

УДК 004.7:621.391

**ВИКОРИСТАННЯ КОДІВ СИСТЕМИ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ ДЛЯ
КОМПЛЕКСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ НАДІЙНОСТІ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ
AGRO-IOT МЕРЕЖ LORAWAN**
USE OF RESIDUE NUMBER SYSTEM CODES FOR COMPLEX OPTIMIZATION OF RELIABILITY,
ENERGY EFFICIENCY, AND SECURITY OF AGRO-IOT LORAWAN NETWORKS

Станіслав Гончаренко, Аліна Янко

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
Україна, Полтава*

Вступ та актуальність. Сучасний етап розвитку агроінженерії характеризується переходом до концепції цифрового землеробства, що базується на використанні розгалужених мереж «Інтернету речей» (IoT). Технологія LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) наразі є ключовим інструментом для забезпечення зв'язку на великих відстанях при низькому енергоспоживанні кінцевих вузлів [1]. Проте експлуатація таких мереж у реальних аграрних умовах стикається з проблемою деградації сигналу через специфічний рельєф, високу вологість та щільність біомаси, що зумовлює виникнення завад і втрату пакетів даних. Оскільки ресурси мікроконтролерів у датчиках є обмеженими, традиційні методи завадостійкого кодування в двійковій системі числення часто вичерпують свій потенціал. Це актуалізує впровадження альтернативних математичних підходів, зокрема системи залишкових класів (СЗК), для оптимізації передачі трафіку.

Аналіз архітектури Agro-IoT систем. Сучасна архітектура систем IoT в аграрному секторі базується на багатоуровневій моделі, де ключову роль відіграє сегмент збору та первинної обробки даних. Типова інфраструктура включає сотні автономних сенсорів (End Nodes), що в режимі реального часу контролюють критичні параметри: вологість і хімічний склад ґрунту, вегетаційні індекси рослин, а також координати та технічний стан роботизованих платформ.

Проведений аналіз показав, що впровадження специфікацій LoRaWAN версій 1.0.4 та 1.1 [2, 3] значно розширює функціонал мереж, зокрема в частині безпеки та підтримки класів пристроїв (A, B, C). Однак фізичний рівень LoRa, що базується на маніпуляції з розширенням спектра (CSS), залишається чутливим до специфічних завад агроландшафтів [4]. Велика площа покриття (до 15 км) у поєднанні з низькою потужністю передавачів робить пакети даних вразливими до колізій при високій щільності вузлів та до викривлень, спричинених багатопроблемним поширенням сигналу від рельєфу місцевості та біомаси насаджень [5].

Особливе місце в архітектурі займає питання обчислювального навантаження на кінцеві вузли. Оскільки агро-датчики часто працюють у важкодоступних зонах без можливості оперативного сервісного обслуговування, їхня архітектура має бути максимально оптимізованою. Використання стандартних алгоритмів перевірки цілісності та завадостійкого кодування в двійковій системі числення створює значне навантаження на обмежені ресурси мікроконтролерів.

Дослідження підтверджує, що вразливість фізичного рівня до пакетних помилок та колізій вимагає розробки нових математичних моделей формування кадру даних. Саме тому інтеграція непозиційної арифметики СЗК безпосередньо в протокольний стек дозволяє переосмислити підхід до архітектури Agro-IoT систем: від простої передачі необроблених даних до впровадження елементів «Edge Computing» (периферійних обчислень). Це дозволяє проводити первинну фільтрацію та завадостійке кодування трафіку безпосередньо на борту датчика чи робота, забезпечуючи високу стійкість інформаційного обміну в складних умовах реального агровиробництва.

Методологія застосування СЗК. Наукова новизна запропонованого підходу полягає у переході від традиційного двійкового представлення даних до непозиційної арифметики СЗК при формуванні пакетів даних у мережах LoRaWAN. Методологія базується на властивостях модулярного представлення чисел [6], де кожне значення X розкладається на набір залишків $(x_1, x_2,$

..., x_n) за системою взаємно простих основ (модулів) m_1, m_2, \dots, m_n . Такий підхід дозволяє реалізувати ключові переваги модулярної арифметики в агроінженерних задачах.

