

Жук Олександр Володимирович (доктор технічних наук, професор)

Машталір Вадим Віталійович (доктор історичних наук, професор)

Грозовський Роман Іванович (кандидат військових наук)

Чекан Андрій Юрійович

Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗДРОТОВИМИ СЕНСОРНИМИ МЕРЕЖАМИ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Відмінною рисою розвитку сучасної системи зв'язку і автоматизації управління Збройних Сил України під час відбиття збройної агресії, є тенденція до переоснащення та модернізації військ (сил) новітніми високотехнологічними засобами зв'язку, зокрема, бездротовими системами. Складовими таких систем можуть бути бездротові сенсорні мережі, що здатні забезпечувати моніторинг, збирання даних та передачу інформації. Проте складність, обмежені ресурси, різні типи трафіка, ненадійність і обмеженість ресурсу та необхідність динамічного налаштування під змінні умови потребують створення ефективної моделі управління з підтримкою безпеки на потрібному рівні. Метою статті є удосконалення функціональної моделі системи управління бездротовими сенсорними мережами для забезпечення оптимального використання ресурсів, адаптивності до змін умов експлуатації, високої надійності й безпеки функціонування. Удосконалення зазначеної моделі здійснюється завдяки додавання підсистеми управління безпекою до складу системи оперативного управління мережею. Удосконалена модель передбачає структурування системи на рівні, зокрема: рівень сенсорів, рівень обробки даних та рівень передачі інформації, й складається з підсистем. Визначено такі ключові компоненти та процеси, як управління енергоспоживанням, балансування навантаження, адаптивна маршрутизація, забезпечення безпеки. Модель підтримує гнучкість у налаштуванні мережі, що дає змогу адаптуватися до змін у структурі чи умовах експлуатації. Відмінність наведеної моделі від існуючих, що визначає її новизну зводиться до застосування нової множини метрик пошуку маршруту. До цих метрик належать: тип переданого трафіка, залишкова ємність батарей вузлів, енергія, необхідна для передачі та обмеження на пропускну спроможність радіоканалів. Крім того, модель використовує вдосконалені правила вибору маршруту, що дає змогу зменшити витрати енергії, а тим самим підвищити тривалість функціонування бездротової сенсорної мережі. Впровадження функціональної моделі системи управління бездротовими сенсорними мережами дасть змогу створити адаптивну розподілену архітектуру побудови безпроводних сенсорних мереж із можливістю самоорганізації мережі та підвищити ефективність функціонування безпроводної сенсорної мережі в цілому шляхом збільшення тривалості функціонування мережі за умови виконання вимог до інформаційного обміну. У перспективі дослідження передбачає інтеграцію запропонованої моделі з хмарними платформами для забезпечення масштабованості та підвищення обчислювальної ефективності.

Ключові слова: бездротові сенсорні мережі, функціональна модель управління, моніторинг, телекомунікації, підсистема управління безпекою.

Вступ

Попри значний прогрес у розвитку технологій бездротових сенсорних мереж, залишаються нерозв'язаними завдання інтегрованого управління мережею, що враховує обмежені ресурси сенсорних вузлів, їхню високу залежність від змін середовища, а також потреба підтримання високого рівня безпеки й надійності. Елементи бездротових мереж військового призначення мають швидко адаптуватися до частих змін топології мережі, напрямків зв'язку і трафіка, зон спостереження сенсорів та ефективно використовувати наявні обмежені ресурси. В таких умовах забезпечити

інформаційний обмін та її моніторинг із заданою якістю неможливо без ефективної системи управління бездротовими сенсорними мережами (далі – БСМ). БСМ є розподіленою системою, що самоорганізується та складається з датчиків (сенсорів) і пристроїв виконання, об'єднаних між собою бездротовим зв'язком [1]. Конкретна реалізація системи управління мережі має враховувати її призначення та особливості архітектури (розмірність, мобільність, продуктивність, тип покриття, особливості об'єктів моніторингу й ін.) та умов функціонування. Водночас існують вагомні труднощі створення

мереж військового призначення, що зводяться до потреби вирішення наукових проблем, пов'язаних із управлінням бездротовими мережами (управління покриттям, управління топологією, управління маршрутизацією, управління витратами енергії тощо) за наявних обмежених ресурсів вузлів (за ємністю пам'яті, продуктивністю процесора, енергоємністю батареї).

