \quad (2.1)$$

де v_i – відносно прості коефіцієнти з P ,

x_i – значення інформаційного символу.

Введення одного перевірного символу дає змогу виправляти помилки в одному інформаційному символі.

Для виправлення помилок у двох інформаційних символах вводимо додатковий символ перевірки і вибираємо відносно прості коефіцієнти.

Значення символу перевірки обчислюється за такою формулою:

$$x_{n+2} = |(w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + \dots + w_i \cdot x_i + \dots + w_n \cdot x_n)|_P. \quad (2.2)$$

Отже, використання модулярних коректуючих кодів дає змогу реалізувати адаптивну схему контролю помилок у БСМ.

Суть цієї схеми полягає в тому, що пакет даних відправляється з додаванням одного перевірного символу, який дає можливість виправляти помилку в одному інформаційному символі. Якщо помилку виправити не вдалося, то приймач відправляє відповідний запит. Отримавши запит, передавач передає не пакет даних, а тільки наступний перевірючий символ. Отримавши другий перевірючий символ, приймач може виправити помилки в двох інформаційних символах. Відповідно відбувається підвищення надійності передачі даних при зменшенні затрат енергії.

Недоліком відомих адаптивних алгоритмів передачі даних, які враховують стан маршрутів, є відсутність можливості зміни корегуючих властивостей кодів у процесі роботи системи передачі, що призводить до збільшення надлишковості при передачі цих даних і відповідно до зменшення корисної пропускної здатності через повторну передачу пакетів або надлишкових даних для виявлення та виправлення помилок.

Для усунення вищенаведених недоліків розроблено алгоритм передачі даних на основі модулярних корегуючих кодів (рисунок 2.1).

Вибір параметрів корегуючих кодів здійснюється залежно від значення індикатора якості зв'язку (LQI) відповідно до даних таблиці 2.1. Після цього сформований пакет даних (дані + перевірочні символи) надходить на блок передачі даних – блок 4 (див. рисунок 2.1).

Таблиця 2.1 – Параметри коректуючого коду за різних значень LQI

№	Значення LQI	Швидкість коду R	Кількість символів, що можна виправити
1	225–255	Виявлення помилок	
2	193–224	0,79	1
3	161–192	0,65	2
4	129–160	0,56	3
5	97–128	0,48	4
6	65–96	0,43	5
7	33–64	0,39	6
8	0–32	0,35	7

Під час подальших сеансів передачі даних при виявленні декількох альтернативних маршрутів із потрібним вузлом мережі маршрутизатор використовує історію з'єднання (аналізує значення LQI попередніх з'єднань) (блок 2) і вибирає маршрут проходження пакета з найменшою ймовірністю пошкодження цих даних і необхідними параметрами модулярного коректуючого коду (блок 3). Вимірювання LQI здійснюється для кожного прийнятого пакета, і результат у вигляді цілого числа в діапазоні від 0x00 до 0xff 162 передається до MAC-підрівня. Мінімальні та максимальні значення LQI (0x00 і 0xff) відповідають найнижчій і найвищій якості з'єднання.

Діапазон значень LQI рівномірно розподіляється між верхньою і нижньою межами (0x00 і 0xff). При цьому використовуються щонайменше вісім унікальних значень LQI.

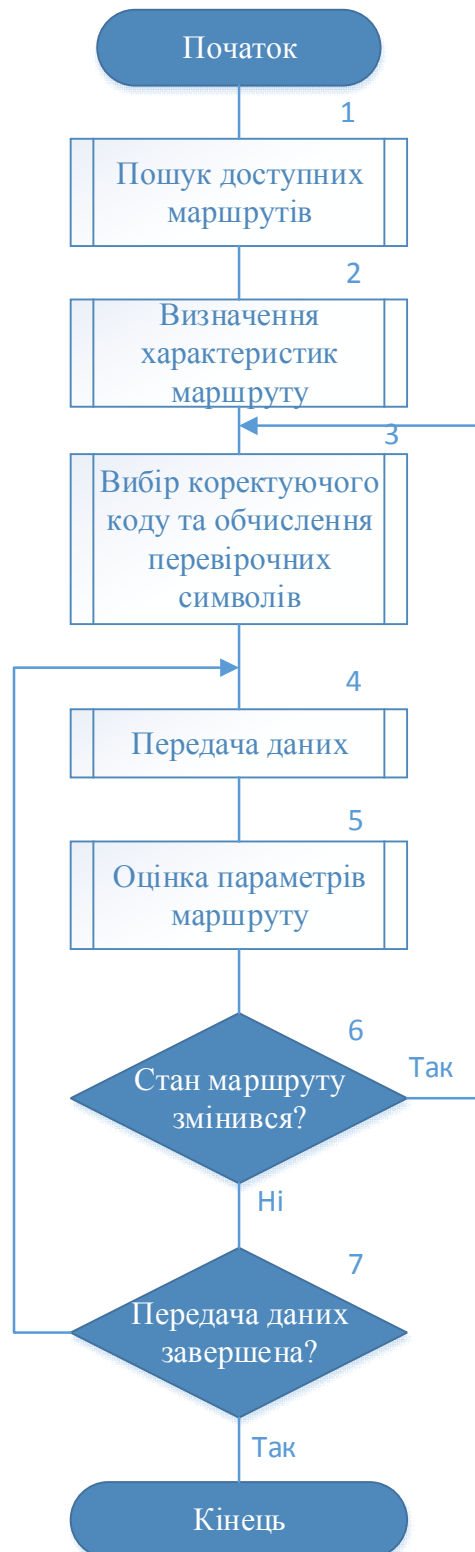


Рисунок 2.1 – Алгоритм адаптивної передачі даних на основі модулярних корегуючих кодів

У процесі передачі даних передавач постійно оцінює значення LQI маршруту (блок 5), і при його зміні (блок 6), відповідно до даних таблиці 2.1, відбувається адаптивна зміна параметрів коректуючого коду. Після закінчення передачі масиву даних (блок 7) алгоритм відновлює свою роботу з пошуку доступних маршрутів (блок 1).

2.2 Алгоритм передачі даних на основі мережного кодування

У процесі реалізації алгоритму (рисунок 2.2) у блоці 1 відбувається вибір взаємно простих модулів та їхній розподіл для всіх вузлів мережі. На наступному кроці з отриманого повідомлення обчислюються залишки за вибраними модулями (блок 2), які передаються знайденими маршрутами (блок 3).

За умови, що наступний вузол (блок 4) мережі є незалежним (вузол, який ретранслює дані тільки від одного джерела), по цьому маршруту передаються залишки більшої розрядності, в іншому разі дані обробляються на проміжному вузлі (блок 6) і передаються (блок 7) наступним вузлам у мережі.

Таким чином, дані (залишки) надходять на кінцевий вузол (блок 8) (базову станцію) і відновлюються у блоці 9 у позиційну систему числення.

Для розробки структури протоколу необхідно розглянути обмін даними між координатором і кінцевим пристроєм. Обмін повідомленнями між кінцевим пристроєм і координатором у БСМ стандарту ZigBee виконується без використання кадрів – маяків на основі послідовності операцій (рисунок 2.3). Використовуючи схему CSMA-CA, кінцевий пристрій посилає інформаційний кадр координатору.

Координатор відправляє кадр-підтвердження (опційно) про успішну доставку даних.

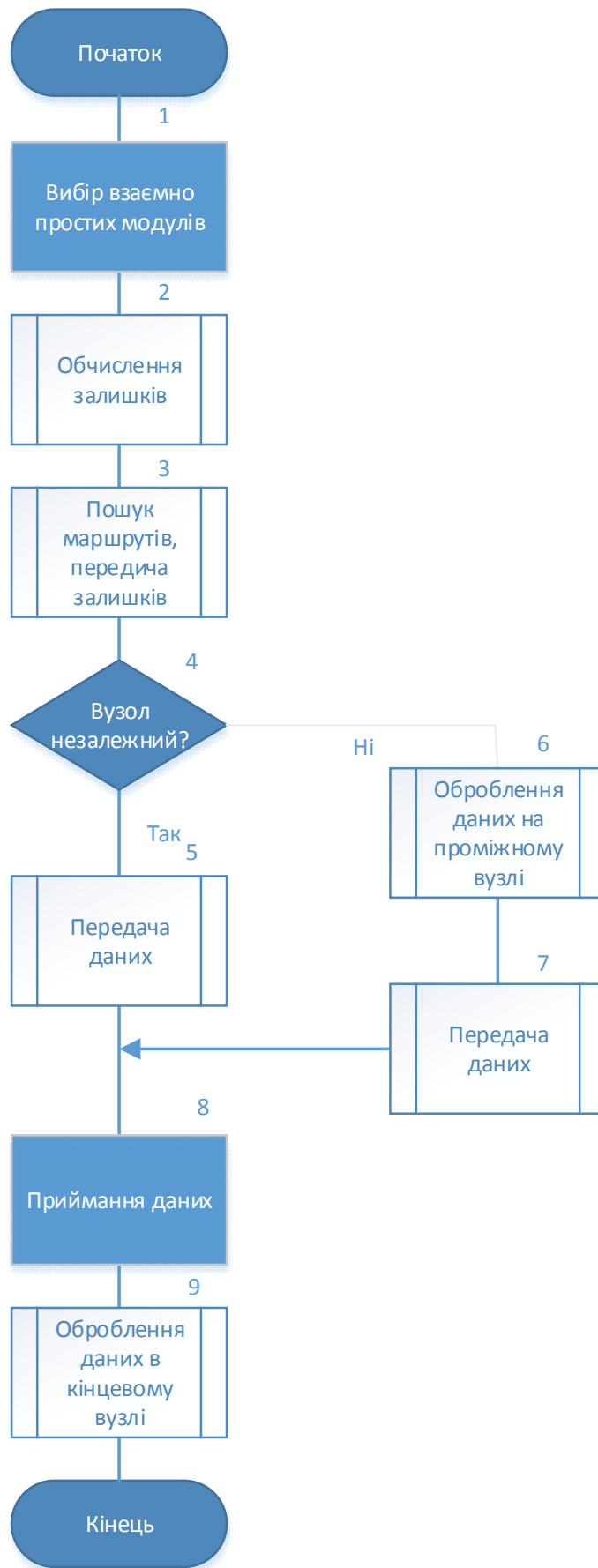


Рисунок 2.2 – Алгоритм мережного кодування у системі залишкових класів



Рисунок 2.3 – Обмін даними з координатором без використання маяків

Загальний формат кадру управління доступом до середовища (MAC-кадру) складається з поля MAC-заголовку (MHR), поля даних MAC і завершальної частини MAC-кадру (MFR) (рисунок 2.4).

Поле управління кадром займає 2 байти і містить інформацію, що визначає тип кадру, адресні поля та інші поля управління (рисунок 2.5).

У протоколі ZigBee використовуються чотири типи кадру, яким відповідають коди (000 – 011) (таблиця 2.2).

Байтів 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	Змінне	2
Управління кадром	Порядковий номер	PAN ID-одержувача	Адреса одержувача	PAN ID-відправника	Адреса відправника	Поле даних	FCS
		Адресні поля					
MHR						Поле даних MAC	MFR

Рисунок 2.4 – Загальний формат MAC-кадру: FCS – контрольна сума кадру

У розробленому протоколі модифіковано субполе «тип кадру», яке має 3 біти, і через зарезервовані у стандартному протоколі коди (100 – 111) вказується, що при формуванні пакетів використовується мережне кодування даних (див. таблиця 2.2).

Біт: 0–2	3	4	5	6	7–9	10–11	12–13	14–15
Тип кадру	Безпека ввімкнена	Затримка кадру	Запит підтвердження	Компресія PAN ID	Резерв	Режим: адреса одержувача	Версія кадру	Режим: адреса відправника

Рисунок 2.5 – Поле управління кадром

Поле даних містить три типи субполів, зокрема субполе номера кадру даних SN1, SN2, значення модуля, за яким обчислено залишки, та значення залишків b_{ij} . Якщо пакет даних містить залишки за одним модулем, то формується пакет даних. При об'єднанні пакетів даних також формується пакет даних.

