



I. P. Пітух¹, Т. М. Гринчишин², А. Я. Давлетова³

¹ Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна

² ВСП Надвірнянський фаховий коледж НТУ, м. Надвірна, Україна

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПОБУДОВИ РОЗПОДІЛЕНИХ МОНІТОРИНГОВИХ СИСТЕМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МАНІПУЛЬОВАНИХ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ

Виявлено, що для об'єктів природоохоронного комплексу виникає потреба в застосуванні ліній передавання даних з обмеженим електромагнітним впливом. Дослідження спрямоване на розроблення методів і засобів передавання даних в інтегрованих моніторингових системах для природоохоронних об'єктів на підставі комутованих катафотів. Розглянуто основні архітектурні рішення розподілених моніторингових систем, що забезпечують надійний обмін даними в умовах складного рельєфу та обмеженого застосування електромагнітних полів. Встановлено, що такі об'єкти є дуже чутливими до зазначених впливів, оскільки це має негативний вплив на фауну та флору. З'ясовано, що використання оптичних мереж на підставі комутованих катафотів і бінарно-маніпульованих оптичних сигналів дає змогу мінімізувати вплив електромагнітного випромінювання на екосистему, забезпечуючи при цьому високу швидкість та надійність передавання даних. Запропоновано підхід до побудови оптичних мереж з використанням катафотів як відбивачів світлових сигналів для передавання даних на великі відстані з одночасним підвищенням надійності. Оцінено вплив електромагнітних полів на екологію довкілля в контексті застосування традиційних телекомунікаційних систем, а також обґрунтовано потребу розроблення нових методів побудови мереж, що враховують ці фактори. Також досліджено перспективи застосування зірково-кільцевих і систолічних топологій для ефективного оброблення та передавання сигналів від сенсорних мереж у природних заповідниках. Проаналізовано переваги використання комутованих катафотів порівняно з традиційними оптичними системами, зокрема їх здатність забезпечувати високу надійність передавання даних у складних погодних умовах. Досліджено перспективи розвитку методів кодування інформації за допомогою бінарно-маніпульованих оптичних сигналів, що сприяє підвищенню точності та надійності передачі інформації в екологічно чутливих зонах. На підставі проведеного дослідження запропоновано рекомендації з подальшого розвитку та впровадження оптичних мереж на підставі цих технологій у сферах, де зниження електромагнітного впливу є критичним. Результати дослідження свідчать про те, що використання комутованих катафотів дає можливість значно підвищити стабільність роботи систем моніторингу на територіях природоохоронних зон. Запропонований метод побудови оптичної мережі на підставі комутованих катафотів і бінарно-маніпульованих оптичних сигналів може бути впроваджено для віддаленого моніторингу природних об'єктів і для забезпечення надійного захищеного передавання даних на відстані до 10 км, що є особливо важливим для збереження екологічного балансу в заповідниках.

Ключові слова: сенсорні мережі; електромагнітний вплив; Хеммінгова віддаль; пам'ять колективного доступу; безпроводна передача даних.

Вступ / Introduction

Проблемою передавання даних у системах моніторингу природоохоронних об'єктів є забезпечення ефективних і безпечних каналів передачі даних, які функціонують в умовах мінімального радіочастотного випромінювання. Вирішення цієї проблеми набуває актуальності для природних заповідників й інших екологічно чутливих зон, де вплив електромагнітного випромінювання на флору і фауну може спричинити небажані наслідки їх життєдіяльності.

Як зарубіжні [14, 19, 20, 23], так і вітчизняні [4, 5, 10, 11] вчені приділяють значну увагу вирішенню цієї

проблеми, зокрема розвитку, побудові та застосуванню безпроводних оптичних мереж й безконтактних технологій зв'язку. Результати досліджень показують можливість досягнення високої швидкості обміну даними за одночасного зменшення рівня електромагнітних перешкод. У роботах таких дослідників, як Teixeira R. С. М. [19], Zhang S. [23], Ranasinghe V. [14], Петрушак Я. В. [5, 11], Николайчук Я. М. [4], Грига В. М. [6, 10], розглянуто принципи використання технології оптичної передачі даних FSO (англ. *Free Space Optics*) для екологічно безпечних каналів зв'язку. Застосування FSO-технології у важкодоступних або захищених природних середовищах активно досліджує наукова спільнота. Про-

Інформація про авторів:

Пітух Ігор Романович, канд. техн. наук, доцент, кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем.

Email: pirom75@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-3329-4901>

Гринчишин Тарас Михайлович, канд. техн. наук, викладач. Email: gtarasm79@ukr.net;

<https://orcid.org/0000-0001-5278-5733>

Давлетова Аліна Ярославівна, викладач, кафедра кібербезпеки. Email: a7davletova@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-1192-2532>

Цитування за ДСТУ: Пітух І. Р., Гринчишин Т. М., Давлетова А. Я. Методи та засоби побудови розподілених моніторингових систем із застосуванням маніпульованих оптичних сигналів. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 7. С. 153–160.

Citation APA: Pitukh, I. R., Grynchysyn, T. M., & Davletova, A. Ya. (2024). Methods and means of building distributed monitoring systems using manipulated optical signals. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(7), 153–160. <https://doi.org/10.36930/40340719>

ведений ґрунтовний аналіз результатів досліджень у сфері архітектури оптичних мереж демонструє широке їх застосування, проте використання комутованих катафотів, як базової компоненти цих систем, є недостатньо вивченим. Окрім цього, актуальними є питання оптимізації архітектури розподілених систем моніторингу та подолання обмежень у точності передачі даних у разі застосування бінарно-маніпульованих оптичних сигналів.