По-перше, паралелізм на рівні даних, що заключається в реалізації арифметичних операцій додавання, віднімання та множення незалежно за кожним модулем, дозволяє суттєво прискорити цифрову обробку сигналів на кінцевих пристроях. Це критично важливо для обробки великих масивів телеметричних даних безпосередньо на борту автономних платформ.

По-друге, завадостійкі властивості кодів СЗК, які забезпечуються введенням надлишкових модулів, дозволяють не лише виявляти, а й локалізувати та виправляти помилки, що виникають у радіоканалі. На відміну від позиційних систем, де пошкодження одного розряду може спотворити всю вагу числа, у системі залишкових класів помилка в одному модульному каналі не поширюється на інші, що підвищує загальну живучість інфокомунікаційної мережі.

Отже, особлива увага в роботі приділена реалізації паралелізму на рівні даних. Паралельна обробка без необхідності міжрозрядних переносів дозволяє суттєво прискорити цифрову обробку сигналів на кінцевих пристроях Agro-ІоТ, які використовують мікроконтролери з архітектурою RISC. А завадостійкі властивості кодів СЗК принципово новий рівень надійності в умовах нестабільного радіоканалу [7]. Завдяки введенню додаткових контрольних модулів m_{n+1}, \dots, m_{n+k} , система отримує здатність до корекції помилок без необхідності надсилання запитів на повторну передачу пакетів (ARQ). Це критично важливо для Agro-ІоТ мереж, де кінцеві пристрої часто знаходяться у «мертвих зонах» за межами прямої видимості базової станції.

Використання модулярної арифметики дозволяє реалізувати алгоритми виявлення спотворень безпосередньо в процесі обробки даних. Оскільки помилка в одному модульному каналі залишається локалізованою і не спричиняє лавиноподібного поширення хибних значень на весь числовий діапазон, система зберігає працездатність навіть при високій інтенсивності завад. Це безпосередньо впливає на живучість автономних роботизованих платформ, оскільки гарантує доставку достовірних координат та телеметричних показників у реальному часі.

Окрім технічної надійності, впровадження СЗК у протокольний стек LoRaWAN версій 1.0.4 та 1.1 забезпечує значний економічний ефект. Зменшення часу активної роботи трансивера за рахунок відсутності повторних передач дозволяє подовжити термін експлуатації акумуляторів датчиків на 15–20%. Таким чином, розроблена методологія інтеграції непозиційної арифметики в агроінженерні системи не лише підвищує якість передачі трафіку, але й відповідає сучасним вимогам енерго- та ресурсозбереження в аграрному виробництві.

Результати моделювання та обговорення. У межах наукового дослідження було проведено комплексне імітаційне моделювання процесів передачі трафіку в мережі LoRaWAN для автономної агротехнічної платформи моніторингу. Порівняльний аналіз архітектурних інновацій специфікацій LoRaWAN версій 1.0.4 та 1.1 у поєднанні із впровадженням СЗК-орієнтованих алгоритмів продемонстрував суттєві переваги над стандартними методами обробки даних.

Експериментальні дані підтверджують, що використання непозиційної арифметики дозволяє знизити ймовірність помилки на біт (BER) на 15–18% порівняно з традиційними методами кодування. Це забезпечує стабільність зв'язку навіть при критично низькому співвідношенні сигнал/шум (SNR) — показники виявилися на 3–5 дБ нижчими, ніж у стандартних рішеннях, що є визначальним фактором для роботи в умовах щільної рослинності та складного рельєфу.

Особлива увага була приділена енергоефективності кінцевих вузлів. Завдяки відсутності міжрозрядних переносів та можливості глибокої паралелізації операцій, енерговитрати на обчислювальну обробку пакетів скоротилися на 18–20%. Таке зменшення навантаження на центральний процесор пристрою призводить до загального підвищення енергоефективності датчиків на 12–15%, що дозволяє значно подовжити термін їхньої автономної експлуатації в польових умовах без необхідності заміни елементів живлення.