Таблиця 2.2 – Значення субполя «тип кадру»

Тип кадру	Опис
000	Маяк
001	Дані
010	Підтвердження
011	MAC-команда
100	Мережне кодування (залишки за одним модулем)
101	Мережне кодування (залишки за двома модулями)
110–111	Зарезервовані

Відомі адаптивні алгоритми передачі даних, які враховують стан маршрутів, мають певні недоліки. Зокрема, це відсутність можливості зміни корегуючих властивостей кодів у процесі роботи системи передачі, що призводить до збільшення надлишковості при передачі таких даних і відповідно до зменшення корисної пропускну здатності внаслідок повторної передачі пакетів або надлишкових даних для виявлення та виправлення помилок.

Для усунення таких недоліків розроблено алгоритм передачі даних на основі модулярних корегуючих кодів. Особливістю модулярних корегуючих кодів є те, що перевірочні символи незалежні, тобто обчислення наступного перевірочного символу не пов'язано з попереднім.

Суть розробленого адаптивного алгоритму передачі даних полягає в тому, що після знаходження доступних маршрутів та визначення їхніх характеристик відбувається вибір параметрів модулярного корегуючого коду. В результаті формується і передається пакет з необхідною кількістю перевірочних символів (рисунок 2.6а). Якщо помилок у пакеті виявилось більше, ніж можна виправити

за корегуючим кодом, то приймач відправляє запит на передачу наступного перевірного символу тощо (рисунок 2.6б).

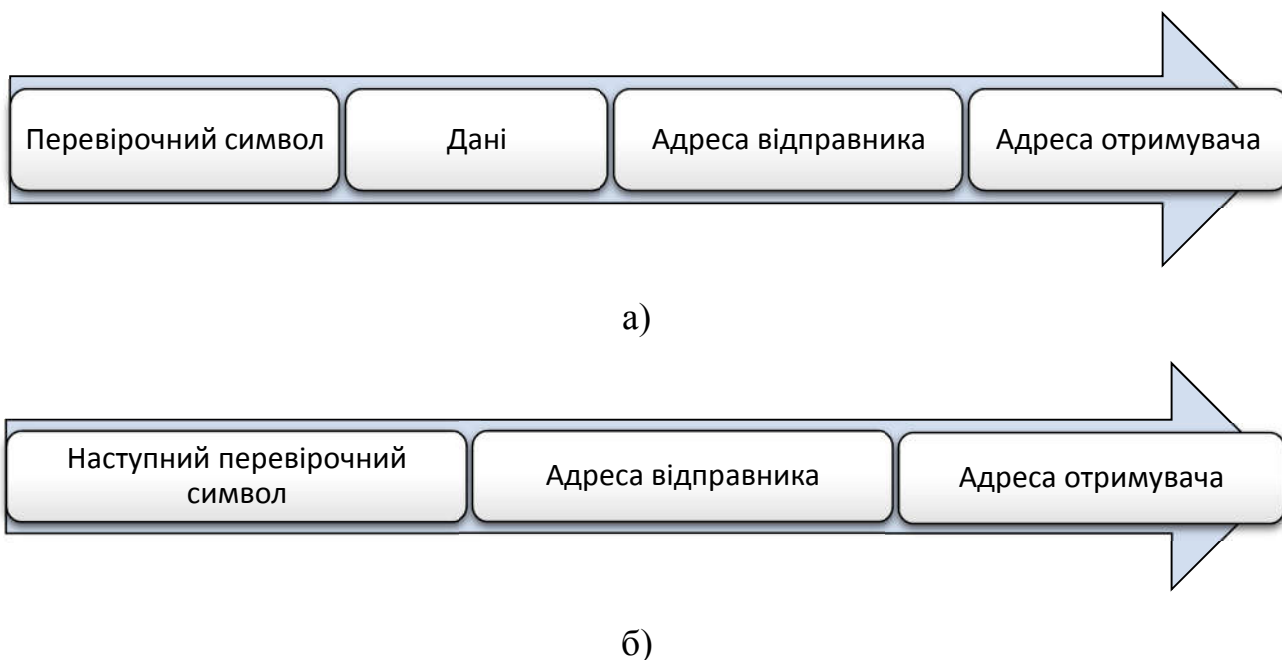


Рисунок 2.6 – Структура протоколу передачі даних

Після отримання наступного перевірного символу декодер виправляє помилки в інформаційних символах, у результаті чого збільшується корегуюча здатність коду.

2.3 Підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах на основі декомпозиції

При передачі мультимедійних даних у безпроводних сенсорних мережах необхідно враховувати обмеження, що накладаються на пропускну здатність каналів зв'язку та обсяг пам'яті безпроводного модуля.

Мультимедійні дані чутливі до втрати пакетів, зокрема втрата невеликої частини даних зображення призводить до відкидання зображення повністю або до різкого зниження його якості. Враховуючи обмежений розмір поля даних структури протоколів БСМ, мультимедійний контент розділяється на порівняно велику кількість пакетів для відновлення зображення, причому ці пакети не мають бути втрачені або спотворені в процесі їхньої передачі.

Поширені методи стиснення та формати зберігання мультимедійного контенту не є стійкі до впливу завад, які виникають у безпроводних каналах зв'язку і призводять до спотворення даних. Спотворення одного біту стиснутих даних унеможлиблює відновлення всього повідомлення (зображення). Отже, необхідно покращити наявні методи передачі пакетів з урахуванням характеристик мультимедійного контенту та типу завад. Для цього запропоновано використати модулярні коректуючі коди та принцип декомпозиції даних.

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

$$\begin{aligned}
 A_1 &= (x_1^1, x_2^1, \dots, x_i^1, \dots, x_k^1, x_{k+1}^1), \\
 A_2 &= (x_1^2, x_2^2, \dots, x_i^2, \dots, x_k^2, x_{k+1}^2), \\
 A_j &= (x_1^j, x_2^j, \dots, x_i^j, \dots, x_k^j, x_{k+1}^j), \\
 A_k &= (x_1^k, x_2^k, \dots, x_i^k, \dots, x_k^k, x_{k+1}^k),
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

де x_i^j – інформаційний символ розрядності m ;

k – кількість інформаційних символів у пакеті.

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

$$(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^h), (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^h), (x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^h), (x_{k+1}^1, x_{k+1}^2, \dots, x_{k+1}^h), \tag{2.4}$$

де h – кількість символів у рядку, $h = k + r$;

r – кількість перевірочних символів.

За такої організації передачі даних і пакета помилок, довжина якого не перевищує k символів, допускається пошкодження одного або двох сусідніх символів:

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

(2.5)

або

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

(2.6)

На приймальній стороні на основі прийнятих пакетів формується початковий масив даних, в якому пошкоджені символи потрапляють у різні блоки, за якими здійснюється виявлення та виправлення помилок.

При передачі та прийманні даних на основі декомпозиції (рисунок 2.7) у блоці 1 (рисунок 2.7а) формується масив даних, які необхідно передати у вигляді матриці розміром $k \times k$

В блоці 2 за рядками матриці обчислюються перевірочні символи з використанням розроблених модулярних коректуючих кодів. У блоці 3 (див. рисунок 2.7а) обчислюється транспонована матриця – замінюються значення рядків матриці на значення стовпців. Із рядків транспонованої матриці послідовно формуються пакети, які передаються в канал зв'язку в блоці 5 (див. рисунок 2.7а).

Із прийнятих даних у блоках 1 і 2 (рисунок 2.7б) формується матриця даних, з якої у блоці 3 обчислюється транспонована матриця, а в блоці 4 (див. рисунок 2.7б) виявляються та виправляються помилки за рядками транспонованої матриці.

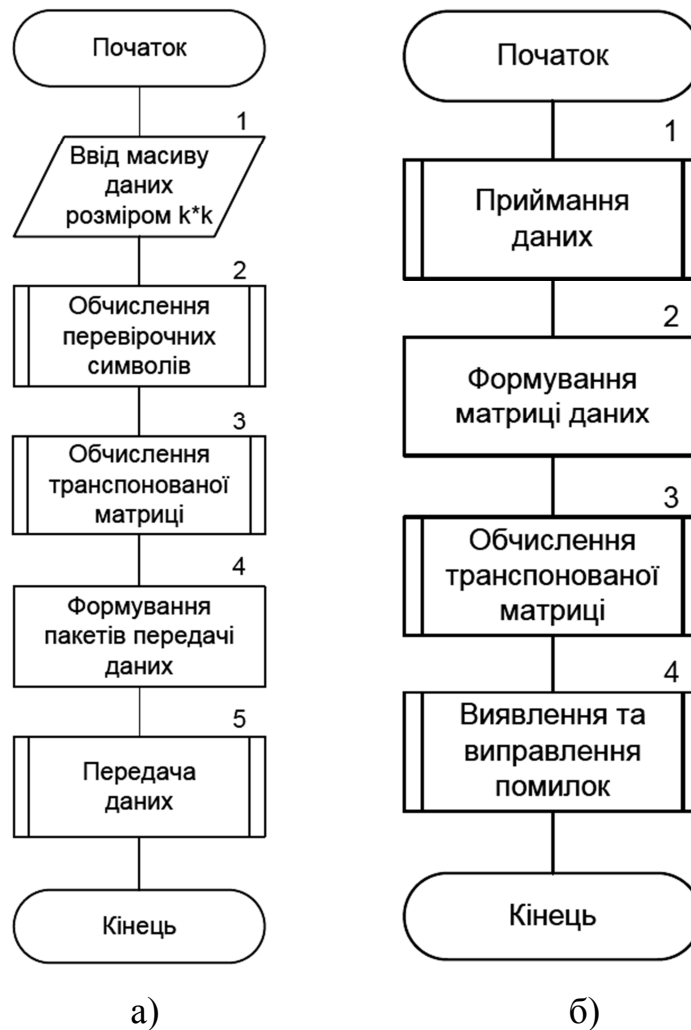


Рисунок 2.7 – Алгоритми передачі та приймання даних на основі декомпозиції:

а) алгоритм передачі даних; б) алгоритм приймання даних

Таким чином, розроблено метод підвищення надійності передачі мультимедійних даних у безпроводних сенсорних мережах, який дає змогу виправляти пакети помилок, використовуючи декомпозиції пакетів і модулярних корегуючих кодів.

2.4 Модель передачі даних на основі модулярних корегуючих кодів

Основою інформаційного обміну між складовими системи є стандарти МЕК 60870-5-1-95 – МЕК 60870-5-4-95. Для реалізації каналного протоколу обміну даними використовується небалансний метод передачі даних і формат

кадру FT1.2. Формат кадру FT1.2 побудований на основі формату кадру FT1.1 (рисунок 2.8), доповнений арифметичною контрольною сумою розрядністю 8 біт. Поле даних кадру класу FT1.2 змінюється від 0... 255 байт, використовує блоковий код із кодовою відстанню $d = 4$, утворений додаванням до восьми інформаційних бітів стартового біту (Start), біту парності (Parity), стоп-біту (Stop). До послідовності блоків додається контрольна сума.

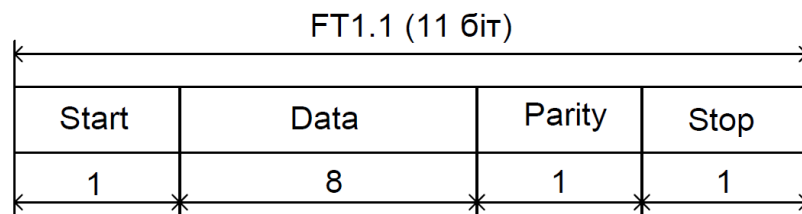


Рисунок 2.8 – Структура кадру класу FT1.1

Приймач здійснює контроль за словом і кадром. За словом контролюють стартовий біт, стоповий біт і біт парності. За кадром – стартові слова на початку і в кінці заголовку кадру; ідентичність двох слів, які характеризують довжину L ; кількість прийнятих слів, що дорівнює $L + 6$; контрольну суму кадру; слово-закінчення. При цьому кадр вважається пошкодженим, якщо хоча б один із контрольованих елементів неправильний. І тільки при позитивних результатах перевірок кадр видається користувачеві.