Актуальність дослідження. Незважаючи на значні досягнення у розвитку безпровідних оптичних мереж, актуальним є питання розроблення нових методів, які дадуть змогу забезпечити надійне передавання даних у складних природних умовах. Оскільки базова практика передавання даних є досить обмеженою, тому далі наведено спосіб передавання даних на підставі комутованих катафотів. Водночас, відсутнє інформаційне забезпечення щодо практичного застосування такого типу оптичних каналів передавання даних. Ця проблема є особливо актуальною при організації обміну даними в системах моніторингу природоохоронних об'єктів, оскільки виникає функціональна обмеженість застосування загальновідомих каналів передачі даних.

Об'єкт дослідження – побудова розподілених моніторингових систем на підставі бінарно-маніпульованих оптичних сигналів.

Предмет дослідження – методи та засоби передавання інформаційних масивів на підставі комутованих катафотів, що дасть змогу підвищити надійність передачі даних.

Мета роботи – розробити метод побудови оптичних мереж з використанням комутованих катафотів як каналів обміну даними, що дасть можливість забезпечити високу надійність та стабільну роботу компонент оптичних трактів.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- 1) дослідити архітектури розподілених моніторингових систем моніторингу природоохоронних об'єктів, що дасть змогу застосовувати такі архітектури у кожному конкретному випадку, враховуючи характеристики об'єкта;
- 2) розробити рекомендації щодо ширшого застосування функціональних можливостей проблемно-орієнтованих FSO, що забезпечить врахування статистичного аналізу на рівні моделювання в режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [19] досліджено методи моніторингу великих і віддалених територій за допомогою бездротових сенсорних мереж. Унаслідок цього визначено низку проблем, зокрема обмеження ресурсів і затухання сигналу на великих відстанях через природні перешкоди. Запропоновано архітектуру Інтернету речей для віддалених територій з підтримкою мереж, стійких до затримок, яка поєднує передачу даних через мобільні вузли та низькоенергетичні засоби зв'язку.

У роботі [23] розглянуто методи тривимірного моделювання навколишнього середовища. Запропоновано мультисенсорну роботизовану систему для геометрично-фізичного моделювання середовища та відповідні методи оброблення даних. Це рішення дає змогу реалізувати систему, оснащену каскадним радаром міліметрового діапазону та мультиспектральною камерою, для отримання електромагнітних характеристик і категорій матеріалів цільового середовища, що одночасно використовує виявлення та визначення дальності світла та

оптичну камеру для досягнення тривимірної просторової реконструкції, середовища. Проведені ними експериментальні дослідження демонструють ефективну просторово-геометрично-фізичну реконструкцію.

У роботі [24] досліджено автономну гнучку сенсорну мережу, призначену для безперервного моніторингу мікросередовища та стану росту рослин. Запропоновано мережу сенсорів, яка живиться від альтернативних джерел енергії, таких як сонячна енергія або енергія вібрацій, що зменшує залежність від традиційних джерел живлення та батарей. Таке рішення дає змогу підвищити ефективність моніторингу довкілля внаслідок безперервної роботи впродовж тривалого часу.

У роботі [18] розглянуто аспекти розроблення гібридних сенсорних мереж для моніторингу навколишнього середовища. Розроблено та досліджено моделі надійності наземної сенсорної мережі в умовах можливих збоїв окремих давачів або їхніх груп. Отримано аналітичні залежності показників надійності роботи системи від розмірів і інтенсивності відмов кластерів давачів, що дає змогу оцінити надійність роботи мережі в різних умовах. Запропоновано архітектуру гібридної сенсорної мережі на підставі технології Edge Computing (EC), яка поєднує стаціонарні та мобільні компоненти. Таке рішення забезпечує гнучкість, масштабованість і підвищену надійність роботи системи моніторингу, що робить її придатною для використання у критично важливих сферах.

У роботі [15] розглянуто методи побудови бездротових сенсорних мереж для моніторингу стану навколишнього середовища та живих організмів, а також проаналізовано їх ефективність. Запропоновано створення мережі з гнучкою архітектурою, що включає оригінальні інтелектуальні давачі та елементи штучного інтелекту на підставі нейронних мереж. Запропоноване рішення використовує декілька протоколів бездротового обміну даними, що дає змогу ефективно збирати та передавати інформацію.

У роботі [14] запропоновано архітектуру зв'язку для децентралізованих систем раннього попередження про землетруси. Такі системи передбачають низьке споживання електроенергії, що має важливе значення в організації передавання даних про електромагнітні коливання в регіоні. Результати демонструють, що запропонована система досягає вікна попередження 1-6 с, порівняно з 1,5-6,75 традиційними Інтернет-системами.

У роботі [20] розглянуто технології побудови безпровідних мереж для розподілених об'єктів моніторингу. Запропоновано метод оптимізації розгортання вузла, щоб підвищити ефективність покриття для ефективного збирання даних. Результати моделювання показують, що порівняно з наявними алгоритмами, запропонований метод оптимізації розгортання вузла може значно покращити рівень покриття рівня зондування IoT і зменшити споживання енергії під час процесу повторного розгортання.

Проведений аналіз останніх досліджень та публікацій свідчить про те, що попри дослідженість проблеми побудови розподілених моніторингових систем із застосуванням маніпульованих оптичних сигналів, існує багато невирішених питань стосовно інформаційного забезпечення практичного застосування такого типу оптичних каналів передавання даних, що і плануємо реалізувати в цьому дослідженні.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

У роботах [5, 11, 13] досліджено характеристики розподілених моніторингових систем (РКС) моніторингу природоохоронних об'єктів. Здійснено систематизацію недоліків цього класу інформаційних систем, що обмежують ефективне застосування систем фоновго моніторингу на територіях природних заповідників.

