

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-15>

УДК 004.43

Лавданський Артем Олександрович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-1596-4123>

Фауре Еміль Віталійович, д.т.н., професор

<https://orcid.org/0000-0002-2046-481X>

Скуцький Артем Борисович, PhD

<https://orcid.org/0000-0002-8632-1176>

Ступка Богдан Анатолійович, PhD

<https://orcid.org/0000-0002-3185-8427>

Харін Олександр Олександрович, PhD

<https://orcid.org/0000-0003-1791-6755>

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

МАКЕТНИЙ ЗРАЗОК СИСТЕМИ ЗАВАДОСТІЙКОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ З НЕРОЗДІЛЬНИМ ФАКТОРІАЛЬНИМ КОДУВАННЯМ ДАНИХ

Лавданський А. О., Фауре Е. В., Скуцький А. Б., Ступка Б. А., Харін О. О. Макетний зразок системи завадостійкого інформаційного обміну з нероздільним факторіальним кодуванням даних. У роботі розглянуто побудову макетного зразка системи завадостійкого інформаційного обміну для недорогих бездротових пристроїв, що працюють в насичених завадами ISM-діапазонах. На основі раніше розробленої моделі системи завадостійкого інформаційного обміну двійковим симетричним каналом реалізовано апаратно-програмну систему на базі FSK/GFSK-модему SX1278 та мікроконтролера сімейства STM32. Детально описано структуру кадру, принципи формування службових полів і корисних даних, алгоритми кадрової синхронізації й декодування, що використовують спеціальний блок синхрослів і мажоритарну обробку бітів, а також особливості їх програмної реалізації в умовах обмежених ресурсів пам'яті та обчислювальної потужності. Наведено результати експериментальної оцінки роботи прототипу за наявності інтенсивних широкосмугових завад, які моделюють типові сценарії спільного використання спектра з іншими системами радіозв'язку, побутовими та промисловими пристроями. Показано, що запропонована система забезпечує коректне відновлення повідомлення, помірний час обробки кадру та зниження вимог до повторних передавань. Отримані результати можуть бути використані під час проектування вузлів промислового Інтернету речей, систем дистанційного моніторингу, збору показників лічильників і телеметричних комплексів у зашумленому радіосередовищі, віддаленому керуванні безпілотними об'єктами. Експериментальні дані узгоджуються з результатами попереднього імітаційного моделювання та підтверджують доцільність застосування системи завадостійкого інформаційного обміну для побудови енергоефективних, масштабованих і надійних систем обміну, у тому числі для трьохетапного криптографічного протоколу. Отримана платформа може слугувати основою для подальшої оптимізації параметрів перетворення інформації в бездротових мережах.

Ключові слова: модем; система завадостійкого інформаційного обміну; ISM-діапазон; макетний зразок; кадрова синхронізація.

Lavdanskyy A., Faure E., Skutskyy A., Stupka B., Kharin O. A Mock-Up of a Noise-Resilient Communication System with Non-Separable Data Factorial Coding. The paper considers the construction of a mock-up of a noise-resilient information exchange system for inexpensive wireless devices operating in interference-saturated ISM bands. Based on the previously developed model of a noise-resilient information exchange system using a binary symmetric channel, a hardware-software system based on the SX1278 FSK/GFSK modem and the STM32 microcontroller family is implemented. The frame structure, the principles of forming service fields and useful data, frame synchronization and decoding algorithms that use a special sync block and majority processing by bit positions, as well as the features of their software implementation in conditions of limited memory resources and computing power are described in detail. The results of experimental evaluation of the prototype operation in the presence of intensive broadband interference, which simulate typical scenarios of spectrum sharing with other radio communication systems, household and industrial devices, are presented. It is shown that the proposed system provides correct message recovery, moderate frame processing time and reduced requirements for retransmissions. The results obtained can be used when designing industrial Internet of Things nodes, remote monitoring systems, meter reading collection and telemetry complexes in a noisy radio environment, and remote control of unmanned objects. The experimental data are in good agreement with the results of previous simulation modeling and confirm the feasibility of using a noise-tolerant information exchange system to build energy-efficient, scalable and reliable communication systems including three-pass cryptographic protocol. The resulting platform can serve as the basis for further optimization of data transformation in wireless networks.

Keywords: modem; noise-resilient information exchange system; ISM band; mock-up; frame synchronization.