Показник «достовірність переданих даних» у системах телемеханіки характеризується ймовірністю появи невиявлених помилок за ймовірності спотворення біту і нормується відповідно до даних таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Класи достовірності передачі даних

Клас достовірності даних	Ймовірність появи невиявлених помилок
I1	$\leq 10^{-6}$
I2	$\leq 10^{-10}$
I3	$\leq 10^{-14}$

Частота невиявлених помилок для даних користувача має відповідати класу достовірності даних I2, для команд – класу достовірності даних I3.

Для забезпечення необхідного класу достовірності передачі даних застосовують такі підходи:

- контроль якості сигналу, що передається;
- передача даних із використанням корегуючих кодів;
- ефективні засоби виявлення помилок;
- синхронізація блоків даних;
- повторна передача даних;
- оцінювання стану лінії зв'язку;
- інформаційний зворотний зв'язок.

Для підвищення достовірності передачі даних та забезпечення сумісності з впровадженими на об'єктах використано модулярні корегуючі коди та розроблено модифіковану структуру формату кадру передачі даних (рисунок 2.9). Після кожного блоку даних, який складається з 8-ми інформаційних символів, обчислюються і передаються перевірочні символи CS1 – CS4 (див. рисунок 2.9).

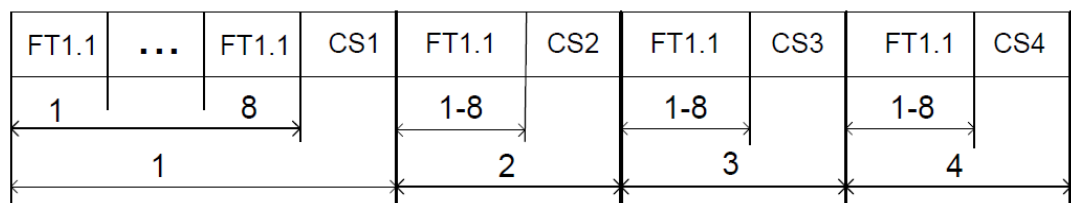


Рисунок 2.9 – Структура пакета передачі даних із використанням модулярних корегуючих кодів

Для передачі перевірочні символи (16 біт) розділяються на дві частини по 8 біт і передаються двома кадрами формату FT1.1 (рисунок 2.10).

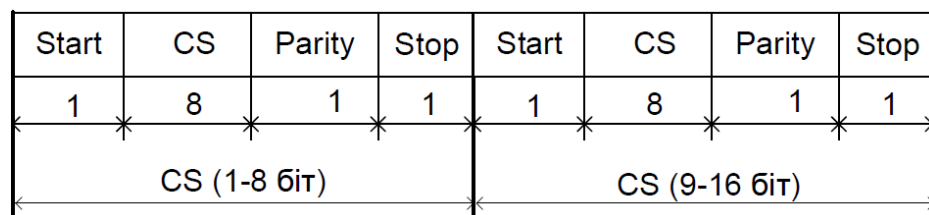


Рисунок 2.10 – Передача перевірочних символів

Для визначення допустимої ймовірності помилок при передачі даних розрахуємо залежність середнього часу між появою невиявлених помилок у повідомленні та ймовірністю появи невиявлених помилок:

$$T = \frac{n}{C \cdot P},$$

де n – довжина повідомлення у бітах;

C – швидкість передачі, біт/с;

P – ймовірність появи невиявлених помилок.

Отже, час між невиявленими помилками при передачі повідомлень зі швидкістю 2400 біт/с становить: 16,95 року при розмірі повідомлень 128 бітів та 270 років при розмірі повідомлень 2048 бітів (рисунок 2.11).

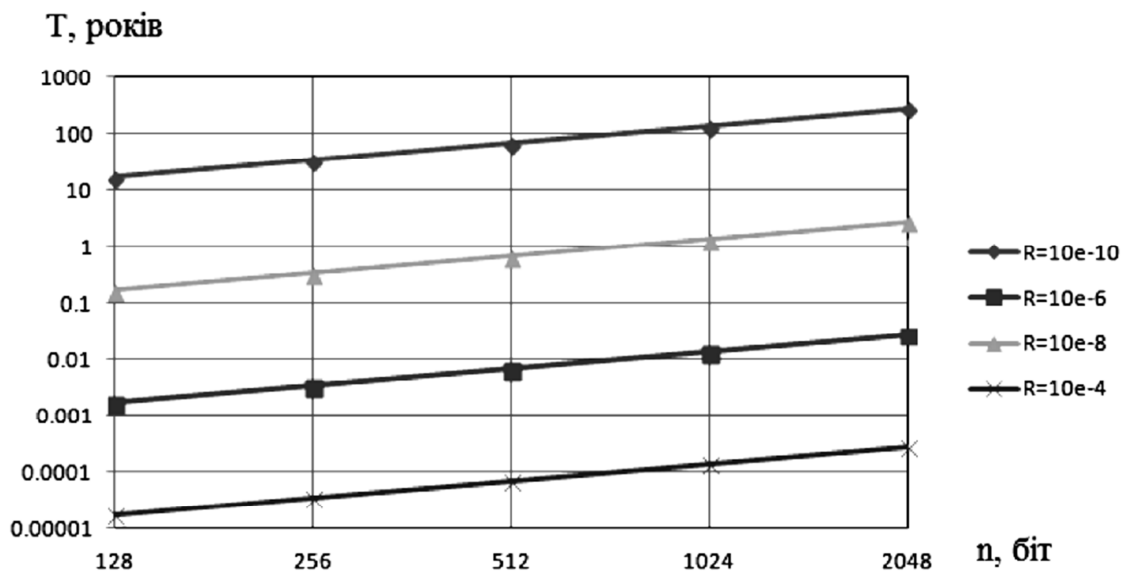


Рисунок 2.11 – Час між появою невиявлених помилок в залежності від обсягу повідомлень при різних значеннях ймовірності появи помилок

Для обґрунтування переваг застосування корегуючих кодів розрахуємо ймовірність появи помилок у повідомленні до і після кодування.

Ймовірність символічних помилок у каналі без кодування визначають за формулою:

$$p_u = Q \cdot \sqrt{2 \cdot E_b / N_0}, \quad (2.7)$$

з кодуванням ця формула набуває такого вигляду:

$$p_c = Q \cdot \sqrt{2 \cdot E_c / N_0}, \quad (2.8)$$

де E_b / N_0 – відношення енергії біта до спектральної густини потужності шуму;

E_c / N_0 – відношення енергії кодованого біта до спектральної густини потужності шуму;

$$Q(x) \text{ – інтеграл помилок Гауса, } Q(x) \approx \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2}\right).$$

Без кодування ймовірність матиме такий вигляд:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_r}{N_0} \cdot \left(\frac{1}{R}\right) = 14,58, \quad (2.9)$$

де $R=2400$ біт/с, $\frac{P_r}{N_0} = 35000$.

Отже,

$$p_u = Q \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}}\right). \quad (2.10)$$

Ймовірність того, що некодований блок повідомлення буде прийнятий з помилкою, визначають за формулою:

$$P_M^u = 1 - (1 - p_u)^k. \quad (2.11)$$

З кодуванням ймовірність набуде такого вигляду.

Швидкість передачі кодованих символів дорівнює:

$$R_c = 2400 \cdot \frac{10}{8} = 3000 \text{ біт/с}$$

і

$$\frac{E_c}{N_0} = \frac{P_r}{N_0} \cdot \left(\frac{1}{R_c} \right). \quad (2.12)$$

Імовірність помилки в символі становить:

$$p_c = Q \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_c}{N_0}} \right). \quad (2.13)$$

Імовірність появи помилки в закодованому символі визначимо через імовірність появи помилки в каналному символі [60]:

$$P_M^c \approx \frac{1}{2^{m-1}} \cdot \sum_{j=t+1}^{2^m-1} j \cdot \binom{2^m-1}{j} \cdot p_c (1-p_c)^{2^m-1-j}, \quad (2.14)$$

де m – розрядність символів;

t – кількість помилок, які можна виправити за кодом.

Отже, вдосконалення структури кадру FT1.2, використовуючи модулярні коректуючі коди, які виправляють помилку в одному символі, дають змогу зменшити ймовірність помилки.

Таким чином, запропоновано метод виявлення та виправлення помилок при виконанні арифметичних операцій (додавання, віднімання, множення) на основі модулярних корегуючих кодів, який дає змогу виявляти помилки в двох десяткових розрядах і виправляти помилки в одному десятковому розряді, використовуючи один контрольний символ. Розроблено структурну схему блоку виявлення помилок при виконанні арифметичних операцій.

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМУ

3.1 Програмно-апаратна реалізація алгоритму передачі даних

Для реалізації алгоритму передачі даних спроектовано середовище, яке складається з датчика, котрий отримуватиме дані для передачі, мікроконтролерної плати Arduino Uno, міні-ПК Raspberry Pi та трансіверів nRF24L01+. Структурна схема середовища зображена на рисунку 3.1.

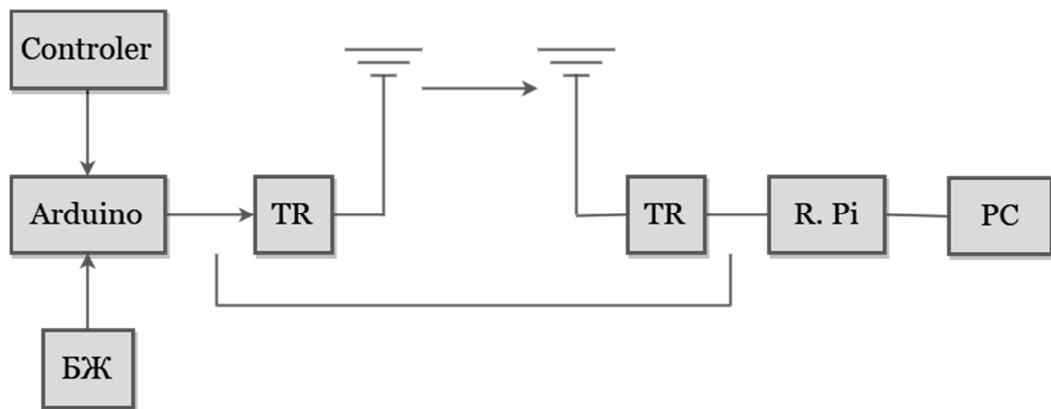


Рисунок 3.1 – Структурна схема середовища передачі даних

Принцип функціонування. Дані з датчика передаються на мікроконтролерну плату, котра під'єднана до блоку живлення. За допомогою трансівера дані передаються бездротовим шляхом до іншого трансівера, який під'єднаний до міні-ПК Raspberry Pi.

Як датчик вибрано DHT11, котрий дає змогу визначати температуру повітря і відносну вологість у будинку чи у будь-якому іншому приміщенні, де температура не нижча від нуля. Дані про температуру і вологість передаються по сигнальному проводу у вигляді цифрового сигналу. Дані про температуру і вологість відправляють по одному сигнальному проводу (S). DHT11 працює з приймаючою стороною, такою як Raspberry Pi, за власним протоколом

Raspberry Pi побудований на чіпі (SoC) Broadcom BCM2835, що вміщає процесор ARM із тактовою частотою 700 МГц, графічний процесор VideoCore IV і 512 чи 256 мегабайтів оперативної пам'яті. Твердий диск відсутній, натомість використовується SD-карта. Така начинка дає змогу виконувати

безліч завдань, наприклад, працювати з текстом, використовувати доступ до мережі Інтернет або грати в комп'ютерні ігри. Вона дає можливість також показувати відео високої роздільної здатності зокрема формату H.264 у роздільній здатності 1080p. Цей міні-ПК може працювати під управлінням операційних систем Debian, Fedora, Gentoo, ОС Raspbian, що засновані на Debian й оптимізовані під Raspberry Pi.

Для передачі даних безпроводним шляхом було обрано радіомодуль nRF24L01+, що працює на частоті 2,4 ГГц. Він дає змогу передавати інформацію в обох напрямках та об'єднувати кілька пристроїв одночасно.