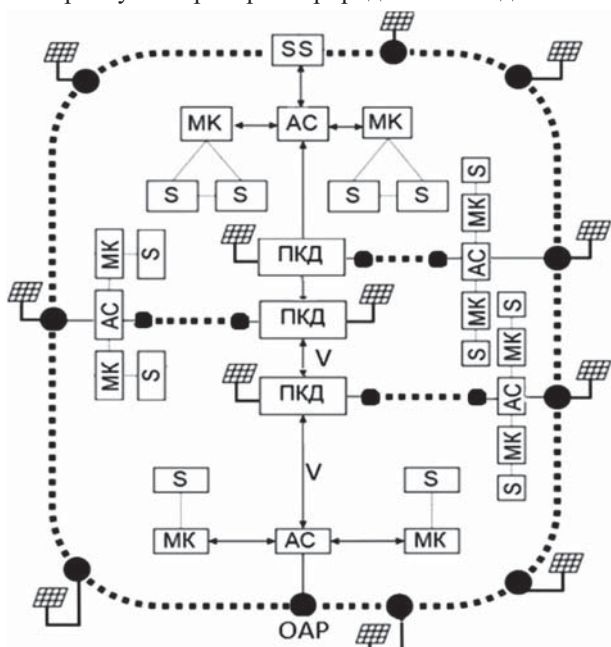


Рис. 1. Зірково-магістральна архітектура розподілених моніторингових систем моніторингу природоохоронних об'єктів / Star-bus architecture of distributed computer monitoring systems for environmental protection objects [7]

У роботах [4, 7, 9] запропоновано ефективні рішення щодо застосування систем моніторингу природоохоронних об'єктів, що базуються на використанні багаторівневих зірково-магістральних (рис. 1) [7] та зірково-кільцевих архітектур (рис. 2) [9].

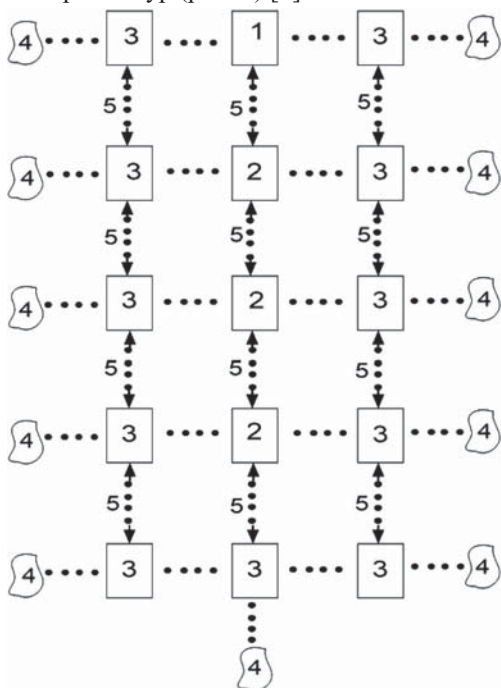


Рис. 2. Зірково-кільцева архітектура розподілених моніторингових систем моніторингу природоохоронних об'єктів / Star-ring architecture of distributed computer monitoring systems for environmental protection objects [9]

Наведена на рис. 1 архітектура зірково-магістральної розподіленої комп'ютерної системи моніторингу природоохоронних об'єктів містить такі позначення: АС – абонентська станція оператора; МК – мікроконтролер; S – сенсор; V – волоконно-оптична лінія зв'язку; ПКД – багатопортова асоціативна пам'ять колективного доступу; SS – системний мережевий сервер; ОАР – оптичні активні ретранслятори; ☐ – сонячна батарея відновлювального живлення.

На рис. 2 введено такі позначення: 1 – системний сервер (SS); 2 – комунікаційні станції (ST) естафетного зв'язку; 3 – абонентська станція POPs; 4 – об'єкти моніторингу; 5 – атмосферні оптичні лінії комунікації.

Як компоненти наведених архітектур застосовують сенсорні комп'ютерні мережі, які можна реалізувати у вигляді систолічної та зіркової архітектур (рис. 3), де: S – серсор, МК – мікроконтролер, АС – абонентська станція, ОАР – оптична лінія зв'язку [12].

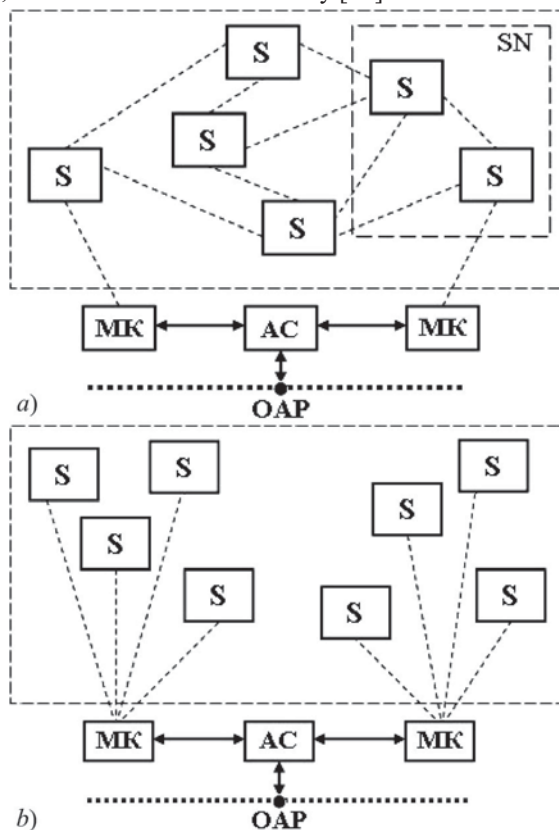


Рис. 3. Безпроводна сенсорна мережа на підставі систолічної (а) та зіркової (b) архітектур / Wireless sensor network based on systolic (a) and star (b) architecture [12]