Постановка проблеми. Сучасні системи бездротового обміну даними будуються на основі великої кількості взаємно несумісних протоколів і технологій (LoRaWAN, Sigfox, ZigBee, BLE, FSK/GFSK-рішення тощо), які використовують спільний радіочастотний ресурс без централізованого планування доступу. Це призводить до високої щільності вузлів, накладання різних схем множинного доступу та, як наслідок, до істотного зростання ймовірності колізій і завад.

Експериментальні дослідження та огляди для таких мереж [1–4] демонструють, що в типовому міському середовищі значна частка часу канал зайнятий сторонніми передавачами, а перехресні завади між різними системами суттєво обмежують якість сервісів, які працюють у цих діапазонах.

Роботи, присвячені LPWAN- і WSN-мережам, зокрема [5; 6], показують, що зовнішні радіозавади є одним із ключових чинників деградації якості радіоканалу: вони спричиняють руйнування преамбули та заголовка кадру, збільшення ймовірності помилки та непередбачувані затримки на рівні MAC. У підсумку навіть відносно короткочасні та вузькосмугові перешкоди можуть повністю зірвати прийом кадру за формально високого відношення сигнал/шум у відсутності завад.

Водночас, більшість поширених протоколів для недорогих пристроїв орієнтовані на прості схеми модуляції (2-FSK / GFSK) та порівняно прості коди виправлення помилок, які забезпечують прийнятну якість лише за помірного рівня завад [7; 8]. У разі інтенсивних імпульсних та широкосмугових перешкод стандартні формати кадру з фіксованою преамбулою і простими механізмами синхронізації не дозволяють гарантувати задану ефективну ймовірність помилки на виході декодера: кадр найчастіше втрачається повністю вже на етапі втрати синхронізації, навіть якщо значна частина корисних бітів формально могла б бути відновлена.

У [9] показано, що використання нероздільного факторіального коду та спеціальних алгоритмів кадрової синхронізації дає змогу істотно підвищити завадостійкість передавання в двійковому симетричному каналі. Однак, залишається невирішеним завдання практичної реалізації такої системи на реальній апаратній базі, із урахуванням її режимів роботи, обмежень протоколу та вимог до часу обробки кадру. Тому актуальною є розробка та експериментальна перевірка макетних зразків системи завадостійкого інформаційного обміну, у яких програмно реалізовано алгоритми факторіального кодування, кадрової синхронізації та декодування, а також оцінку їх роботи в умовах завад.

Аналіз існуючих моделей та підходів. У праці [10] авторами запропоновано трьохетапний криптографічний протокол на основі перестановок, який забезпечує надійний обмін за низького співвідношення сигнал/шум у каналі зв'язку. У дослідженні обґрунтовано процедуру на основі мажоритарної та кореляційної обробки фрагментів, отриманих з каналу зв'язку для синхронізації кадрів (перестановок) в умовах сильного шуму.

У дослідженні [9] побудовано та детально проаналізовано імітаційну модель підсистеми синхронізації в системі завадостійкого інформаційного обміну, в якій здійснюють передавання перестановок нероздільного факторіального коду двійковим симетричним каналом із великою ймовірністю бітової помилки (у роботі досліджено ймовірність 0,4). Передбачається, що канал протягом усього часу роботи стаціонарний, а приймач не має апріорної інформації про момент початку передавання, тобто до старту сеансу він спостерігає лише шум, статистично еквівалентний послідовності незалежних бітів з ймовірністю нуля та одиниці, що прямує до 0,5. У таких умовах ключовим завданням є забезпечення кадрової синхронізації та коректного визначення меж між блоком синхронізації та блоком даних за збереження прийнятної ймовірності помилки і прийнятного часу обробки.

Структура переданих даних базується на використанні спеціально сконструйованої синхролітери у вигляді перестановки довжини M , елементи якої кодуються рівномірним двійковим кодом. Синхролітера обирається так, щоб мінімальна відстань Хеммінга між нею та будь-яким її циклічним зсувом була максимально можливою, що забезпечує стійкість до похибок під час її виявлення на приймальному боці. Блок синхронізації формується як послідовність з копій цієї синхролітери, а блок даних – як послідовність слів, кожне з яких являє собою перестановку з набору циклічних зсувів вихідної синхролітери. Таким чином, структура кадру будується на єдиному базовому елементі – перестановці π та її циклічних зсувах, що дозволяє використовувати одну й ту саму структурну надлишковість одночасно як для синхронізації, так і для надійного передавання даних.