Основні технічні характеристики nRF24L01+:

- робоча частота становить 2,4 ГГц. Можливість вибору одного з 126 каналів (при швидкості 2 Mbps використовуються два канали);
- можливість працювати на одному каналі з 6-ма пристроями;
- швидкість передачі даних – 250 kbps, 1 Mbps, 2 Mbps;
- кілька режимів потужності (впливає на робочу дистанцію);
- дистанція становить до 100 м на відкритому просторі, до 30 м – у приміщенні. На практиці впевнено «пробиває» 2 залізобетонних стіни на швидкості 1 Mbps;
- живлення становить від 1,9 до 3,6 В. Максимальний струм дорівнює 13,5 мА, а 26 мкА – в режимі «standby», мінімальний – 900 нА в режимі «power down»;
- інтерфейс взаємодії з мікроконтролером – SPI;
- входи витримують 5 В, але харчування модуля – не більше 3,6 В;
- максимальна довжина пакета даних – 32 байти;
- вартість модуля – 1 – 2 дол. США.

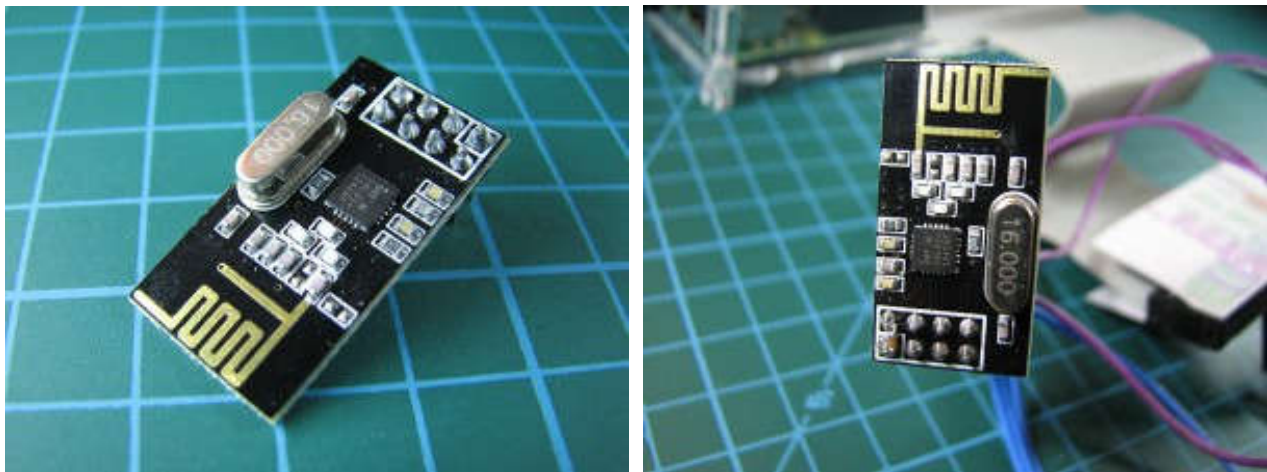


Рисунок 3.2 – Вигляд радіомодуля nRF24L01+

Частота 2,4 ГГц дуже поширена і на ній працює доволі велика кількість приладів, наприклад, Wi-Fi, радіокеровані моделі тощо. Вони у процесі функціонування не заважають один одному. Загалом частота 2,4 ГГц – це умовне позначення. Насправді мається на увазі діапазон частот, близький до 2,4 ГГц. Так, nRF24L01+ працює на частотах 2,400 – 2,4835 ГГц. Частота, на якій працюватиме модуль, визначається номером каналу. Канали мають крок, що дорівнює 1 МГц. Якщо вибирати канал 0, то він матиме частоту 2,400 ГГц, якщо канал 76 – 2,476 ГГц. Отже, потрібно вибирати вільну хвилю (канал), бо в іншому разі зв'язок буде нестабільним або взагалі бути відсутнім.

Можна вибрати одну з трьох швидкостей передачі даних. Чим менша швидкість, тим вища чутливість. Так, при швидкості 250 kbps модулі працюватимуть на більшій дистанції, ніж при вищих швидкостях.

На дальність роботи модулів також впливають налаштування вихідної потужності модуля. Можна вибрати потужність залежно від пріоритетів. Так, якщо важливішим показником є максимальна дальність, то треба вибрати максимальну потужність. Якщо пріоритетом є економність, а дальність становить кілька метрів, варто вибрати меншу потужність сигналу. Цікаве спостереження: в режимі прийому даних (RX) модуль споживає більший струм, ніж у режимі передачі (TX). На рисунку 3.3 зображено функціональну схему модуля.

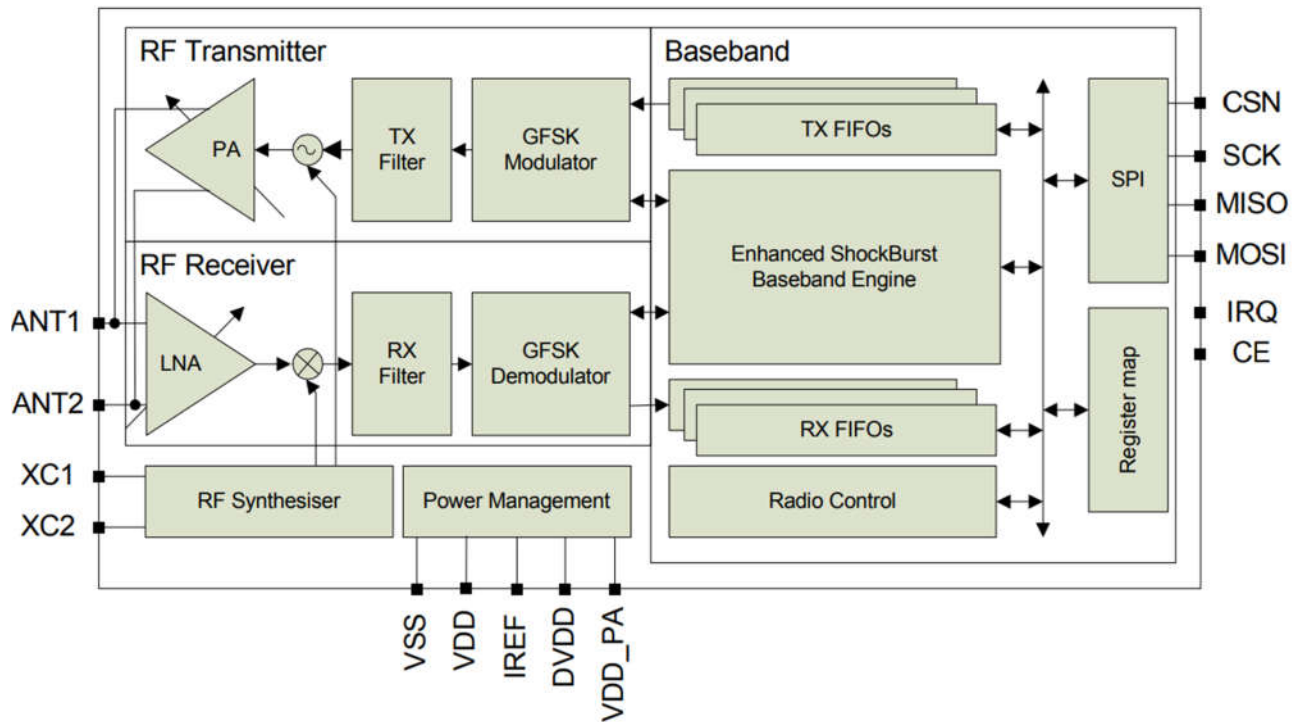


Рисунок 3.3 – Функціональна блок-схема nRF24L01+

Модуль nRF24L01+ в один момент часу може бути в одному з режимів:

- «Power Down» – вимкнений;
- «Standby» – сплячий режим;
- «RX Mode» – режим ресивера (приймача);
- «TX Mode» – режим трансмітера (передавача).

Діаграму переходів із режиму в режим зображено на рисунку 3.4.

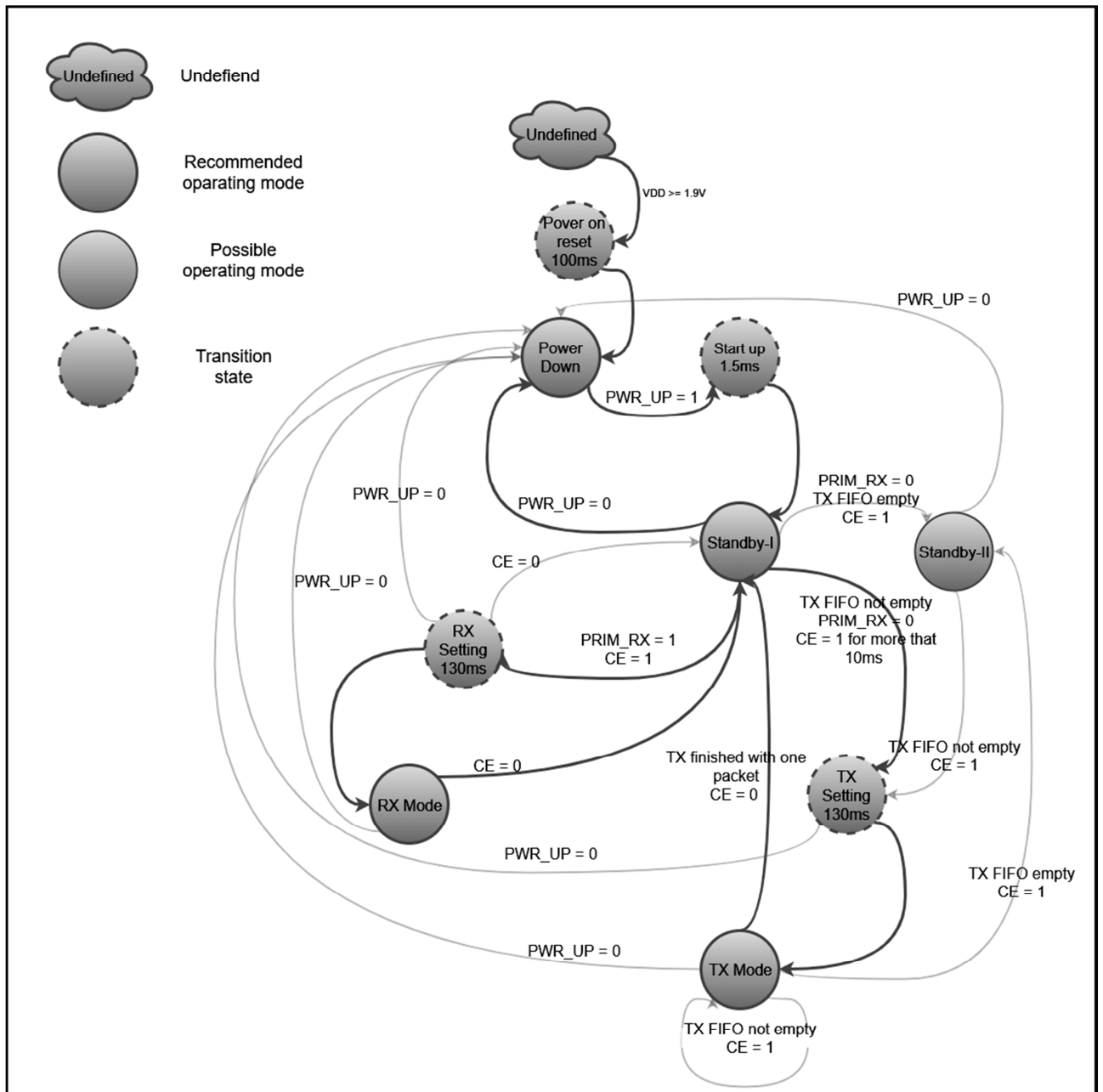


Рисунок 3.4 – Діаграма переходів із режиму в режим

У режимі «Power Down» nRF24L01+ відмикається за мінімального споживання струму. Режим «Power Down» вводиться шляхом установки біта PWR_UP в CONFIG регістра низького рівня.

При установці біта PWR_UP у регістрі CONFIG 1 пристрій переходить у режим очікування. Режим очікування використовується, щоб мінімізувати середнє споживання струму при збереженні короткотривалого часу запуску. В цьому режимі тільки частина кварцового генератора є активною.