Постановка проблеми. Основним завданням БСМ вважається покриття зон спостереження, моніторинг (виявлення й ідентифікація) об'єктів спостереження та передача отриманої інформації користувачам через шлюзи, а ефективність і тривалість функціонування таких мереж залежить від взаємодії в підсистемі аналізу і прийняття рішень [1]. Крім того, вузли (сенсори) мають швидко адаптуватися до змін топології мережі, зон спостереження і трафіка та ефективно використовувати обмежені ресурси. В таких умовах забезпечити моніторинг та інформаційний обмін із потрібною якістю неможливо без ефективної системи управління мережею [2].

Тому координація підсистеми моніторингу з підсистемою телекомунікаціями та забезпечення безпечного функціонування є важливим завданням під час створення (побудови) бездротових мереж військового призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні роки стали періодом інтенсивних досліджень за напрямом впровадження сенсорних мереж. Науковці зосереджуються на вирішенні низки проблем, пов'язаних з енергоефективністю, масштабованістю сенсорних мереж, які охоплюють майже всі сфери людської діяльності [3–5]. Так, у статті [1] наведено призначення й основні характеристики сенсорних систем спеціального призначення, особливості їх функціонування, розроблено рекомендації щодо впровадження таких систем у воєнній сфері.

У наукових публікаціях [6; 7] розглядаються перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж, наведена їх класифікація та вимоги до них. Наведена функціональна модель системи управління сенсорною мережею. З огляду на особливості функціонування бездротових мереж у статті [8] розглядається сенсорна мережа із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища. Слід зазначити, що проблематиці використання систем безпеки у наведених публікаціях не надавалося належної уваги.

Враховуючи аналіз досліджень та наукових публікацій стосовно бездротових сенсорних мереж у статті пропонується до розгляду удосконалена функціональна модель управління бездротовими сенсорними мережами військового призначення. Удосконалення зазначеної моделі здійснюється за рахунок додавання підсистеми управління безпекою до складу системи оперативного управління мережею.

Метою статті є удосконалення функціональної моделі системи управління бездротовими

сенсорними мережами для забезпечення оптимального використання ресурсів, адаптивності до змін умов експлуатації, високої надійності й безпеки функціонування.

Виклад основного матеріалу дослідження

Управління бездротовими сенсорними мережами є складним процесом, що вимагає комплексного виконання завдань за етапами [6]:

планування. Здійснюється командиром відповідної ланки управління та передбачає, виходячи із прогнозованої обстановки та наявних ресурсів, визначення: районів покриття мережею; способів встановлення та доставки (постановки) сенсорів (датчиків), вузлів-шлюзів; способів збору та доставки інформації моніторингу;

розгортання. Зводиться до розташування на місцевості (встановлення або розкидання) сенсорів засобами доставки, переміщення стаціонарних або рухомих сенсорних вузлів;

оперативного управління. За прийнятими критеріями ефективності постійно оцінюється стан сенсорної мережі й здійснюються заходи (відповідно до плану та реальної обстановки) з підтримання її показників ефективності функціонування в заданих межах або здійснюється їх оптимізація.

Завдання оперативного управління, на відміну від планування, виконуються змішаним способом (централізовано/децентралізовано) у режимі реального часу, а за змістом може багаторазово повторюватися.

Процес оперативного управління доцільно навести як сукупність моніторингу та телекомунікацій в мережі (передавання інформації зі зворотнім зв'язком):

$$U^*(t) = \{ U_{\text{мон}}(t) / U_{\text{тел}}(t) \}, \quad (1)$$

де $U_{\text{мон}}(t)$ – функція, що описує процес моніторингу;

$U_{\text{тел}}(t)$ – функція, що описує процес передавання інформації (телекомунікацій).