Особливу увагу в [9] приділено алгоритму кадрової синхронізації. Підсистема синхронізації працює з ковзним вікном. Для кожного положення вікна здійснюється формування уточненої послідовності бітів з урахуванням попередньої обробки, після чого ця послідовність порівнюється з усіма циклічними зсувами синхролітери π . Якщо результат порівняння задовольняє заданому критерію подібності, фіксується спрацювання детектора синхронізації; послідовні спрацювання формують так звану серію синхронізацій. Уведений механізм аналізу довжини серії синхронізацій

полягає у тому, що рішення про досягнення кадрової синхронізації приймається лише у випадку, коли довжина серії перевищує заздалегідь визначений пороговий рівень. Це дозволяє якісно відокремити випадкові хибні збіги, спричинені шумом, від істинних фрагментів блоку синхронізації.

Після фіксації факту досягнення порогової довжини серії виконується фазова компенсація – вирівнювання позиції ковзного вікна таким чином, щоб його межа збігалася з межею синхролітери. На основі ідентифікованого циклічного зсуву визначається кількість бітів, які необхідно додатково прийняти для точного вирівнювання фази. Далі фрагмент, що відповідає блоку даних, піддається послівному аналізу: кожна літера слова ототожнюється з певним циклічним зсувом синхролітери, і на цій основі формується послідовність індексів зсувів. Отримана послідовність перевіряється на перестановку (усі індекси мають бути різними) та на виконання додаткових структурних умов (зокрема, фіксація певного базового зсуву як першого елемента перестановки). Лише за виконання цих умов слово вважається успішно декодованим, а відповідний кадр – прийнятим коректно.

Отримані числові результати показали, що за наявності механізму аналізу серій синхронізації система забезпечує прийом усіх кадрів у широкому діапазоні значень імовірності бітової помилки p . Авторами досліджено випадок $p = 0,4$. За цих умов максимальна похибка визначення межі між блоками синхронізації та даних не перевищувала довжини одного слова блоку даних, тобто відповідала фазовому зсуву на одне слово, який у більшості випадків може бути компенсований додатковими алгоритмічними засобами. У окремих випробуваннях фіксувалася і нульова похибка межі, що свідчить про потенційну можливість повністю точного вирівнювання кадру навіть у сильно зашумленому каналі. Водночас, показано, що ігнорування інформації про довжину серії, тобто використання детектора синхронізації без порогового аналізу серій, призводить до різкого погіршення характеристик: зростає частка неприйнятих кадрів і збільшується максимальна похибка визначення межі до величини, що дорівнює двом словам блоку даних.

На основі аналізу похибок межі оцінено ефективну ймовірність бітової помилки в блоці даних з урахуванням того, що в буфер приймача можуть потрапляти біти, які фактично належать блоку синхронізації. Показано, що за похибки на одне слово ефективна ймовірність помилки лише незначно перевищує номінальне значення p , а у випадку збільшення похибки до двох слів зростання цієї ймовірності стає помітнішим. Таким чином, механізм аналізу серій синхронізацій, навіть за ціною дещо більшого середнього часу обробки кадру, забезпечує кращий рівень надійності приймання.

Загалом, проведене у [9] дослідження дало формалізований опис імітаційної моделі системи завадостійкого обміну перестановками, детально проаналізувало поведінку підсистеми кадрової синхронізації в умовах великої ймовірності бітової помилки та показало доцільність використання підходу до прийняття рішення про факт синхронізації. Саме ця модель, включно з описаними алгоритмами формування кадру, обробки ковзного вікна, фазової компенсації і перевірки перестановки, слугує теоретичною та методологічною основою для реалізації, що розглядається у поточному дослідженні, як присвячено практичній реалізації та експериментальній перевірці системи завадостійкого інформаційного обміну, здатної забезпечити низьку ефективну ймовірність помилки на виході декодера в умовах інтенсивних завад, характерних для неліцензованих ISM-діапазонів, з використанням доступної елементної бази.

Отже, **метою** роботи є побудова макетних зразків системи завадостійкого інформаційного обміну, у якій передавання здійснюється у вигляді перестановок нероздільного факторіального коду двійковим симетричним каналом.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Сучасні засоби передавання даних радіоканалом реалізують стандартизовані протоколи, як от ESB, LoRa, EasyLink, SimpliCI TI, SMAC тощо, що забезпечує простий та надійний обмін повідомленнями. Проте, для реалізації методу передавання перестановок, запропонованого у [9], необхідно використовувати прямий доступ до середовища передавання даних, що неможливо реалізувати надбудовою над існуючими протоколами передавання даних. Для цього необхідно використовувати трансивери, що дозволяють працювати у режимі модему. У роботі у якості модему використовується трансивер SX1278 від компанії Semtech.