Перевагою таких архітектур безпроводних сенсорних мереж (БСМ) є високий рівень емерджентності [12]. Водночас, у польових природних умовах застосування таких БСМ на територіях заповідників, наприклад природного заповідника "Горгани" з перепадом висот 700-1700 м н.р.м. [4], найбільш доцільно застосовувати зіркову архітектуру БСМ. Така архітектура істотно спрощує організацію обміну даними та протоколи, які застосовують у систолічних архітектурах. У роботі [10] запропоновано архітектуру системи визначення Хемінгової віддалі між сигналами (рис. 4). Ця структура організована на підставі багатоканального АЦП розгорнутого типу, який містить двійковий лічильник (1), ЦАП (2), компаратор (3), оптичну бісигнальну лінію зв'язку (4), сенсори (5), логічний елемент "Виключне АБО" (6), накопичувальний лічильник (7), вихід (8).

вихідна шина унітарних кодів $H = \{H_i, i = \overline{1, m}\}$; 7 – адресно-каналний модуль, який містить (m) T -тригерів; 8 – друга m -розрядна вихідна інформаційна шина формування адресно-каналних кодів Хаара $U = \{U_i, i = \overline{1, m}\}$; 9 – генератор імпульсів з парафазним виходом; 10 – третя k -розрядна вихідна шина двійкового коду базису Радемахера $a = \{a_j | a_j \in [0, 1], j = \overline{k-1, 0}\}$, 11 – безпроводна лазерна система з бінарно-маніпульованими оптичними сигналами.

Такий моніторинговій системі характерний високий рівень розпаралелення цифрового оброблення просторово-розподілених сенсорів природоохоронних об'єктів, а також мультибазисні виходи у кодах теоретико-числових базисів (ТЧБ): унітарному $[U_i]$, Хаара $[H_i]$ та Радемахера $[R_i]$.

Розширення функціональних можливостей проблемно-орієнтованих FSO. Особливо актуальною проблемою ефективної підтримки характеристик юстування прийомо-передавачів оптичних сигналів FSO є забезпечення високої надійності, стабільної роботи компонент оптичних трактів. Тут під трактом будемо розуміти сукупність обладнання, що приймає, обробляє та передає сигнали одного типу для подальшого їх використання.

Успішне вирішення цього завдання можливе на підставі застосування катафотних перетворювачів оптичних сигналів. Водночас, це практично не застосовують у тиражованих системах FSO відомих фірм, а також не відображено в дослідженнях наукових праць. Досвід застосування катафотів для обміну крипто-захисених оптичних потоків інформації між рухомими об'єктами у галузі наземних, морських і космічних об'єктів визначає перспективу подальшого розроблення таких систем у каналах FSO.

Поверхня комутованої комірки катафота реалізується на підставі тримірної структури світловідбивальних пластин, з'єднаних під кутом 90° . На рис. 8 показано принцип відбивання оптичних сигналів між рухомими джерелами світлових променів і катафотом.

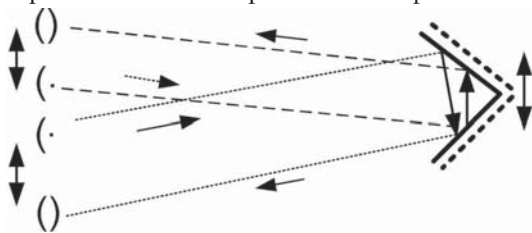


Рис. 8. Реалізація FSO обміну даними між комутованим катафотом та мобільними рухомими об'єктами / Implementation of FSO data exchange between switched cataphoto and mobile moving objects

На рис. 8 введено такі позначення: (\cdot) – джерела світлових сигналів; $(>)$ – рухомий катафот; (\circ) – приймачі відбитих оптичних сигналів; (---) – поверхні модульованих відбитих оптичних сигналів у структурі FSO.

Поверхні не комутованого катафота можна з'єднати з іншими кутами. Такі дослідження наразі практично не відображені у наукових джерелах. Поверхні оптичних комірок комутованого катафота можуть поглинати або відбивати оптичні сигнали згідно з потоком інформаційних повідомлень. Отже, постановка завдання розвитку цієї галузі досліджень полягає у розробленні теоретичних положень та відповідних методів застосування FSO на базі комутованих катафотів.

Перспективною також є практична реалізація структур віддаленого моніторингу оптичних сенсорів на низових рівнях інтерактивних розподілених моніторингових систем (ІПКС). Особливо значущою є успішне вирішення цього завдання за умов застосування FSO в системах моніторингу природоохоронних територій та заповідниках. Такі структури систем віддаленого моніторингу на підставі FSO можуть бути ефективно застосовані в умовах впливу потужних електромагнітних завад, які виникають у складних рельєфах та гірських умовах. При застосуванні запропонованої структури FSO необхідно враховувати двократне поширення оптичних сигналів між мобільним об'єктом та комутованим катафотом, що може підвищувати вплив зовнішніх завад.

Практичною перевагою такої структури FSO є можливість розміщення комутованого катафота на підвищеній поверхні землі або опорі, що дає змогу у паралельному режимі організувати обмін даними з багатьма мобільними об'єктами, віддаленими у просторі на 8-10 км.