Управління моніторингом має такі складові:

$$U_{\text{мон}}(t) = \{ U^{\text{роз}}, U^{\text{лок}}, U^{\text{спост}} \}, \quad (2)$$

де $U^{\text{роз}}$ – функція, що описує процес управління розміщенням (збір інформації про можливі об'єкти спостереження, визначення методів розміщення вузлів, вибір типу сенсорних вузлів з урахуванням їх параметрів та середовища моніторингу, типу організації сенсорної мережі тощо);

$U^{\text{лок}}$ – функція, що описує процес управління покриттям (визначення його типу (покриття цілі (точки), покриття площі (зони, сектора), бар'єрне покриття), вибір моделі покриття залежно від ступеня та коефіцієнта покриття);

$U^{\text{спост}}$ – функція, що описує процес управління спостереженням (розрахунок сесій спостереження сенсорами та мережевої зв'язності).

Процес управління телекомунікаціями має такі складові:

$$U_{\text{мон}}(t) = \{ U^{\text{зб}}, U^{\text{ан}}, U^{\text{вц}}, U^{\text{рр}} \}, \quad (3)$$

де $U^{\text{зб}}$ – збір інформації про стан мережі (рішення про об'єм, частоту, глибину та способи збору інформації потрібно приймати на наступних етапах);

$U^{\text{ан}}$ – аналіз отриманої інформації про стан мережі, а саме: ідентифікація ситуації в мережі, перевірка виконання мережею своїх функцій та визначення потреби стосовно управляючого впливу;

$U^{\text{вц}}$ – виявлення цілі управління з подальшою деталізацією її на підцілі й вироблення подальшого рішення (вибір протоколу доступу, методу спостереження та передачі, а також способу розсилки службової інформації тощо);

$U^{\text{рр}}$ – реалізація рішення (встановлення потужності передачі, визначення способу моніторингу, резервування ресурсу, розсилка службових повідомлень).

Виходячи з призначення та завдань системи управління БСМ та етапів їх виконання наведемо основні принципи функціонування таких мереж.

Принцип адаптивного управління. Внаслідок значної початкової невизначеності мережі (обумовлена інерційністю контролю стану мережі та її ідентифікації), а також невизначеністю стану зовнішнього середовища оперативне управління має бути адаптивним.

Принцип функціональності управління. Об'єднання функцій системи управління у відносно незалежні групи дає змогу здійснити декомпозицію управління мережею на підсистеми, що значно спрощує задачу розроблення математичного забезпечення управління:

збір службової інформації про стан мережі для кожної з підсистем;

прийняття рішень стосовно управління покриттям, топологією мережі, побудовою та підтримкою маршрутів, витратами енергоресурсу вузлів, моніторингом, радіоресурсом, навантаженням, безпекою тощо;

реалізація прийнятих рішень для всіх підсистем.

Принцип ієрархічності управління. Функціональну структуру системи управління можна навести як ієрархічну структуру з вертикальними зв'язками, які визначають підпорядкованість завдань, що виконуються:

на нижньому рівні – управління сенсорним вузлом мережі;

на верхньому – управління всією мережею.

Принцип координації та взаємодії. Внаслідок децентралізованого управління виконання завдань управління передбачає взаємодію між вузлами за цілями, функціями управління, розподілом ресурсів тощо.

Принцип оптимальності управління. Якість управління визначається двома властивостями: обґрунтованістю та своєчасністю управляючих

впливів. Оптимальне управління є компромісом між оперативністю та обґрунтованістю управляючих впливів, що є однією із найбільш складних задач, які належить розв'язати при побудові системи управління мережею.

Принцип автоматизації та інтелектуалізації процесів управління. Реалізація цього принципу передбачає мінімізацію участі людини у процесі управління мережами військового призначення.

За способом реалізації частина завдань оперативного управління виконується ізольовано (окремим вузлом, наприклад, сенсором-шлюзом), а більша частина – спільно, завдяки використанню сукупності вузлів (наприклад, маршрутизація інформаційних повідомлень тощо).