Режим «RX» є активним, де радіоприймач nRF24L01+ використовується як приймач. Щоб увійти до цього режиму, nRF24L01+ має мати біт PWR_UP, біт PRIM_RX і високий PIN-код.

Режим «TX» є активним режимом для передачі пакетів. Щоб увійти в цей режим, у nRF24L01+ має бути встановлений біт PWR_UP, низький набір PRIM_RX, завантаження в TX FIFO та високий імпульс на CE для більш ніж 10µs. NRF24L01+ залишається в режимі «TX», поки він не закінчить передачу пакета.

Інформаційний пакет, який передає модуль nRF24L01+, зображений на рисунку 3.5.

Preamble 1 byte	Address 3–5 byte	Packet Control Field 9 bit	Payload 0–32 byte	CRC 1–2 byte
--------------------	---------------------	-------------------------------	----------------------	-----------------

Рисунок 3.5 – Розширений пакет із корисним завантаженням

Преамбула (Preamble) – це послідовність бітів, що використовується для синхронізації демодуляторів приймачів.

Адреса приймача (Address) гарантує, що пакет отримає потрібний приймач. Можна налаштувати довжину адреси 3, 4 або 5 байт. Треба намагатися, щоб адреси були унікальні. Однак іноді адреси можуть бути однакові в кількох nRF24L01+, відповідно до визначених завдань.

Контрольне поле (Packet Control Field) містить: 6 біт, що визначають довжину пакета (мається на увазі довжина пакета корисних даних (від 0 до 32 байт)); 2 біти PID, що використовують для визначення, чи є пакет новим, чи надісланим повторно; 1 біт – прапор NO_ACK (рисунок 3.6).

Payload length – 6 bit	PID – 2 bit	NO_ACK 1 bit
------------------------	-------------	-----------------

Рисунок 3.6 – Область керування пакетами

Корисний «вантаж» (Payload) – це дані, які передає мікроконтролер. Можуть становити від 0 до 32 байт. Довжину Payload можна налаштувати.

CRC – CRC є обов'язковим механізмом виявлення помилок у пакеті. Довжина CRC дорівнює 1 або 2 байти і залежить від загальної довжини пакета.

Для того, щоб переданий пакет був прийнятий як потрібно приймачем, його налаштування мають бути такими самими, як у передавача. Якщо параметри пакета будуть відрізнятися, приймач не зможе ці дані обробити. Коректно також треба вказувати адреси.

Якщо одночасно будуть передавати кілька передавачів або виникнуть інші перешкоди, то відбудеться колізія. Приймач не зможе отримати пакет. Так, nRF24L01+ має налаштування автоматичної повторної відправки пакета (Auto Retransmission (ART)). Ці налаштування вказують, з яким інтервалом і скільки разів слід намагатися відправити пакет.

Як зазначалося, nRF24L01+ може працювати на одному каналі з шістьма nRF24L01+. Для цього модулі мають працювати на одному каналі, але кожен nRF24L01+ має мати унікальну адресу.

Слід звернути увагу, що адреси для Data Pipe 1 – Pipe 5 відрізняються одна від одної лише останнім байтом (рисунок 3.7). На зображеній діаграмі модуль, зазначений як PRX, дає змогу прослухати ефір для вказаних адрес RX_ADDR_P0..RX_ADDR_P5. Кожен з PTX1..PTX6 відправляє пакети на адреси TX_ADDR. Модуль, який працює як PRX, також може відправляти пакети модулів за їхніми адресами.

Якщо налаштування (крім адрес) будуть однаковими, модулі працюватимуть нормально. Основні проблеми виникають у тому разі, коли налаштування передавача і приймача мають відмінності. Проблеми також можуть виникнути, якщо вибрано канал, який зайнятий, і радіоперешкоди заважають радіозв'язку.

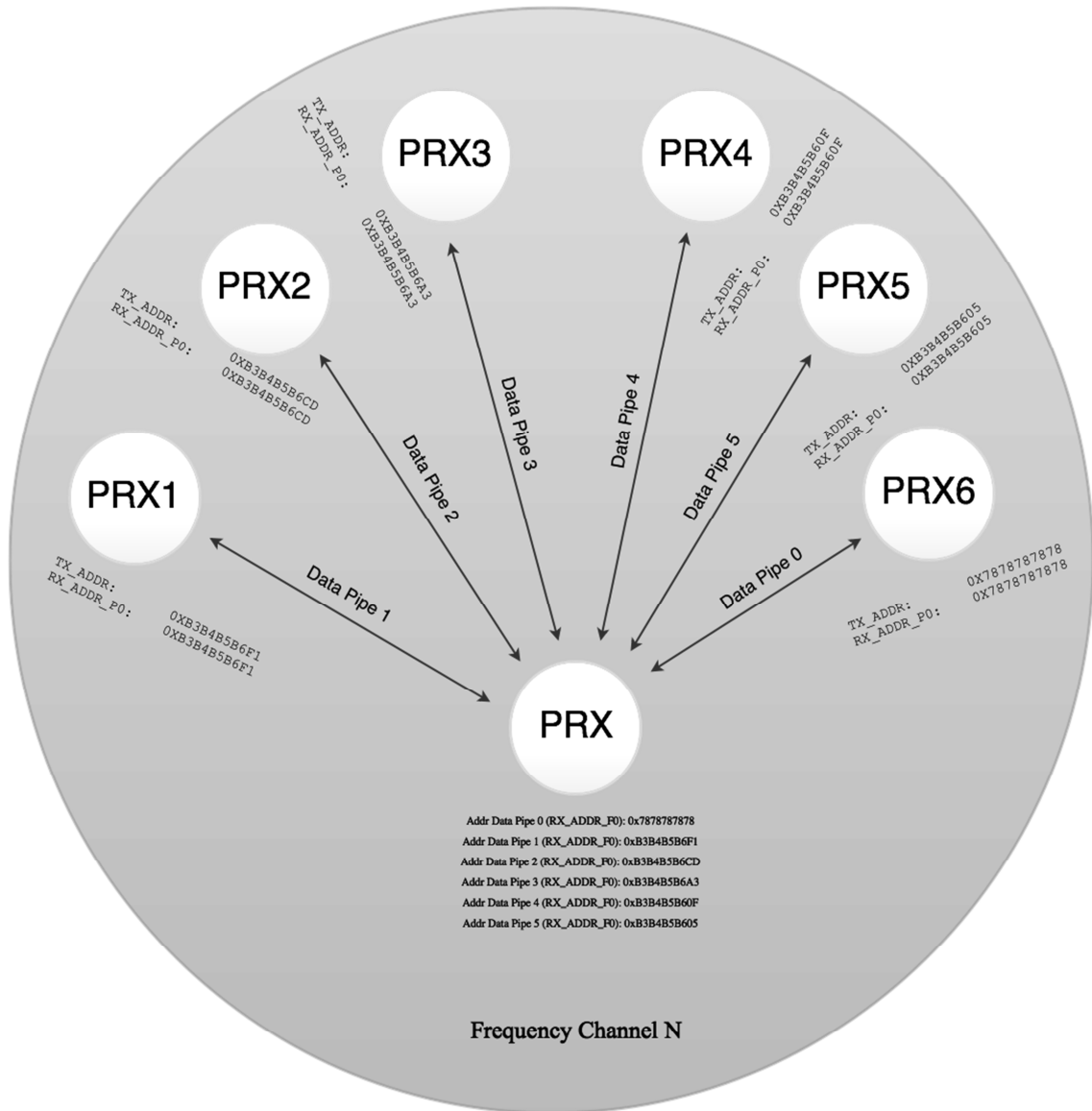


Рисунок 3.7 – Діаграма адрес

Схема підімкнення nRF24L01+ до Raspberry Pi зображена на рисунку 3.8.

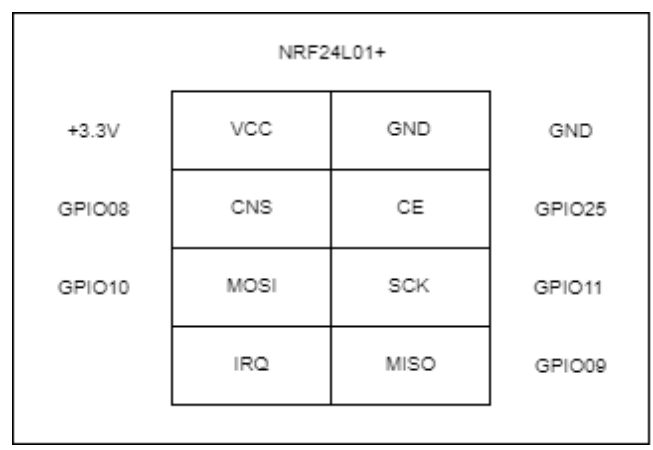


Рисунок 3.8 – Схема підімкнення nRF24L01+ до Raspberry Pi

3.2 Моделювання роботи мережі при використанні схем контролю помилок

Для підвищення надійності передачі даних у БСМ із багатоінтервальною маршрутизацією використовують два підходи до виправлення помилок: 1) контроль помилок у кінцевому вузлі; 2) контроль помилок у проміжних вузлах маршруту.

З метою виявлення ефективних схем застосування розроблених модулярних корегуючих кодів проведено оцінювання затрат енергії при використанні вказаних вище підходів виявлення помилок.

Контроль помилок у кінцевому вузлі – це метод передачі даних, які кодуються у вихідному вузлі з використанням корегуючих кодів і декодуються в кінцевому вузлі (базовій станції). Проміжні вузли тільки ретранслюють пакети даних. Однак за такої організації передачі відбувається накопичення помилок у пакеті, що унеможлиблює декодування даних у кінцевому вузлі та зумовлює необхідність повторної передачі пакетів даних. Такий метод зменшує затрати енергії за відсутності помилок у каналі зв'язку, однак потребує додаткових досліджень затрат енергії при високій імовірності помилок.

Для дослідження коефіцієнта бітових помилок (BER) у БСМ, фізичний рівень якої відповідає стандарту IEEE 802.15.4, розроблена модель каналу передачі даних мережі ZigBee. Модель складається з генератора даних (генератора випадкових чисел), ZigBee-передавача, каналу зв'язку, ZigBee-приймача, блока обчислення помилок та індикатора (рисунок 3.9).

Розрахунок затрат енергії на передачу даних у безпроводних мережах проведено на основі аналітичної моделі.

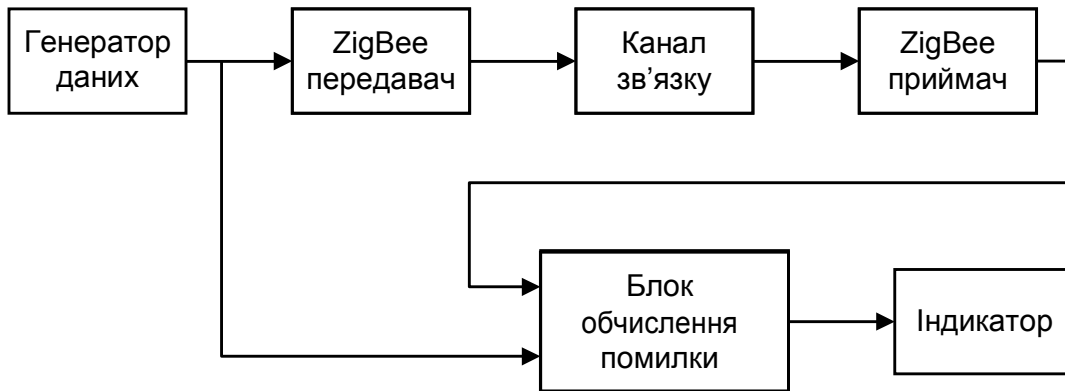


Рисунок 3.9 – Модель каналу передачі даних у мережі ZigBee

Імовірність правильного отримання пакета даних при багатоінтервальній маршрутизації визначається за такою формулою:

$$P = (1 - BER)^H, \quad (3.1)$$

де BER – імовірність помилки в каналі;

H – кількість проміжних вузлів у маршруті.