Як оптичні сигнали систолично-кільцевої топології SFSO (англ. *Systolic-ring Topology in FSO*) (рис. 9) реалізують мережеву архітектуру обміну даними між мобільними об'єктами згідно з протоколом TokenRing.

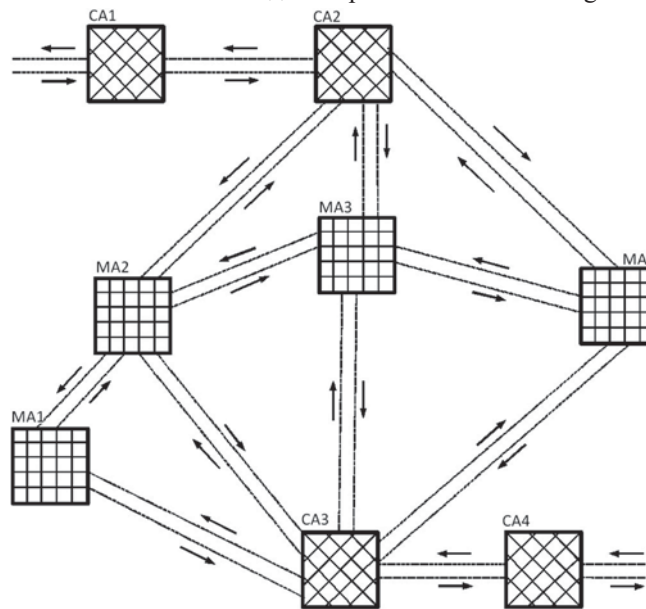


Рис. 9. Систолично-кільцева топологія SFSO інформаційної взаємодії мобільних абонентів / Systolic-annular SFSO topology of information interaction of mobile subscribers

На рис. 9 введено такі позначення: CA1-CA4 – генератори та приймачі оптичних сигналів мобільних об'єктів; MA1-MA4 – комутовані катафоти моніторингових об'єктів SFSO. Ця топологія має багато переваг, зокрема – відсутність юстування прийомо-передавачів, абонентів і катафота, високий рівень розпаралелення передачі та захищеність даних, можливість ретрансляції оптичних сигналів між рухомими об'єктами.

Обговорення результатів дослідження. Наразі відбувається значний прогрес у розробленні методів передавання маніпульованих сигналів і архітектури сенсорних комп'ютерних мереж в галузях моніторингу характеристик біологічних об'єктів і Інтернету речей. Наприклад, у роботах [16, 17] запропоновано метод контролю та діагностування характеристик роботи організмів людей, які займаються спортом, під час їхньої підготовки до участі у змаганнях. Інше дослідження [3] пов'язане з об'єктами нафтовидобувної галузі, які можуть нега-

тивно впливати на навколишнє середовище. Зокрема, в роботі [21] відображено ефективність застосування хмарних технологій при реєстрації результатів спостережень за природоохоронними та енергетичними об'єктами.

У роботі [17] наведено систему моніторингу станів операторів, спортсменів, практично здорових людей та пацієнтів клінік. Запропоновано метод експрес-аналізу моніторингових сигналів на підставі визначення параметрів істотних відліків з використанням статистичних методів оцінювання. Отримані дані є основою для проведення спостережень за станом біооб'єктів за базових та пікових навантажень. Відображено режими роботи біооб'єктів в умовах випадкових факторів впливу. Як наслідок, будь-які дії та поведінка біооб'єктів характеризуються інформаційними образами у вигляді моделей, які відображені у різних формах на підставі обчислених показників. Запропонований підхід на підставі визначеної інформаційної технології дає змогу в режимі реального часу визначати функціональні стани наявних біооб'єктів.

У роботі [16] розглянуто способи підвищення інформаційної ефективності мереж та засобів Інтернету речей. Визначено, що реалізація безпроводних мереж спецпроцесорними засобами є ефективною безпосередньо в місцях виникнення мережеских потоків. Оцінено мінімальні характеристики виконання алгоритмів стиску та захисту моніторингових даних. Доведено, що оптимізація інформаційних потоків досягається шляхом адаптації алгоритмів кодування даних на підставі введення і точності наведення спостережуваних даних та формуванням кодово-сигнальних послідовностей інформаційних пакетів з підвищеною ємністю. Автори стверджують, що параметри передавання криптозахисених пакетів безпосередньо залежать від поточного рівня завад у радіоканалі. Адже швидкість передачі стислої та захищеної моніторингової інформації є базовою характеристикою функціонування систем Інтернету речей. Тут дослідники запропонували враховувати пропускну здатність радіоканалу та забезпечувати постійну підтримку процесорними засобами максимальної швидкості передачі пакетів даних. Практично це відображає передачу радіоканалом псевдохаотичної безбиткової інформації.

У роботі [3] розглянуто базові проблеми застосування протоколу IEEE 802.15.4/ZigBee та функцій кластерного дерева. Автори стверджують, що застосування цього протоколу є оптимальним для реалізації розподілених безпроводних сенсорних мереж (WSN). У видобувній промисловості застосування WSN в більшості наведено кластерним деревом. Визначено, що розроблення гнучких та ефективних засобів зв'язку має важливе значення для ефективної реалізації систем для моніторингу та контролю процесів, пов'язаних з видобутком нафти, газу, корисних копалин. Також відзначено, що віддалений моніторинг квазістаціонарних об'єктів для виявлення передаварійних та аварійних станів на великих територіях є складною задачею, оскільки виникнення аварій у середовищі, що контролюється, може погіршити нормальну роботу мережі. Тому дослідники пропонують механізм динамічної переконфігурації WSN кластерного дерева (DuRET). Такий підхід дає змогу динамічно реконфігурувати великомасштабні WSN дерева кластерів протоколу IEEE 802.15.4 і розподілити комунікаційні ресурси альтернативними напрямками, що

враховують переваження гілок дерева на підставі накопиченого мережевого локального навантаження, створеним кожним із вузлів сенсора. Ефективність запропонованого механізму підтверджена проведенням моделювання, що демонструє необхідний рівень якості обслуговування для динамічної реконфігурації мереж кластерного дерева.