SX1278 – це малопотужний субгігерцовий трансивер сімейства SX1276/77/78/79, розрахований на роботу в діапазоні 137-525 МГц [11]. Мікросхема поєднує два логічно відокремлені

модеми: широкосмуговий LoRa і вузькосмуговий FSK/OOK, що підтримує FSK, GFSK, MSK, GMSK та OOK.

З погляду архітектури, SX1278 складається з аналогового RF-фронтенду, частотного синтезатора, цифрового приймача, двох модемів (LoRa та FSK/OOK), а також верхньорівневого секвенсера та периферійних блоків керування. Потужність передавача складає +14 dBm, а за використання PA_BOOST (за відповідного зовнішнього узгодження) – до +20 dBm. Всі основні операції фільтрації, демодуляції, оцінки RSSI та автоматичного регулювання підсилення (AGC) виконуються в цифровому домені.

Функціонально SX1278 підтримує широкий діапазон бітрейтів у FSK/GFSK/OOK аж до сотень кілобіт за секунду (типово до ~300 кбіт/с), чутливість, характерну для вузькосмугових приймачів, і забезпечує гнучке налаштування смуг фільтрів приймача, девіації частоти та бітрейту. Додатково інтегровано температурний сенсор, детектор низької напруги живлення, програмований вихід CLKOUT, а також шість виводів DIO, які можуть сигналізувати про внутрішні події (готовність режиму, заповнення FIFO, виявлення преамбули, завершення передавання тощо).

Приймач FSK/GFSK у SX1278 оптимізовано для індексів модуляції приблизно від 0,5 до 10. Після демодуляції сигнал може подаватися безпосередньо назовні («raw demodulator output») або через Bit Synchronizer, який виконує відновлення такту та формує синхронний бітовий потік.

У FSK/OOK-модемі SX1278 передбачено два основних режими опрацювання даних: пакетний (Packet mode) та безперервний (Continuous mode). У пакетному режимі мікроконтролер працює з байтами через FIFO, тоді як внутрішній механізм чіпа автоматично формує преамбулу, синхрослово, обчислює CRC, виконує манчестерське кодування або відбілювання і генерує відповідні події на виводах DIO (наприклад «PacketSent», «PayloadReady»). Це режим з мінімальним навантаженням на обчислювальні ресурси мікроконтролера, але з фіксованою структурою кадру.

Безперервний режим (Continuous Mode) має принципово іншу філософію: у цьому випадку SX1278 перетворюється на потоковий модем. Дані в процесі передавання подаються у вигляді NRZ-послідовності безпосередньо на вивід DIO2 (DATA), а в процесі приймання знімаються з того самого виводу. FIFO й пакетний двигун у цьому випадку не використовуються. Додатково чіп формує тактовий сигнал DCLK на виводі DIO1, який синхронізований із внутрішнім генератором бітрейту. У режимі передавання мікроконтролер має подавати нове значення бітового сигналу у визначеному вікні навколо фронту DCLK, що гарантує правильний час семплювання всередині чіпа.

На прийомі можливі два варіанти безперервного режиму. Якщо Bit Synchronizer вимкнений, на DIO2 виводиться вихід демодулятора, і зовнішній мікроконтролер повністю відповідає за відновлення такту та прийняття рішень щодо рівня бітів. Це режим для дуже специфічних застосувань з розвинутою цифровою обробкою. Якщо Bit Synchronizer увімкнений, то на DIO2 подаються вже синхронізовані бітові дані, а на DIO1 – відновлений такт, який можна використовувати для семплювання. Для GFSK цей варіант практично завжди кращий, оскільки гаусове згладжування зменшує крутизну фронтів, і апаратне відновлення такту забезпечує меншу ймовірність помилки на схилах імпульсів.