За охопленням завдання управління розподіляються на управління функціонуванням всієї сенсорної мережі (її зони) або процесом передачі інформації за напрямком між виділеними сенсорними вузлами.

За видом постановки та математичному апарату, що використовується завдання розподіляються на завдання розміщення мережі, розподілу ресурсів, планування розкладу роботи, розв'язання маршрутних задач тощо.

За результатами аналізу наведених етапів управління та принципів функціонування БСМ розглянемо функціональну модель системи управління бездротової сенсорної мережі військового призначення.

Ефективність і тривалість функціонування БСМ залежить від взаємодії між методами управління процесами моніторингу та методами управління телекомунікаціями в мережі [9]. Тому виникає додаткове завдання щодо організації спільного функціонування підсистем моніторингу (розгортання, покриття, ідентифікація об'єктів, оцінювання якості моніторингу) та телекомунікаційної складової мережі (управління топологією, маршрутами (напрямами) передачі інформації (даних), радіочастотним ресурсом, якістю обслуговування під час передавання).

Об'єднання функцій системи управління у відносно незалежні групи дає змогу здійснити декомпозицію управління мережею на підсистеми: збору та зберігання службової інформації про стан мережі; аналізу та прийняття рішень управління процесами моніторингу та телекомунікацій, витратами енергоресурсу вузлів, інтеграції і координації; реалізації прийнятих рішень.

З урахуванням наведених вище підходів щодо функціонування БСМ військового призначення, а також завдань оперативного управління мережею пропонується удосконалювати систему управління за принципом адаптації до умов функціонування та забезпечувати потрібну якість обслуговування за послідовностями виконання функцій управління: покриття, моніторинг і передача даних з урахуванням ресурсних обмежень та забезпечення відповідного рівня безпеки мережі [6; 10].

Основними проблемами реалізації такого підходу є визначення цільових функцій і

параметрів координації між підсистемою телекомунікацій (за функціями і рівнями моделі взаємодії відкритих систем OSI (англ. Open Systems Interconnection) і підсистемою моніторингу та

визначення методів прийняття рішення, що дають змогу отримати мережеву (зонову) оптимізацію процесу управління мережею (рис. 1).



Рисунок 1 – Функціональна модель системи оперативного управління мережею

Розглянемо призначення складових системи управління мережею, наведених на рис. 1.

Підсистема управління розгортанням здійснює планування застосування БСМ і розміщення вузлів в зоні спостереження.

Підсистема управління покриттям визначає: тип покриття (покриття цілі (точки), покриття площі (зони, сектора), бар'єрне покриття, к-покриття, α -покриття), розраховує ступінь та коефіцієнт покриття [11].

Підсистема управління якістю моніторингу та ідентифікації об'єктів здійснює розрахунок сесій спостереження, визначає тип порушника та його характеристики.

Підсистема координації та інтелектуалізації здійснює оптимізацію показників ефективності на кожному рівні моделі OSI при різних умовах функціонування мережі та вимогам до якості моніторингу і конкретного типу трафіка (дані, мова, відео).

Підсистема управління топологією буде та підтримує топологію БСМ відповідно до цільових функцій управління та наявних ресурсів мережі. Топологія визначає потенційні можливості сенсорної мережі зі спостереження та доставки інформації моніторингу базовим станціям [12].

Підсистема управління маршрутизацією забезпечує побудову та підтримку маршрутів

передачі із заданою якістю за умови виконання вимог до їх функціонування, типу трафіка, цільових функцій управління [13].

Підсистема управління ресурсом розподіляє часовий, просторовий, частотний та кодовий ресурси для забезпечення інформаційного обміну між сусідніми вузлами [14].

Підсистема управління навантаженням працює на транспортному (управління швидкістю передачі та управління чергами в вузлах) та мережевому рівні (підсистема маршрутизації).

Підсистема управління якістю обслуговування має забезпечувати передачу певних класів трафіка з заданою якістю обслуговування QoS (англ. Quality of Service), наприклад передачу відеозображення поля бою [15].

Підсистема управління безпекою призначена для попередження, виявлення та подавлення вторгнень (атак) противника.