Відповідно кількість пакетів, отриманих з помилкою, дорівнюватиме:

$$n_{err} = (1 - P) \cdot n_{pac}, \quad (3.2)$$

де n_{pac} – загальна кількість переданих пакетів.

Загальну затрату енергії на передачу n_{pac} пакетів обчислюють таким чином:

$$E_t = \sum_{i=1}^H E_b \cdot (n_{pac} + n_{err}), \quad (3.3)$$

де E_b – затрати енергії для передачі одного біту.

Затрати енергії для передачі одного біту становлять:

$$E_b = \frac{(I_t + I_r) \cdot U \cdot n}{C_b} \quad (3.4)$$

де I_t – струм споживання передавача;
 I_r – струм споживання приймача;
 U – напруга живлення передавача і приймача;
 n – кількість бітів пакеті;
 C_b – швидкість передачі даних у мережі.

Параметри безпроводних модулів та мережі, використані для моделювання затрат енергії на передачу даних, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри безпроводних модулів та мережі

Параметр	I_t , мА	I_r , мА	U , В	N	n_{pac}	C_b , кбіт/с
Значення	15	17	3,0	1016	100	250

Теоретичні значення залежності ймовірності помилки від значення E_b/N_0 для БСМ на основі стандарту IEEE 802.15.4 отримані з використанням Communications System Toolbox системи Matlab і наведені на рисунку 3.10. На основі формули розраховано залежність кількості пакетів, прийнятих із помилками, від відношення E_b/N_0 для кількості проміжних вузлів у маршруті $H = 2, \dots, 10$ (рисунок 3.11).

Як підтверджують дані рисунка 3.11, при $E_b/N_0 < 7$, що відповідає ймовірності помилки $BER \approx 10^{-3}$ (див. рисунок 3.10), різко зростає кількість пакетів, прийнятих з помилкою. На основі цієї формули та даних таблиці 3.1 розраховано затрати енергії на передачу пакета даних залежно від значення E_b/N_0 при різній кількості вузлів у маршруті (див. рисунок 3.11). Згідно з даними рисунка 3.12, затрати енергії на повторну передачу пакетів, отриманих з помилками, здебільшого залежать від кількості проміжних вузлів і зростають на 10 – 40% відповідно до значення E_b/N_0 .

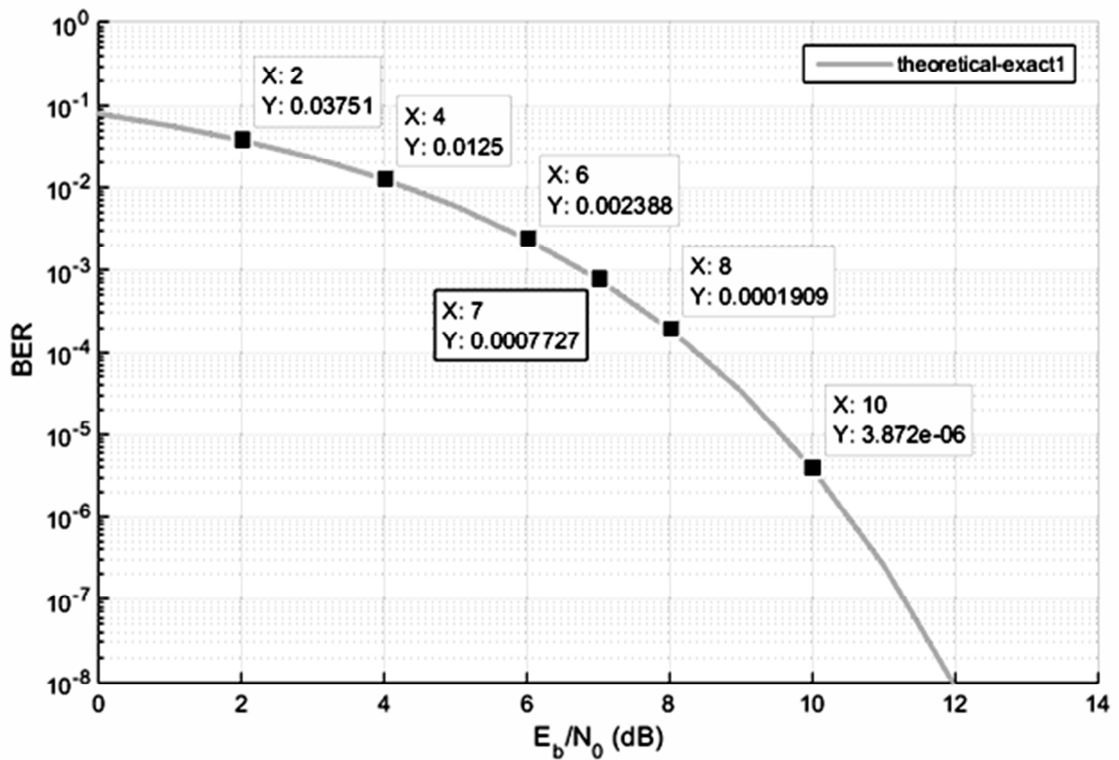


Рисунок 3.10 – Залежність імовірності помилки від значення E_b/N_0 : E_b – енергія біта, N_0 – спектральна густина потужності шуму

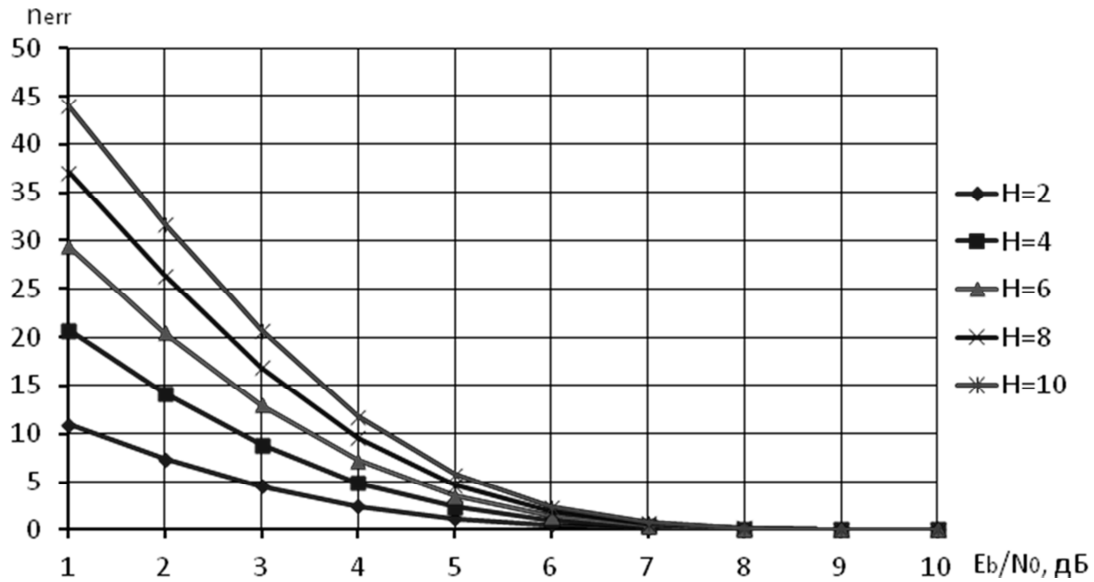


Рисунок 3.11 – Кількість отриманих пакетів даних із помилками залежно від значення E_b/N_0 для маршрутів з різною кількістю вузлів

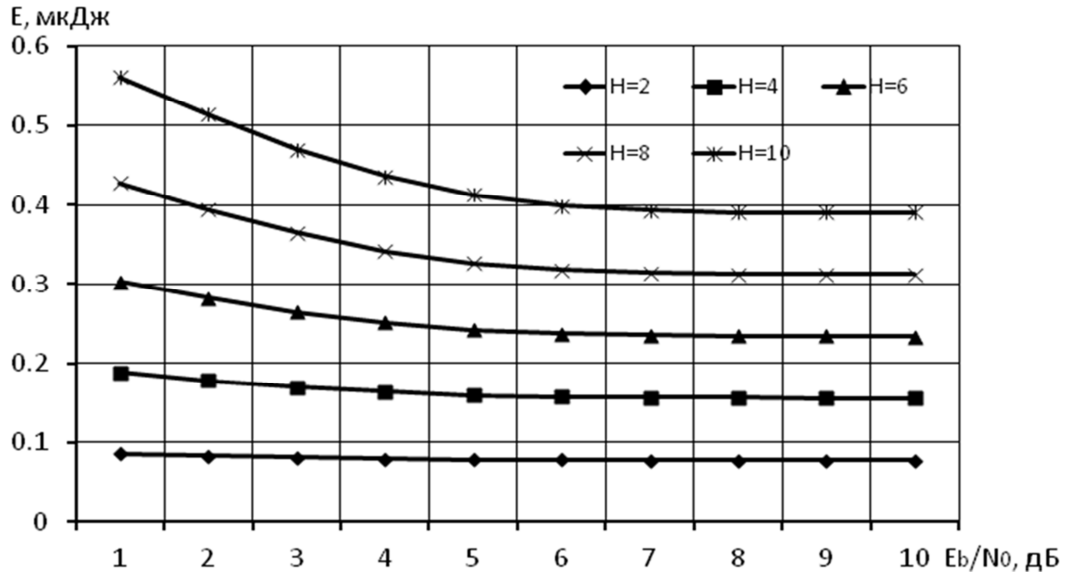


Рисунок 3.12 – Затрати енергії на передачу пакета даних залежно від значення E_b/N_0 при різній кількості вузлів у маршруті

Другий метод контролю помилок передбачає декодування пакетів у всіх проміжних вузлах маршруту.

У цьому разі ймовірність отримання пакета даних з помилкою становить:

$$P_{er} = (1 - BER). \quad (3.5)$$

Відповідно кількість пакетів, отриманих з помилкою, дорівнюватиме:

$$n_{err} = (1 - P_{er}) \cdot n_{pac}. \quad (3.6)$$

Енергія на передачу n_{pac} пакетів даних між двома вузлами мережі обчислюється за формулою:

$$E_{ntn} = n_{pac} \cdot r \cdot (E_b + E_{dec}) + n_{err} \cdot r \cdot (E_b + E_{dec}), \quad (3.7)$$

де r – коефіцієнт, який враховує надлишковість корегуючого коду;

$E_{dec} = 0,3 \cdot E_b$ – затрати енергії на декодування даних.

Загальну енергію на передачу n_{pac} пакетів даних через H проміжних

вузлів у мережі визначають за формулою:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^H E_{ntn}. \quad (3.8)$$

На основі формул побудовано залежності затрат енергії на передачу пакета даних від значення E_b/N_0 та швидкості коду (рисунок 3.13).

Відповідно до даних рисунка 3.13, при значенні $E_b/N_0 < 3$ використання корегуючих кодів з $R = 0,4$ забезпечує менші затрати енергії.

Отже, використання корегуючих кодів з декодуванням у проміжних вузлах має переваги при рівні завад ($BER > 10^{-3}$) і вищому, а метод ретрансляції пакетів має переваги при рівні завад ($BER < 10^{-3}$) та передачі даних, чутливих до затримок.