Таким чином у безперервному GFSK-режимі SX1278 поводить себе як синхронний потоковий модем: бітрейт жорстко задається внутрішніми регістрами; у передавальному напрямку дані зчитуються по такту DCLK, у приймальному – повертаються разом із відновленим тактом. Весь протокол верхнього рівня – структура кадру, довжина й вміст преамбули, формат заголовків, алгоритми кодування та повторних передавань – реалізується вже в мікроконтролері. Порівняно з пакетним режимом це дає максимальну гнучкість (можна реалізувати нестандартні або власні протоколи над GFSK). Цей режим максимально підходить для реалізації системи завадостійкого інформаційного обміну [9], оскільки дає повний контроль над переданими та прийнятими даними.

У якості обчислювальної платформи для формування пакету даних під час передавання та декодування пакету під час приймання використовується STM32G474RE – 32-бітний мікроконтролер на ядрі ARM Cortex-M4F (із FPU та DSP-розширеннями) з максимальною тактовою частотою 170 МГц, який належить до енергоефективної лінійки STM32G4. Він має до 512 КБ постійної та 128 КБ оперативної пам'яті, розширений набір цифрових та аналогових модулів.

У роботі SX1278 використовується у безліцензійному ISM діапазоні на частоті 434 МГц. Проте, за використання аналогічних чіпів, можлива реалізація і на інших частотах, як от SX1276 (868 МГц), CC2500 (2,4 ГГц) тощо. Швидкість каналу в межах тестування встановлена на значення

4,8 Кбіт/с, проте може бути змінена за необхідності. Опишемо алгоритм роботи програмного забезпечення макетних зразків.

Нехай $M = 8$ – кількість елементів у одній літері, а $l_r = 3$ – кількість бітів на один елемент за рівномірного їх кодування.

Одна літера є вектором $L = (l_0, l_1, \dots, l_{M-1})$ довжиною $M \cdot l_r = 24$ біт.

Синхролітерою є фіксований вектор $L_0 = (0, 1, 7, 3, 2, 5, 4, 6)$.

Запровадимо операцію циклічного зсуву всієї 24-бітової послідовності, що відповідає L_0 , на один біт праворуч з наступним розбиттям на 8 трьохбітових елементів. Послідовно застосовуючи таку операцію, сформуємо множину $L_0, L_1, \dots, L_{23}$, де кожна L_i – це результат циклічного зсуву L_0 на i біт. Таким чином, утворено алфавіт із 24 літер, які є циклічними зсувами однієї базової 24-бітної літери.

У межах тестування роботи протоколу в дослідженні корисне повідомлення має довжину 4 байти. Для кодування повідомлення використовується факторіальна система числення, а послідовність з 32 біт повідомлення представляється у вигляді перестановки із 13 елементів, оскільки $\lfloor \log_2 13! \rfloor = 32$. За використання $M = 8$, довжина перестановки в слові, що передається, складає 23 елементи. Перші 10 елементів цієї перестановки записуються послідовно від 1 до 10. Останні 13 елементів формуються з перестановки, утвореної з корисного навантаження, шляхом додавання до кожного елементу значення 10. Отримана в результаті перестановка π з 23 елементів може бути передана за допомогою описаного алгоритму.

Кожному елементу перестановки π ставиться у відповідність один із циклічних зсувів літери L_0 , тобто у результаті слово W , утворене з перестановки π , формує перестановку множини перестановок (метаперестановку).

Синхронізаційна частина пакету складається з $l_{\max \text{ letters}} = 75$ однакових літер L_0 . Таким чином, загальна довжина блоку синхронізації становить $l_{\max \text{ letters}} \cdot M \cdot l_r = 75 \cdot 8 \cdot 3 = 1800$ біт.

Інформаційне слово W складається з 23 літер, а його загальна довжина становить 552 біт. Одне й те саме слово повторюється $l_{\max \text{ words}} = 89$ разів. Тоді загальна довжина інформаційного блоку становить $89 \cdot 552 = 49128$ біт.

Повний пакет має довжину 50928 біт, і представляє наступну структуру:

$$\underbrace{L_0, \dots, L_0}_{75}, \underbrace{W, \dots, W}_{89}$$

Бітовий потік пакету послідовно записується до буферу у пам'яті. На рівні фізичного інтерфейсу кожний тактовий імпульс (лінія синхронізації) супроводжується передаванням наступного біта пакету на лінію даних. Таким чином, формується синхронне послідовне передавання бітів за допомогою GFSK-модему.

На приймальній стороні бітовий потік дискретизується у кільцевий буфер. Окрім простого накопичення, здійснюється оцінка статистики по кожній із 24 бітових позицій у межах однієї синхролітери.