Підсистема управління витратами енергоресурсу вузлів має мінімізувати енергію, що споживається елементами мережі [5]. Управління витратами енергоресурсу може бути реалізовано за різними функціями управління і рівнями моделі OSI завдяки використанню способів управління потужністю передачі і збереження енергії елементів живлення.

Загальний порядок побудови системи

управління слід вважати таким:

на першому етапі будеться покриття території певного типу (площа, бартер, ціль) та вибирається спосіб покриття (κ -покриття, α -покриття);

на другому етапі здійснюється побудова топології та маршрутів передачі, що реалізує скоординовану цільову функцію управління.

В умовах змішаного управління (частина функцій виконується центром управління – шлюзом) БСМ, а друга децентралізовано – вузлами) можна визначити дві взаємозалежні групи цілей:

мережеві (зонові) – оптимізація мережевих або зонових показників ефективності центром управління БСМ;

користувальницькі – досягнення заданої якості моніторингу і передачі отриманої інформації та функціонування елементів мережі за напрямком передачі при децентралізованому управлінні.

До мережевих (зонових) цілей управління слід віднести оптимальні параметри:

$$C_i = \{ C_1, \dots, C_8 \}, \quad (4)$$

де C_1 – час планування, розгортання, відновлення мережі, її зони;

C_2 – якість покриття площі (зони, сектору) сенсорною мережею;

C_3 – якість моніторингу;

C_4 – якість передачі даних від вузла до шлюзу;

C_5 – зв'язність мережі, її зони;

C_6 – тривалість функціонування мережі, її зони;

C_7 – продуктивність всієї мережі, її зони;

C_8 – обсяг службового трафіку.

В умовах гібридного управління та наявності суперечностей між оптимальною інформованістю керуючого об'єкта і своєчасністю керуючих впливів (цілей, зон спостереження) неможливо досягти глобальної оптимізації. Тому потрібно здійснювати локальну оптимізацію в межах окремого вузла (зони моніторингу, радіоканалу, маршруту тощо). Тому основну мету мережею доцільно декомпонувати на такі складові управління: покриттям, моніторингом, побудовою топології для забезпечення визначеного типу покриття, маршрутизацією та передачею інформації між парою відправник – шлюз із заданою якістю за умови прагнення мінімізувати витрати мережевих (зонових) ресурсів на її здійснення або досягнення сприятливих умов для виконання цілей управління інших елементів мережі.

Непередбачуваність умов функціонування мережі, гібридний принцип (централізований, децентралізований) управління ними та наявність різних типів інформації для передачі (дані, відео) вимагає від системи управління кожного вузла здійснювати вибір цільових функцій управління з урахуванням:

стану вузла, що визначається множиною його параметрів (розміри зони моніторингу, дальність моніторингу, дальність радіозв'язку, наявні сусіди,

мобільність, динаміка зміни наявних зв'язків з сусідами, наявність, кількість та якість побудованих маршрутів, наявність, тип та величина зміни вхідного навантаження тощо);

стану мережі, що визначається станом сенсорних вузлів (датчиків), каналів, інформаційних напрямків і зон БСМ та динаміка її змін;

типу інформації (трафіку), що визначає вимоги до якості передачі (час затримки передачі та його варіація, кількість помилок, ширина смуги пропускання, тощо).

Слід зазначити, що вузол постійно збирає інформацію про параметри свого функціонування та здійснює ідентифікацію власного стану. Крім того, вузол має отримувати (активно або/та пасивно) інформацію про стан вузлів – сусідів, маршрути і напрямки передачі, мережу (зону) та за сукупністю показників визначати (ідентифікувати) стан мережі. Водночас, ресурсами вузла є апаратні (чутливість сенсорного модулю, наявний обсяг енергії елементу живлення, швидкодія процесорів, потужність передавача тощо) та програмні ресурси (алгоритми управління, протоколи управління на різних рівнях OSI та функціональних підсистемах).