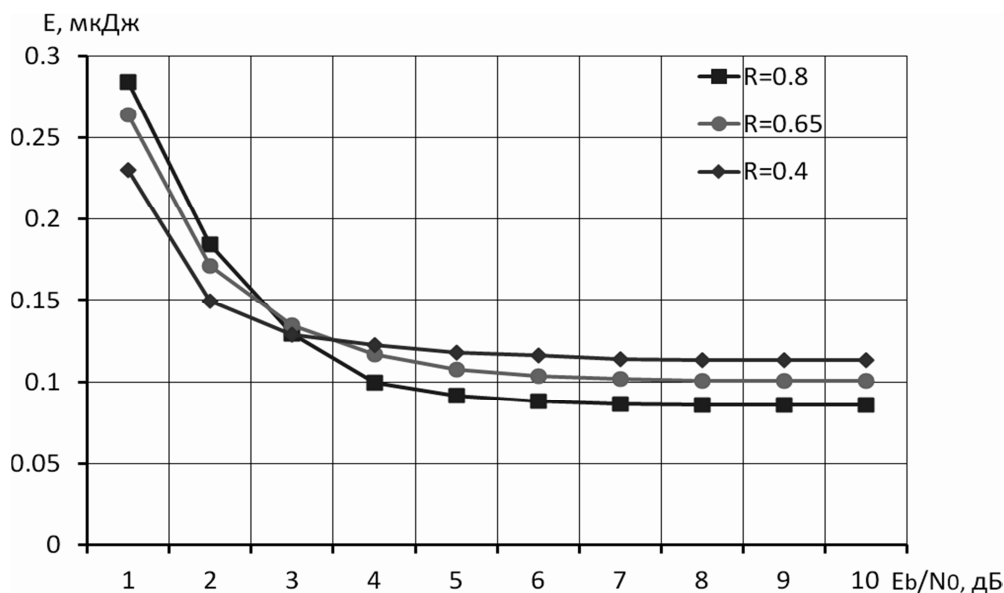


Рисунок 3.13 – Затрати енергії на передачу пакета даних залежно від значення E_b/N_0 для швидкості коду: 0,8; 0,65; 0,4

Отримані результати моделювання враховують тільки теоретичне значення BER. Для визначення реального стану каналу зв'язку необхідно провести експериментальні дослідження з урахуванням роботи інших радіопередавачів у діапазоні частот 2,4 ГГц.

3.3 Експериментальне тестування каналу зв'язку безпроводної сенсорної мережі

Для вибору ефективної схеми контролю помилок у БСМ розроблено методику та програму тестування, яка визначає кількість втрачених пакетів Packet Error Rate (PER) у мережі ZegBee.

Суть тестування полягає в тому, що пакети надсилаються від одного ZegBee-пристрою до іншого. При цьому кількість втрачених пакетів підраховується і відображається на індикаторі або зберігається у файлі при з'єднанні з ноутбуком (рисунок 3.14).

Значення PER визначається як кількість пакетів N_{error} , прийнятих із помилкою, до загальної кількості прийнятих пакетів N_0 :

$$PER = \frac{N_{error}}{N_0} \cdot 100\%. \quad (3.9)$$

Пакет вважається прийнятим з помилкою, якщо хоча б один біт є спотвореним.

Програма підтримує два режими роботи: без відправки пакета підтвердження (рисунок 3.14) і з відправкою пакета підтвердження (рисунок 3.15).

Експерименти проводились на відлагоджувальному комплекті фірми «Jennic» JN5148-EK010 з використанням безпроводних мікроконтролерів JN5148 001-M00 з вбудованою керамічною антеною, JN5148-001-M03 з роз'єднанням для підімкнення антени і JN5148-001-M04 з антенним роз'єднанням та підсилювачем потужності для збільшення дальності передачі.

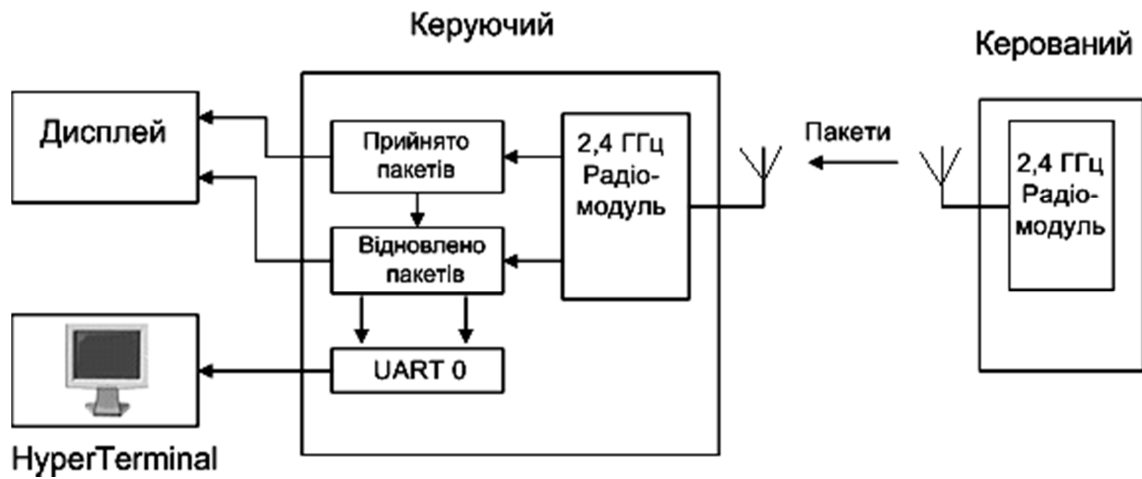


Рисунок 3.14 – Схема тестування каналу зв'язку БСМ без відправки пакета підтвердження

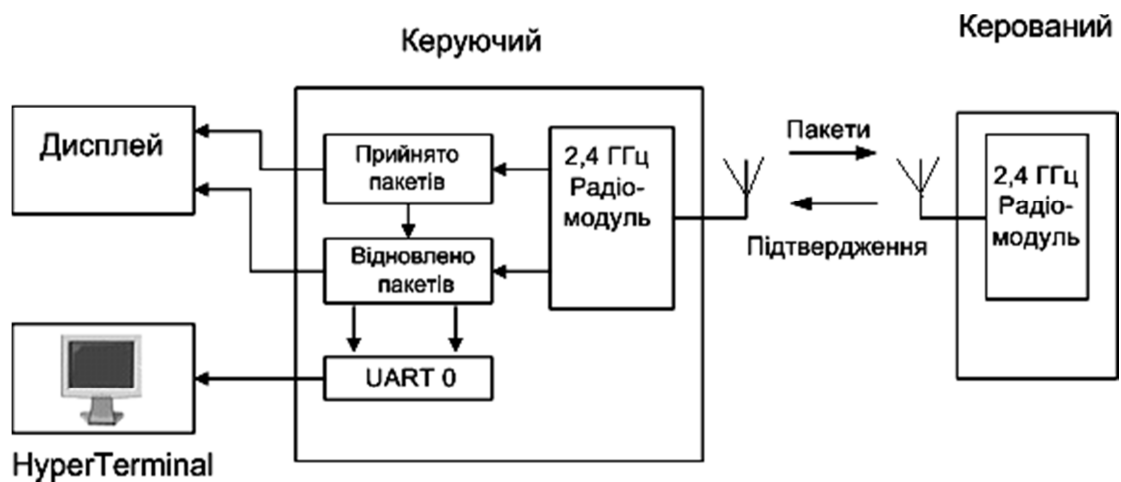


Рисунок 3.15 – Схема тестування каналу зв'язку БСМ з відправкою пакета підтвердження

За допомогою кнопок «SW1» – «SW4» на платі «Master» та відповідного пункту меню програма дає змогу вибрати налаштування.

1. Меню «Channel». Вибір каналу зв'язку. Номер каналу на обох платах можна збільшити шляхом натискання кнопки «SW1» на платі «Master». Якщо номер каналу приймає значення 25, то наступне натискання кнопки переводить його до каналу з номером 11.

2. Рівень потужності. Використовуються чотири допустимі значення рівня потужності для модулів JN5148 – 0, 8, 16 і 24, які відповідають PAP = 0, 1, 2 і 3 (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Рівень потужності модулів

Рівень потужності	0	8	16	24
Стандартний модуль	-32 дБм	-21 дБм	-9,5 дБм	2 дБм
Модуль високої потужності	-13 дБм	-1 дБм	9 дБм	16 дБм

3. Меню «Retries» використовується для встановлення кількості спроб повторної передачі пакета. Кожне натискання кнопки «SW3» збільшує значення кількості спроб на одиницю (максимум 7, наступне натискання приведе до повернення в нуль).

4. Меню «Mode» встановлює режим роботи без передачі пакета підтвердження або з передачею пакета підтвердження.

5. Для відображення потужності сигналу на платі «Майстер» використовуються чотири світлодіоди – D1, D2, D3 і D4:

- 4 світлодіоди світяться – потужність прийнятого сигналу більш як 60 дБ вище від рівня чутливості приймача;

- 3 світлодіоди світяться – потужність прийнятого сигналу більш як 40 дБ вище від рівня чутливості приймача;

- 2 світлодіоди світяться – потужність прийнятого сигналу більш як 20 дБ вище від рівня чутливості приймача;

- 1 світлодіод світиться – потужність прийнятого сигналу менш як 20 дБ вище від рівня чутливості приймача;

- 0 світлодіодів світиться – сигнал відсутній.

Значення потужності сигналу відображається на індикаторі у вигляді графіка (рисунок 3.16) LQI (Link Quality Indication Quality) та виводиться в послідовний порт як цифрове значення.

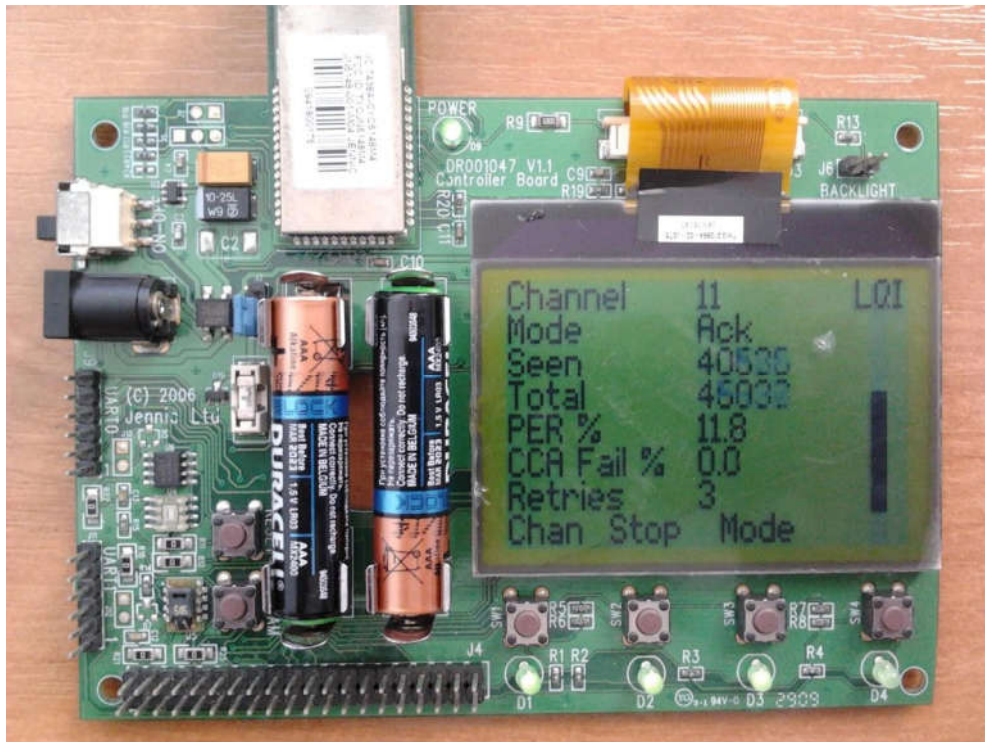


Рисунок 3.16 – Модуль тестування з цифровим індикатором

Для відображення результатів на ПК використовується NupurTerminal з налаштуваннями: 38400 біт/с, 8 біт, без контролю парності, 1 стоп-біт, без управління потоком.

На дисплеї відображається поточний канал (Channel – 11), кількість успішно прийнятих пакетів (Seen), загальна кількість відправлених кадрів (Total) і відсоток пакетів, отриманих з помилкою PER (де 0% означає, що всі пакети прийняті правильно, і 100% – всі пакети прийняті з помилкою). CCA fail визначає відсоток пакетів, які не вдалося передати, оскільки канал зашумлений роботою інших пристроїв (Wi-Fi, Bluetooth).

Проведене дослідження впливу роботи Wi-Fi мережі на кількість пакетів, прийнятих з помилкою в мережі ZegBee (рисунок 3.17), дало змогу визначити, що кількість пакетів, прийнятих з помилкою, становить від 3,4 – 10,6% для різних частотних каналів. Найбільший відсоток пакетів (10,6; 9,0), прийнятих з помилкою, виявлено на 22 і 23 каналах, що відповідає каналу 10 мережі Wi-Fi (рисунок 3.18).