Для кожного нового прийнятого біта зчитується також біт, віддалений на довжину синхроблоку. Для кожної бітової позиції b літери ведеться лічильник C_b , що збільшується на одиницю, якщо біт, що вийшов за межі синхроблоку, є більший за прийнятий, та зменшується на одиницю у протилежному випадку. Таким чином формується інтегральна оцінка домінуючого значення кожної бітової позиції синхрослова на довжині синхроблоку.

Після накопичення статистики за всіма $b = 0, \dots, 23$ позиціями на підставі значення лічильників C_b формується оцінка прийнятої літери:

$$\hat{L} = (\hat{l}_0, \dots, \hat{l}_{M-1}),$$

де кожен біт визначається шляхом порогового порівняння:

$$\hat{b}_i = \begin{cases} 1, & C_i > l_{\max \text{ letters}} / 2; \\ 0, & C_i \leq l_{\max \text{ letters}} / 2. \end{cases}$$

Отримана літера $\hat{L}$ порівнюється з усіма елементами алфавіту $L_0, \dots, L_{23}$. Якщо виявлено збіг з будь-якою літерою алфавіту, збільшується лічильник подій виявлення D . Якщо декілька разів поспіль $D \geq T$, де $T = 5$, спостерігається дійсна літера, фіксується момент часу (вказівник на адресу буфера ptr_{fix}), який інтерпретується як синхронізація.

Для уточнення фазового зсуву за бітами в межах 24-бітової структури синхролітери виконується додаткове усереднення: з області, де очікується синхроблок, отримуються всі $l_{max\ letters} = 75$ копій синхролітери та за кожною бітовою позицією мажоритарно визначається значення біта. Отримане значення усередненої синхролітери $\hat{L}_{sync}$ знову порівнюється з елементами алфавіту $L_0, L_1, \dots, L_{23}$. Індекс i , для якого $\hat{L}_{sync} = L_i$, інтерпретується як оцінка фазового зсуву синхрослова відносно базової літери L_0 .

Початок області даних у буфері визначається як $ptr_{data} = ptr_{fix} + l_{max\ letters} \cdot M \cdot l_r - i$. Кожна літера інформаційного слова декодується з буферу аналогічно до синхролітери, починаючи з вказівника ptr_{data} . Отримане слово циклічно зсувається вліво на кількість літер, рівну позиції літери L_1 у слові, і представляє собою метаперестановку, таку саму, що формував передавач. Отримана зі слова перестановка π із факторіальної системи числення перетворюється у послідовність із 4 символів, які передаються користувачеві.

Отриманий макетний зразок, що реалізує систему завадостійкого інформаційного обміну, наведено на рис. 1.

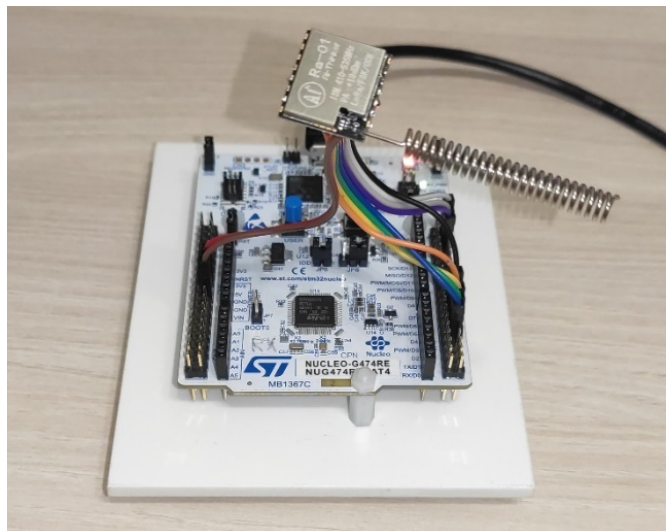


Рис. 1. Макетний зразок системи завадостійкого інформаційного обміну

Для оцінки стійкості реалізованої системи до завад у каналі введемо штучну заваду, яка буде інвертувати кожен біт буферу на передавальній стороні з ймовірністю $p = [0 \dots 0.4]$ та кроком 0.01 для кожного пакету. Для кожної літери слова оцінимо кількість однакових біт, які були порашовані

мажоритарним методом, та знайдемо їх середнє значення $Q = \frac{\sum_{i,j} |C_i(j) - 89/2|}{23 \cdot 24}$, де $C_i(j)$ – j -тий

лічильник i -того слова. За відсутності завад значення Q буде прямувати до $89/2$, а за відсутності сигналу чи занадто високому рівню завад Q буде прямувати до 0. Отримані результати тестування наведені у таблиці 1. Зауважимо, що для всіх перевірених ймовірностей $p = [0 \dots 0.4]$ в процесі експерименту відбувалась подія успішної синхронізації. Додатково, значення Q можна інтерпретувати як якість каналу.