У роботі [21] розглянуто методи ефективного контролю великих та важкодоступних територій з використанням низьковисотних платформних станцій (LAPS). Інтеграція таких платформ та периферійних обчислювальних серверів у сільськогосподарському Інтернеті речей (IoT) дають змогу контролювати необхідні виробничі параметри в режимі реального часу та зменшити затримку та залежність від віддалених хмарних серверів. Дослідники запропонували архітектуру крайових обчислень із підтримкою LAPS для сільськогосподарського IoT, у якій кожне завдання декомпозиційно сегментується на ряд взаємопов'язаних підзадач для опрацювання. Автори сформулювали задачу мінімізації загальної затримки оброблення завдання, враховуючи обмеження, пов'язані з його залежністю та пріоритетом, а також енергоспоживання обладнання. Розроблено алгоритм оброблення завдання з вибором пріоритету для вирішення сформульованої проблеми. Результати демонструють, що запропонована архітектура периферійних обчислень має низку переваг порівняно із традиційною схемою локальних обчислень з погляду загальної затримки оброблення завдань.

У роботі [22] наведено гнучку сенсорну мережу з автономним живленням, призначену для безперервного моніторингу середовища під час вирощування рослин. Автори зазначають, що моніторинг мікроклімату та розвитку культур є важливим компонентом для впровадження технологій IoT розумного сільського господарства. Однак, класичні сенсорні системи з не гнучкою структурою не відповідають вимогам точного землеробства, яке потребує багатопараметричного та високопродуктивного моніторингу. У цьому дослідженні автори інтегрували гнучку сенсорну систему з технологіями низькоенергетичного зв'язку, створивши двошарову сенсорну мережу з топологією "зірка" на підставі протоколів BLE та NB-IoT. Сенсори, розташовані на гнучких підкладках, можуть щільно прилягати до різних частин рослин, таких як стебла і листя. Для забезпечення точності їхньої роботи сенсори проходять оцінку та калібрування в лабораторних умовах. Система збирання сонячної енергії забезпечує автономне живлення мережі сенсорів, що дає змогу стабільно вимірювати температуру, вологість, освітленість і кути нахилу листя, підтверджуючи ефективність роботи системи. Вартість розгортання такої мережі сенсорів значно нижча за вартість традиційних автоматизованих метеостанцій, що свідчить про її потенціал для широкого застосування в сільському господарстві.

У роботі [1] автори запропонували комбіновану нечітко-метаевристичну структуру для моніторингу стану мостів (Bridge Health Monitoring, BHM) з допомогою бездротових сенсорних мереж (WSN) з можливістю перезаряджання, що забезпечена безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Дослідження спрямовані на підвищення стабільності й ефективності мереж моніторингу мостів із врахуванням специфічних характеристик кожного окремого об'єкта. Оскільки мости мають уні-

кальні конструктивні особливості, автори застосували нечітку логіку і метаевристичні алгоритми для адаптивного налаштування конфігурації мережі, що дає змогу забезпечити максимальну продуктивність та енергоефективність системи. Базовими функціями запропонованої структури є динамічне керування топологією мережі, ретрансляція даних та оптимізація процесу перезарядження сенсорних вузлів. Дослідження ефективності запропонованої системи було проведено на трьох об'єктах, отримані результати яких демонструють значне підвищення значення показників продуктивності WSN порівняно з традиційними методами.

У роботі [2] дослідники запропонували енергоефективний протокол для відстеження об'єктів у бездротових сенсорних мережах для забезпечення точного визначення траєкторії рухомого об'єкта, мінімізуючи при цьому споживання енергії, що дає змогу продовжити термін роботи сенсорної мережі. Запропонований протокол використовує фільтр Калмана для оцінювання поточного положення об'єкта та прогнозування його наступного переміщення. У кожному кроці відстеження призначається "лідер" – сенсор, який виконує розрахунки для оцінювання положення та прогнозу шляху об'єкта. Окрім лідера, двоє інших сенсорів, названих "асистентами", допомагають йому в процесі відстеження. Вибір лідера відбувається у два етапи: на початковому етапі, коли ціль з'являється в зоні дії мережі, та на етапі примусової передачі керування (handoff), коли об'єкт виходить за межі досяжності поточного лідера, або коли в нього значно зменшується запас енергії.

Незважаючи на новизну протоколу, його можна розглядати як покращену версію протоколу РРСР. Отримані результати тестування запропонованого протоколу в середовищі Matlab показали, що він забезпечує високу точність відстеження рухомого об'єкта за низького споживання енергії. Порівняльний аналіз підтвердив, що запропонований протокол значно збільшує тривалість роботи мережі завдяки більшій енергоефективності.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розроблено метод побудови розподіленої моніторингової системи на підставі комутованих катафотів, що дало можливість застосовувати такі архітектури в екологічно чутливих зонах.

Практична значущість результатів дослідження – розроблений метод побудови розподіленої моніторингової системи на підставі комутованих катафотів можна використати для передавання даних у важкодоступних природних ландшафтах.