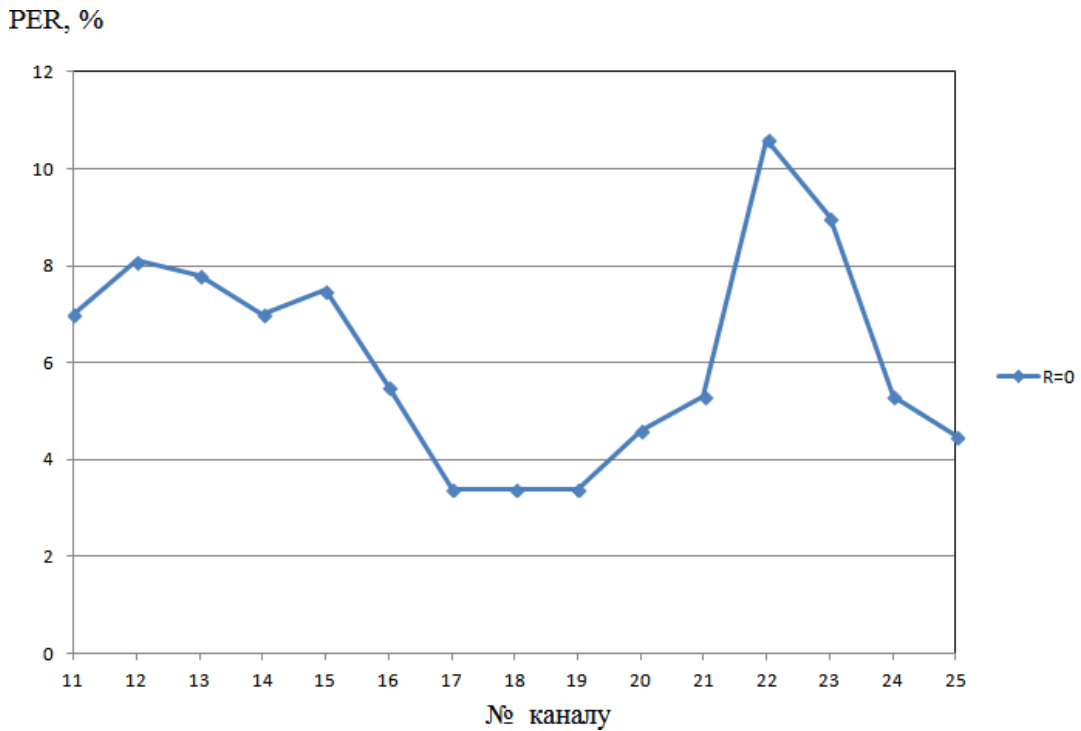


Рисунок 3.17 – Кількість прийнятих із помилкою пакетів на різних частотних каналах

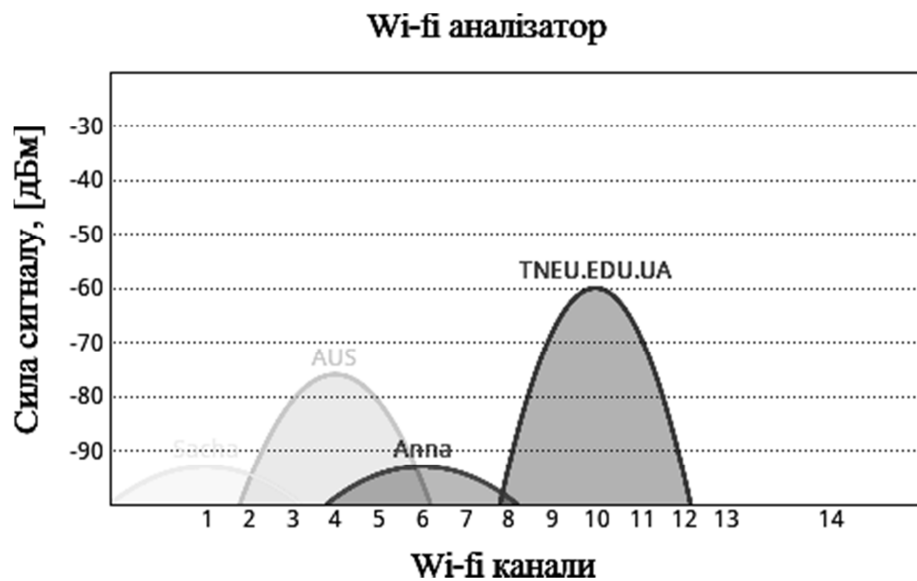


Рисунок 3.18 – Потужність сигналу Wi-Fi мережі на території проведення експерименту

Використання повторних запитів на передачу пакетів, отриманих з помилкою, дає змогу зменшити відсоток прийнятих із помилкою пакетів у середньому в 20 разів при $R=3$ (три повторних запити) і в 2,5 разу порівняно з попереднім значенням при $R=7$ (рисунок 3.19). Результати тестування каналу

зв'язку БСМ підтвердили, що при виборі корегуючих кодів і схем контролю помилок необхідно враховувати вплив обладнання, яке працює в діапазоні частот 2,4 ГГц (Wi-Fi , Bluetooth та ін.).

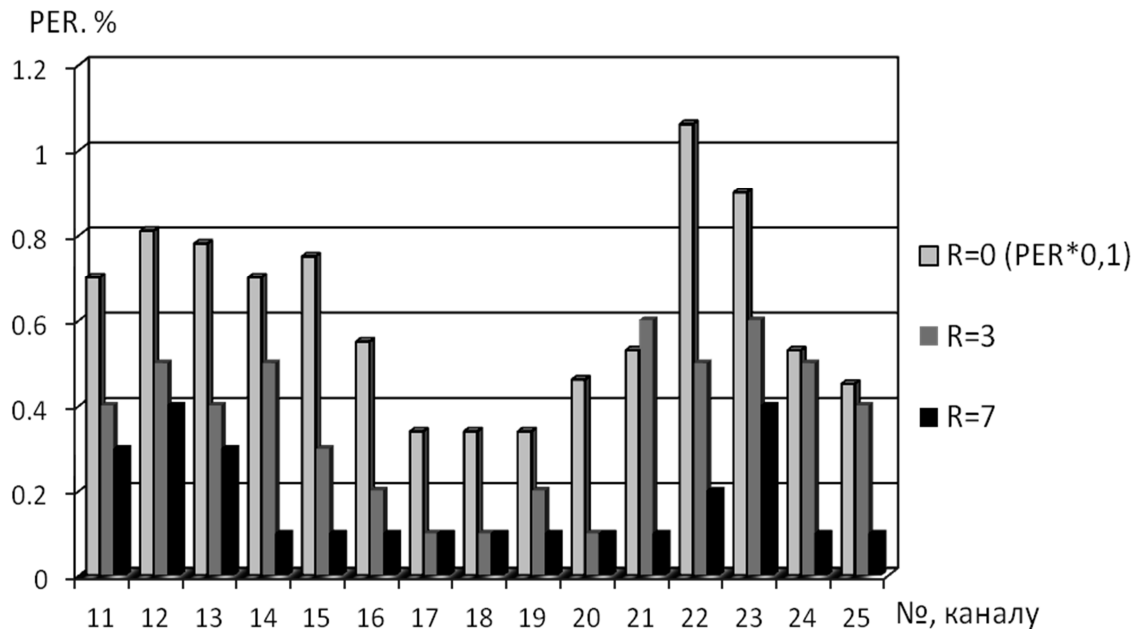


Рисунок 3.19 – Кількість пакетів, прийнятих з помилкою, при використанні різної кількості повторних запитів (для R=0 наведені значення взято з коефіцієнтом 0,1)

Отримані експериментальні результати тестування каналу зв'язку БСМ дають змогу вибрати необхідні параметри розроблених модулярних корегуючих кодів залежно від стану каналу передачі.

Описану вище методику тестування доцільно використовувати для оцінювання надійності передачі даних у БСМ, які працюють у різних умовах і середовищах передачі даних (високий рівень електромагнітних завад) на етапі розробки та вводу в експлуатацію БСМ.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему– підвищення ефективності функціонування безпроводних сенсорних мереж шляхом 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 основі отриманих результатів сформульовано вимоги до функцій і характеристик безпроводних вузлів та мереж. Визначено переваги й існуючі обмеження, які стримують широке використання БСМ. Розроблено класифікацію БСМ. Вказано перспективи використання і виявлено наявні проблеми при створенні безпроводних сенсорних мереж.

2. Запропоновано метод мережного кодування даних на основі системи залишкових класів, який дає змогу підвищити загальну пропускну здатність мережі за поділу повідомлення на частини та передачі їх різними маршрутами. Розроблено протокол передачі даних на основі мережного кодування даних, який забезпечує підвищення пропускну здатності мережі.

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

4. Досліджено модулярні корегуючі 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.

5. Розроблено метод підвищення надійності передачі даних у безпроводних сенсорних мережах на основі модулярних корегуючих кодів і декомпозиції даних, який забезпечує виправлення пакетів помилок довжиною k

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

6. Розроблено методику тестування каналу зв'язку безпроводної сенсорної мережі, яка дає змогу вибирати необхідну схему контролю помилок і параметри корегуючого коду залежно від стану каналу передачі даних. Визначено рівень завад, при якому доцільно з позиції затрат енергії використовувати корегуючі коди.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ватолин Д. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М. : Диалог-Мифи, 2002. – 384.
2. Вулис А. Основные положения базовых стандартов ГОСТ Р МЭК на устройства и системы телемеханики. Ч. 1 / А. Вулис, В. Сумительнов // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 76 – 84.
3. Гераїмчук М. Д. Основи побудови перспективних безпроводових сенсорних мереж : моногр. / М. Д. Гераїмчук, О. В. Івахів, М. І. Паламар, Б. М. Шевчук. – К. : ЕКМО, 2010. – 124 с.
4. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
5. Додонов А. Г. Живучесть информационных систем / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ. – К. : Наук. думка, 2011. – 256 с.
6. Дрозд А. В. Оценка контролепригодности цифровых компонентов встроенных систем критического применения / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антощук, М. А. Дрозд, Ю. Ю Сулима // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – №6. – С. 184 – 190.
7. ДСТУ ІЕС 60870-5-101:2014. Пристрої та системи телемеханіки. Частина 5-101. Протоколи передавання // Держспоживстандарт України. – К., 2015.
8. ДСТУ ІЕС 60870-5-104: 2014. Пристрої та системи телемеханіки. Частина 5-104. Протоколи передавання. Доступ до мережі згідно з ІЕС 60870-5-101 із використанням стандартних профілів передавання даних // Держспоживстандарт України.– К., 2015.
9. ДСТУ ISO 9000:2007 (ISO 9000:2005, IDT). Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів // Держспоживстандарт України. – К., 2008. – 35 с.

10. Дубчак Л. О. Методичні вказівки щодо проходження переддипломної практики студентами ОКР «магістр» / Л. О. Дубчак, І. Р. Паздрій, Г. М. Мельник. – Тернопіль, 2016. – 16 с.
11. Дунець Р. Б. Дослідження часткової реконфігурації ПЛІС / Р. Б. Дунець, Д. Я. Тиранський // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – №6(40). – С. 240 – 244.
12. Дунець Р. Б. Проблеми побудови частково реконфігурованих систем на ПЛІС / Р. Б. Дунець, Д. Я. Тиранський // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – №7(48). – С. 200 – 204.
13. Жуков И. А. Способы повышения надежности и безопасности сбора информации в системах управления реального времени / И. А. Жуков, В. И. Дрововозов // Проблемы інформатизації та управління. – 2008. – №1(23). – С. 262– 276.
14. Зубинский А. Распыленная разумность / А. Зубинский // Компьютерное обозрение. – 2003. – № 8. – С. 58 – 61.
15. Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А. Г. Зюко. – М. : Радио и связь, 1985. – 272 с.
16. Казимир В. В. Проектування комп'ютерних систем на основі мікросхем програмованої логіки : моногр. / В. В. Казимир, С. А. Іванець, Ю. О. Зубань, В. В. Литвинов. – Суми : Сумський держ. ун-т, 2013. – 313 с.
17. Миано Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии : уч. пособ. / Дж. Миано. – М. : Триумф, 2003. – 336 с.