Таблиця 1. Результати експериментальної оцінки роботи системи в умовах завад

p	Q	p	Q	p	Q
-----	-----	-----	-----	-----	-----

0.00	42.2	0.14	30.2	0.28	18.3
0.01	41.2	0.15	29.4	0.29	17.5
0.02	40.5	0.16	28.6	0.30	17.0
0.03	39.6	0.17	27.8	0.31	15.6
0.04	39.0	0.18	26.6	0.32	15.1
0.05	37.9	0.19	25.7	0.33	14.2
0.06	36.9	0.20	25.3	0.34	13.0
0.07	36.4	0.21	24.2	0.35	12.4
0.08	35.4	0.22	23.9	0.36	11.0
0.09	34.7	0.23	22.6	0.37	10.5
0.10	33.6	0.24	21.7	0.38	10.0
0.11	32.9	0.25	21.0	0.39	8.8
0.12	31.9	0.26	20.2	0.40	8.1
0.13	31.6	0.27	19.2		

Висновки та перспективи подальших досліджень. На основі імітаційної моделі асинхронної системи передавання даних з роздільним факторіальним кодом розроблено та зібрано макетні зразки системи завадостійкого радіообміну, що працює в безліцензійному ISM-діапазоні на базі FSK/GFSK-модему SX1278 та мікроконтролера серії STM32.

Реалізовано програмні алгоритми формування кадру, кадрової синхронізації, обробки ковзного вікна й декодування факторіального коду, які забезпечують коректне виділення області корисних даних та прийнятний час обробки кадру в умовах обмежених апаратних ресурсів.

Проведено експериментальну оцінку роботи системи в умовах завад. Результати показали, що отриманий макетний зразок, параметри якого визначено для граничного значення 0,4 ймовірності бітової помилки, зберігає працездатність за збільшення бітової помилки каналу до цього показника 0,4 та забезпечує можливість декодування повідомлення.

Підтверджено доцільність використання нероздільного факторіального коду та запропонованих алгоритмів кадрової синхронізації в практичних радіосистемах на базі SX1278. Перспективами подальших досліджень є оптимізація програмної реалізації, розширення функціоналу протоколу та випробування системи в різних сценаріях реального радіоканалу, у тому числі з іншими параметрами та нестационарною завадою.

Подяки. Роботу виконано в рамках науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Розробка методів, протоколів і засобів захищеного інформаційного обміну з використанням трьохетапного криптографічного протоколу на основі перестановок в умовах зашумленості каналів зв'язку» (№0123U100270).

Список бібліографічного опису

1. Azari A., Masoudi M. Interference management for coexisting Internet of Things networks over unlicensed spectrum. *Ad Hoc Networks*. Vol. 120, 09.2021. P. 102539. DOI:10.1016/j.adhoc.2021.102539.
2. Polak L., Milos J. Performance analysis of LoRa in the 2.4 GHz ISM band: coexistence issues with Wi-Fi. *Telecommunication Systems*. Vol. 74, Issue 3. P. 299–309. DOI:10.1007/s11235-020-00658-w.
3. Guo W., Healy W. M., Zhou M. Impacts of 2.4-GHz ISM Band Interference on IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Network Reliability in Buildings. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 61, Issue 9. P. 2533–2544. DOI:10.1109/TIM.2012.2188349.
4. Hasan A., Khan B. M. Deep learning aided wireless interference identification for coexistence management in the ISM bands. *Wireless Networks*. Вип. 29, № 7. С. 3311–3331. DOI:10.1007/s11276-023-03389-3.
5. Baccour N., Puccinelli D., Voigt T. et al., Baccour N., Koubâa A., Noda C. et al. External Radio Interference. *Radio Link Quality Estimation in Low-Power Wireless Networks*. Heidelberg : Springer International Publishing, 2013. P. 21–63. DOI:10.1007/978-3-319-00774-8_2.
6. Shilpa B., Gupta H. P., Jha R. K. та ін. LoRa interference issues and solution approaches in dense IoT networks: a review. *Telecommunication Systems*. Вип. 87, № 2. С. 517–539. DOI:10.1007/s11235-024-01192-9.
7. Azmi N., Kamarudin L. M., Mahmuddin M. et al. Interference issues and mitigation method in WSN 2.4GHz ISM band: A survey. *2014 2nd International Conference on Electronic Design (ICED) 2014 2nd International Conference on Electronic Design (ICED)*. (Penang, Malaysia, 08.2014). Penang, Malaysia : IEEE, 2014. DOI:10.1109/ICED.2014.7015839. P. 403–408.
8. Morais D. H., Morais D. H. Digital Modulation: The Basic Principles. *5G NR, Wi-Fi 6, and Bluetooth LE 5*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. С. 37–54. DOI:10.1007/978-3-031-33812-0_4.