Висновки / Conclusions

Розроблено метод побудови оптичних мереж з використанням комутованих катафотів як каналів обміну даними, що дає можливість забезпечити високу надійність та стабільну роботу компонент оптичних трактів. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Проаналізовано архітектурні рішення, що дають можливість організувати обмін інформаційними повідомленнями в межах природоохоронних об'єктів. Визначено перспективні напрями передачі даних між комутованим катафотом та мобільними рухомими об'єктами, віддаленими у просторі. Наведено системо-кільцеву

топологію SFSSO в умовах обмеженого застосування електромагнітних полів.

2. З'ясовано, що заявлена організація передавання даних на підставі використання комутованих катафотів забезпечує надійне передавання на відстані 8-10 км. Це є достатнім для оцінювання потрібних показників у природних ландшафтах. Розроблена архітектура забезпечує обмін даними на складних ділянках природних заповідників.

References

1. Fanian, F., Rafsanjani, M. K., & Shokouhifar, M. (2024). Combined fuzzy-metaheuristic framework for bridge health monitoring using UAV-enabled rechargeable wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112429>
2. Khiadani, N., & Hendessi, F. (2024). An Energy Efficient Prediction Based Protocol for Target Tracking in Wireless Sensor Networks. *Ad Hoc Networks*, article ID 103688. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103688>
3. Lino, M., Leão, E., Soares, A., Montez, C., Vasques, F., & Moraes, R. (2020). Dynamic Reconfiguration of Cluster-Tree Wireless Sensor Networks to Handle Communication Overloads in Disaster-Related Situations. *Sensors* 2020, 20(17). <https://doi.org/10.3390/s20174707>
4. Nikolaychuk, Y. M., Petrushchak, Ya. V., Pitukh, I. R., Hrynychyn, T. M., Golynskiy, Ya. I., Nikolaychuk, L. M., & Gryga, V. M. (2021). Legal status and concept of development of the computerized infrastructure of background monitoring of the ecosystem of the nature reserve "Gorgany". *Collection of materials of the problem-scientific interdisciplinary conference ISCM-2021*, 101–113.
5. Nikolaychuk, Ya., Grynchychyn, T., Pitukh, I., Petrashchuk, Ya., Nikolaychuk, L., & Hryha, V. (2021). Promising Developments in Cyber Physical System Tools for Background Monitoring of Reserve Landscape. 2021 *11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany, 2021*, 686–690. <https://doi.org/10.1109/ACIT52158.2021.9548584>
6. Patent 144938 Ukraine IPC. (2006). H04B 10/00, Method of bisignal transmission of optical signals. Hrynychyn, T. M., Nikolaychuk, Y. M., Hryga, V. M. No. u202001636, application 10.03.2020; published 10.11.2020, Bull. No. 21. URL: <https://iprop-ua.com/inv/0xjio89i/>
7. Patent 147833 Ukraine IPC (2013). H04B 10/112, Multilevel star-ring optical network. Grynchychyn, T. M., Nikolaichuk, L. M., Petrashchuk, Y. V., Griga, V. M., Pitukh, I. R. No. u202007792; statement 07.12.2020; published 16.06.2021 Bull. No. 24. URL: <https://iprop-ua.com/inv/k4v8bqpx/>
8. Patent 149103 Ukraine IPC. (2006). H04B 10/00, Method of bisignal transmission of optical signals. Hrynychyn, T. M., Yatskiv, V. V. No. u202008521; statement 31.12.2020; published 22/10/2021 Bull. No. 21. URL: <https://iprop-ua.com/inv/g6fyax64/>
9. Patent 150865 Ukraine IPC H04B 10/112. (2013). Multi-sensor system for measuring snow cover height. Nikolaychuk, Y. M., Petrashchuk, Y. V., Pitukh, I. R., Hrynychyn, T. M., Golynskiy, Y. I., Griga, V. M., No. u202104202; statement 07.19.2021; published 05/05/2022 Bull. No. 18. URL: <https://iprop-ua.com/inv/ps5bnx3v/>
10. Patent 150887 Ukraine IPC. (2022). H04B 10/00 H04B 10/112 (2013.01), Multi-channel device for determining the Hamming distance between signals. Nikolaychuk, Y. M., Pitukh, I. R., Gryga, V. M., Grynchychyn, T. M., Uhorchuk, V. V., Sydor, A. I. No. u202105962; statement 23.10.2021; published 05/05/2022 Bull. No. 18. URL: <https://iprop-ua.com/inv/jiyrvzu3/>
11. Petrashchuk, Ya. V., Nikolaychuk, L. M., Slobodian, O. M., Golynskiy, Ya. I., Grynchychyn, T. M., Nikolaychuk, Y. M., Pitukh, I. R., & Gryga, V. M. (2020). Status and information problems of background monitoring of the ecosystem of the nature reserve "Gorgany". *Collection of materials of the problem-scientific interdisciplinary conference ICSM-2020*, 95–106.