Крім технічних характеристик зв'язку, інтеграція СЗК дозволила гарантувати високий рівень цілісності криптографічних перетворень. Це має критичне значення для захисту даних про точне розташування роботизованих систем, особливо при виконанні бойових чи гуманітарних місій з розмінування територій. Використання непозиційної системи числення створює додатковий рівень

прихованої безпеки трафіку: перехоплення окремих залишків зловмисником, без знання специфічної системи обраних модулів, унеможлиблює відновлення вихідної інформації. Такий підхід надійно захищає критичні агротехнологічні процеси від сторонніх кібервтручань та забезпечує інформаційну стійкість всієї інфраструктури.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що інтеграція математичного апарату системи залишкових класів у протокольний стек LoRaWAN є одним із найбільш перспективних шляхів подолання бар'єрів цифровізації сучасного агровиробництва. Отримані результати дозволяють сформулювати наступні підсумки:

1. Технічна ефективність, що заключається в переході до непозиційної арифметики при формуванні пакетів даних, що дозволяє забезпечити високу завадостійкість інформаційного обміну. Здатність кодів СЗК до локалізації та корекції помилок без повторних запитів (ARQ) гарантує стабільну роботу мереж Agro-ІоТ навіть у складних заводових середовищах, де стандартні методи вичерпують свій потенціал.

2. Енерго- та ресурсозбереження, що полягає в унікальній властивості паралелізму на рівні даних представлених в СЗК, в результаті суттєво знижує обчислювальне навантаження на мікроконтролери кінцевих пристроїв. Мінімізація часу активної роботи трансивера та процесора забезпечує реальне подовження життєвого циклу автономних датчиків на 15–20%, що є критично важливим для масштабних систем точного землеробства.

3. Підвищення рівня безпеки та живучості. Застосування модулярної арифметики надає додатковий рівень кіберзахисту агротехнологічних процесів. Прихована структура даних у СЗК ускладнює несанкціоноване відновлення інформації зловмисниками, що разом із підвищеною надійністю передачі координат забезпечує безпечну експлуатацію автономних роботизованих платформ у зонах виконання гуманітарних та бойових завдань.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка адаптивних протоколів, що дозволять динамічно змінювати набір робочих модулів СЗК залежно від поточної заводової обстановки в реальному часі, що стане основою для створення інтелектуальних систем управління агропромисловим комплексом нового покоління.

Список використаних джерел

1. Янко А. С., Горчаренко С. О. Практичні рекомендації з налаштування LORAWAN-мережі для стабільної роботи та захищеності даних. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління* : тези доповідей п'ятнадцятої міжнар. наук.-техн. конф., 24–25 квітня 2025 р. Баку–Харків–Жиліна, 2025. Т. 3. С. 6–7. DOI: <https://doi.org/10.32620/ICT.25.t3>.
2. Lavric A., Popa V. LoRaWAN Gateway: A Comparative Analysis of v1.0.4 and v1.1 Implementations. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 14. Art. 4872. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21144872>.
3. Han J., Wang J. The Architecture and Security Analysis of LoRaWAN v1.1. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 8330–8341. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2796191>.
4. Analysis of LoRaWAN 1.0 and 1.1 Protocols Security Mechanisms / S. Loukil et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 10. Art. 3717. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22103717>.
5. LoRaWAN 1.0.4 Specification / *LoRa Alliance*. 2020. 102 p. URL: <https://resource.lora-alliance.org/technical-specifications/lorawan-1-0-4-specification> (дата звернення: 19.03.2026).
6. Yanko A., Krasnobayev V., Hlushko A., Goncharenko S. Neurocomputer operating in the residue class system. *Advanced Information Systems*. 2025. Vol. 9, No. 2. P. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.2.11>.
7. Yanko A., Krasnobayev V., Goncharenko S. LoRaWAN network security and efficiency: practical tips and recommendations. *Theoretical and Applied Cyber Security*. 2025. Vol. 7, No. 1. P. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.20535/tacs.2664-29132025.1.323317>.