9. Faure E., Skutskiy A., Lavdanskyy A. Algorithms and simulation model for the synchronisation subsystem of the noise-resilient communication system based on permutations. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*. Vol. 29, Issue 4. P. 62–74. DOI:10.62660/bestu/4.2024.62.
10. Faure E., Shcherba A., Makhynko M. та ін. Concept for Using Permutation-Based Three-Pass Cryptographic Protocol in Noisy Channels. *Systems, Decision and Control in Energy V*. ред. Artur Zaporozhets. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. C. 99–113. DOI:10.1007/978-3-031-35088-7_7.
11. LoRa Connect Transceiver, SX1278, 137MHz to 525MHz | Semtech. URL: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1278>

References

1. Azari A., Masoudi M. Interference management for coexisting Internet of Things networks over unlicensed spectrum. *Ad Hoc Networks*. Vol. 120, 09.2021. P. 102539. DOI:10.1016/j.adhoc.2021.102539.
2. Polak L., Milos J. Performance analysis of LoRa in the 2.4 GHz ISM band: coexistence issues with Wi-Fi. *Telecommunication Systems*. Vol. 74, Issue 3. P. 299–309. DOI:10.1007/s11235-020-00658-w.
3. Guo W., Healy W. M., Zhou M. Impacts of 2.4-GHz ISM Band Interference on IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Network Reliability in Buildings. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 61, Issue 9. P. 2533–2544. DOI:10.1109/TIM.2012.2188349.
4. Hasan A., Khan B. M. Deep learning aided wireless interference identification for coexistence management in the ISM bands. *Wireless Networks*. Вип. 29, № 7. С. 3311–3331. DOI:10.1007/s11276-023-03389-3.
5. Baccour N., Puccinelli D., Voigt T. et al., Baccour N., Koubâa A., Noda C. et al. External Radio Interference. *Radio Link Quality Estimation in Low-Power Wireless Networks*. Heidelberg : Springer International Publishing, 2013. P. 21–63. DOI:10.1007/978-3-319-00774-8_2.
6. Shilpa B., Gupta H. P., Jha R. K. та ін. LoRa interference issues and solution approaches in dense IoT networks: a review. *Telecommunication Systems*. Вип. 87, № 2. С. 517–539. DOI:10.1007/s11235-024-01192-9.
7. Azmi N., Kamarudin L. M., Mahmuddin M. et al. Interference issues and mitigation method in WSN 2.4GHz ISM band: A survey. 2014 2nd International Conference on Electronic Design (ICED) 2014 2nd International Conference on Electronic Design (ICED). (Penang, Malaysia, 08.2014). Penang, Malaysia : IEEE, 2014. DOI:10.1109/ICED.2014.7015839. P. 403–408.
8. Morais D. H., Morais D. H. Digital Modulation: The Basic Principles. 5G NR, Wi-Fi 6, and Bluetooth LE 5. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. C. 37–54. DOI:10.1007/978-3-031-33812-0_4.
9. Faure E., Skutskiy A., Lavdanskyy A. Algorithms and simulation model for the synchronisation subsystem of the noise-resilient communication system based on permutations. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*. Vol. 29, Issue 4. P. 62–74. DOI:10.62660/bestu/4.2024.62.
10. Faure E., Shcherba A., Makhynko M. та ін. Concept for Using Permutation-Based Three-Pass Cryptographic Protocol in Noisy Channels. *Systems, Decision and Control in Energy V*. ред. Artur Zaporozhets. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. C. 99–113. DOI:10.1007/978-3-031-35088-7_7.
11. LoRa Connect Transceiver, SX1278, 137MHz to 525MHz | Semtech. URL: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1278>