12. Pitukh, I. R. (2021). Method and criteria for assessing the emergency and characteristics of architectures of interactive distributed computer and cyberphysical systems. Scientific collection. *Physico-mathematical modeling and information technologies*, 33, 115–121. <https://doi.org/10.15407/fmmit2021.33.115>
13. Pitukh, I. R., Davletova, A. Ya., & Grynchysyn, T. M. (2024). Methods of building sensor networks with wireless binary-optical information flows. *Computer modeling and software of information systems and technologies (KMPZ_2024)*. Lviv: LNU named after Ivan Franko, 177–181.
14. Ranasinghe, V., Udara, N., Mathotaarachchi, M., Thenuwara, T., Dias, D., Prasanna, R., Edirisinghe, S., Gayan, S., Holden, C., & Punchihewa, A. (2024). Rapid and Resilient LoRa Leap: A Novel Multi-Hop Architecture for Decentralised Earthquake Early Warning Systems. *Sensors* 2024, 24. <https://doi.org/10.3390/s24185960>
15. Romanov, V. O., Galelyuka, I. B., Hrusha, V. M., et al. (2023). Wireless Sensor Networks for Digital Agriculture, Environmental Protection, and Healthcare. *Cybern Syst Anal*, 59, 1023–1030. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00638-3>
16. Shevchuk, B. (2019). Increasing the information efficiency of networks and means of the Internet of Things. *Mathematical and computer modeling. Series: Technical Sciences*, 138–144. <https://doi.org/10.32626/2308-5916.2019-19.138-144>
17. Shevchuk, B. (2023). Express analysis of biomedical signals in the process of long-term monitoring of the functional states of biological objects. *Physico-mathematical modeling and information technologies*, 37, 149_153-149_153. <https://doi.org/10.15407/10.15407/fmmit2023.37.149>
18. Skorobohatko, S., Fesenko, H., Kharchenko, V., et al. (2024). Architecture and Reliability Models of Hybrid Sensor Networks for Environmental and Emergency Monitoring Systems. *Cybern Syst Anal* 60, 293–304. <https://doi.org/10.1007/s10559-024-00670-x>
19. Teixeira, R. C. M., Carvalho, C. B., Calafate, C. T., Mota, E., Fernandes, R. A., Printes, A. L., & Nascimento, L. B. F. (2024). FloatingBlue: A Delay Tolerant Networks-Enabled Internet of Things Architecture for Remote Areas Combining Data Mules and Low Power Communications. *Sensors* 2024, 24(1)9. <https://doi.org/10.3390/s24196218>
20. Wang, P., & Xiong, Y. (2024). A Method to Optimize Deployment of Directional Sensors for Coverage Enhancement in the Sensing Layer of IoT. *Future Internet*. 2024, 16(8), 302. <https://doi.org/10.3390/fi16080302>
21. Yang, D., Wu, J., & He, Y. (2024). Optimizing the Agricultural Internet of Things (IoT) with Edge Computing and Low-Altitude Platform Stations. *Sensors* 2024, 24(21). <https://doi.org/10.3390/s24217094>
22. Yi Zheng, Ling-Xiao Cao, Jin-Ran Lv, Hao-Yu Wen, Lu-Xia Mao, Xi-Qing Wang, & Zhi-Zhu He. (2025). Self-powered flexible sensor network for continuous monitoring of crop micro-environment and growth states. *Measurement*, Vol. 242, Part C. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116002>
23. Zhang, S., Yu, M., Chen, H., Zhang, M., Tan, K., Chen, X., Wang, H., & Xu, F. (2024). Three-Dimensional Geometric-Physical Modeling of an Environment with an In-House-Developed Multi-Sensor Robotic System. *Remote Sensing* 2024, 16, article ID 3897. <https://doi.org/10.3390/rs16203897>
24. Zheng, Yi, Cao, Ling-Xiao, Lv, Jin-Ran, Mao, Lu-Xia, Wang, Xi-Qing, He, & Zhi-Zhu. (2024). Self-powered flexible sensor network for continuous monitoring of crop micro-environment and growth states. *Measurement*, 24 p. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116002>

I. R. Pitukh¹, T. M. Grynchysyn², A. Ya. Davletova¹

¹ West Ukrainian Nationally University, Ternopil, Ukraine

² VSP "Nadvirnya Vocational College" NTU, Nadvirnya, Ukraine

METHODS AND MEANS OF BUILDING DISTRIBUTED MONITORING SYSTEMS USING MANIPULATED OPTICAL SIGNALS

Objects within conservation complexes are found to require the application of information transmission lines with limited electromagnetic influence. The research focuses on developing methods and tools for information transmission in interactive monitoring systems for conservation sites based on switched retroreflectors. In the course of research, key architectural solutions for distributed computer systems, which ensure reliable data exchange in complex terrain with restricted electromagnetic field use, have been considered. It has also been established that such sites are highly sensitive to these influences, as they negatively affect both fauna and flora. Using optical networks based on switched retroreflectors and binary-carry modulated optical signals are found to allow for minimizing the impact of electromagnetic radiation on the ecosystem while providing high-speed and reliable data transmission. We have proposed an approach for constructing optical networks that use retroreflectors as light signal reflectors for long-distance information transmission, enhancing reliability at the same time. The impact of electromagnetic fields on environmental ecology within the context of traditional telecommunication systems has been assessed, and the need for developing new network construction methods that account for these factors has been justified. The study also explores the potential for applying star-ring and systolic topologies for efficient processing and transmission of signals from sensor networks within nature reserves. The advantages of using switched retroreflectors over traditional optical systems have been analyzed, particularly their ability to ensure high data transmission reliability under challenging weather conditions. The prospects for developing information encoding methods using binary-carry modulated optical signals, which improve the accuracy and reliability of information transmission in environmentally sensitive areas, have been investigated. Based on the research, recommendations for the further development and implementation of optical networks using these technologies in areas where reducing electromagnetic impact is critical have been proposed. The results obtained indicate that using switched retroreflectors significantly enhances the stability of monitoring systems in conservation areas. The proposed methods for constructing distributed optical signal networks can be implemented for remote monitoring of natural objects, providing reliable and secure data transmission over distances up to 10 km, which is particularly important for preserving the ecological balance in reserves.

Keywords: sensor networks; electromagnetic impact; Hamming distance; shared access memory; wireless data transmission.