Система прийняття рішення на основі ідентифікованих станів вузлів та мережі в цілому, а також на підставі вимог до якості покриття та інформаційного обміну, виконує такі функції:

визначає поточну множину параметрів оптимізації – мережевих та користувальницьких;

визначає об'єкти управління;

визначає поточну цільову функцію (функції) управління;

узгоджує (координує) цільову функцію з сусідніми вузлами (якщо вузли одного рангу) або призначає її підпорядкованим вузлам (якщо це центр управління мережею, або головний вузол зони БСМ);

вибирає управляючий вплив за етапами, охопленням, функціональною підсистемою, рівнем OSI.

Слід зазначити, що управління навантаженням у телекомунікаційних мережах на транспортному рівні моделі OSI може відрізнятися за місцем управління і властивостями. Методи управління класифікуються за такими ознаками:

за кількістю швидкостей передачі, що підтримуються: багатшвидкісні (з можливістю переходу на нижчі швидкості передачі у разі виявлення перевантаження), одношвидкісні (без можливості переходу на інші швидкості);

за кількістю маршрутів: одномаршрутні (дані передаються одним маршрутом), багатомаршрутні (дані передаються кількома різними маршрутами);

за функціонуванням на рівні моделі OSI: однорівневі, багаторівневі або міжрівневі;

за класом обслуговування: максимальних зусиль (Best effort), гарантована передача (Assured forwarding); термінова передача (Expedited forwarding);

за місцем управління: у вузлах мережі, з кінця в кінець.

Через різні умови функціонування провідних та бездротових мереж, застосування однакових протоколів управління навантаженням в таких мережах неможливе. Зазначеному сприяє низка причин: починаючи від відмінностей у роботі вузлів (сенсорів) різних типів і закінчуючи архітектурою мережі та принципами її функціонування, що визначаються механізмами фізичного, каналного, мережевого та транспортного рівнів.

Для визначення здатності мережі відповідати заданим вимогам, як правило, використовується задана якість QoS, що характеризує здатність мережі виконувати поставлені завдання. У класичних мережах параметрами, за якими оцінюється якість, може бути смуга пропускання, затримка під час передачі пакетів, джиттер, а також ймовірність доставки пакета. Бездротові сенсорні мережі виконують завдання стосовно покриття, моніторингу, обробки та передачі даних у заданих умовах, тому якість обслуговування в таких мережах та її показники також будуть відрізнятися від класичного уявлення.

Методи забезпечення якості обслуговування QoS звичайних бездротових мереж можна розділити на три основні групи, а саме методи: використання каналних ресурсів; розподілення мережевих ресурсів; засновані на зворотному зв'язку між джерелом і приймачем.

Перша група методів використовує засоби, що збільшують пропускну здатність фізичних каналів, зокрема, через застосування високошвидкісного середовища передачі або поліпшення характеристик сигналів. Забезпечення потрібного рівня QoS виконується завдяки роботі користувачів у малонавантажених мережах.

Розроблення методів розподілення мережевих ресурсів обумовлено потребою отримання якісних послуг в умовах, коли передача інформації обмежена нестачею пропускну спроможності мережевих каналів. Зазначені методи інтерпретуються як методи управління ресурсами або методи боротьби з перенавантаженням мережі. Методи другої групи дають змогу розподіляти мережеві ресурси під час обслуговування вузлів (сенсорів) залежно від наявних джерел.

Методи, що використовують зворотній зв'язок між джерелом і приймачем спрямовані на підвищення продуктивності мереж передачі даних.

Також зворотній зв'язок між джерелом і приймачем доцільно використовувати під час управління інтенсивністю відправки підтверджень про отримання повідомлень (даних). У випадку наявності великих пауз між прийомом пакетів адресатами, то для спрощення процесу відправки джерелом нових пакетів рекомендується здійснювати негайне підтвердження успішно отриманих даних іншою стороною. За високої інтенсивності отримання даних приймачем доцільно відправляти одне підтвердження про отримання групи пакетів, що зменшує навантаженість службового трафіку квитанцій у

мережі. В умовах двостороннього обміну даними між джерелом і приймачем підтвердження успішної доставки пакетів слід відправляти разом із переданими даними. У БСМ застосовують дві моделі забезпечення QoS щодо передачі даних: координаційну багаторівневу; координаційну крос-рівневу.

Для забезпечення потрібної QoS сенсорної мережі потрібно враховувати основні функції системи управління мережею (покриття, моніторинг, управління топологією, побудова і підтримка маршрутів). Для узгодження та координації рівнів моделі передачі даних та функцій системи управління БСМ доцільно вводити крос-рівневу надбудову над рівнями OSI.

QoS-методи управління для динамічної або статичної природи БСМ, з урахуванням заданих вимог, потребує окремого розв'язання низки задач для більшості рівнів еталонної моделі OSI з координацією їх роботи під керуванням системою управління, що буде реалізована в кожному вузлі мережі. Задана якість обслуговування в БСМ має здійснюватися за функціями з їхньою реалізацією на всіх рівнях OSI під управлінням виділеної QoS-підсистеми, основними елементами якої є база методів управління за рівнями еталонної моделі та підсистема прийняття QoS-рішень, що містить знання про мету управління і методи її досягнення, а також базу моделей ресурсів мережі.

Важливим завданням БСМ є управління безпекою мережі. Ця підсистема конструктивно складається з системи виявлення вторгнень (далі – СВВ) для внутрішньої вузлової безпеки і системи криптографічного захисту для зовнішньої безпеки. Система виявлення вторгнень містить програмні та програмно-апаратні технічні засоби, що мають реалізовувати функції автоматизованого виявлення в радіомережах дій, спрямованих на навмисний несанкціонований доступ до інформації, а також спеціальних впливів на інформацію з метою її добування, знищення, перекручення або блокування. Класифікація систем виявлення вторгнень наведена на рис 2.

Оскільки для БСМ військового призначення існує ймовірність захоплення противником сенсорного вузла, то метою несанкціонованого доступу до нього може бути приховане управління вузловими (мережевими) ресурсами, а також неавторизований вплив на програмні та апаратні засоби мережі.

З урахуванням особливостей функціонування БСМ перспективним підходом до побудови СВВ для внутрішньої вузлової безпеки є використання багатоагентних систем, що дає змогу суттєво підвищити ефективність захисту інформації. Елементи багатоагентної СВВ, що також отримали назву «агенти захисту» є інтелектуальними автономними програмами, що реалізують визначені функції захисту для забезпечення потрібного класу захищеності [8].



Рисунок 2 – Класифікація систем виявлення вторгнень

Вони дають змогу реалізувати комплексну надбудову над механізмами безпеки мережевих програмних засобів, що використовуються, операційних систем і прикладних процесів, що

підвищує захищеність системи управління в цілому. Разом із тим, вироблення рішень системою управління здійснюється за функціями управління на різних рівнях еталонної моделі OSI (рис. 3).



Рисунок 3 – Модель вироблення рішень системою управління мережею за рівнями та функціями

Отже, функціональна модель системи оперативного управління мережею (рис. 1) було удосконалено шляхом використання підсистеми управління безпекою та деталізовано за допомогою моделі вироблення рішень системою управління мережею, структурованої за функціями управління та рівнями еталонної моделі OSI (рис. 3).

Висновки й перспективи подальших досліджень

Наведена удосконалена функціональна модель системи оперативного управління мережею реалізує принцип адаптації до умов функціонування, може забезпечити потрібну якість обслуговування під час виконання визначених функцій управління та гарантує належний рівень безпеки.

Функціональна модель є основою для розроблення (удосконалення) бездротових мереж

військового призначення, що володіє розвиненими можливостями щодо формування стратегії доцільної поведінки, планування послідовності дій, а також синтезу управляючих впливів, спрямованих на забезпечення потрібної якості покриття, топології, маршрутизації, моніторингу та передачі інформації в таких мережах.

Запропонована модель має стати базою для створення гнучких і ефективних рішень, що сприятимуть подальшому розвитку й практичному застосуванню бездротових мереж у військовій сфері.

Напрямом подальших досліджень слід вважати впровадження штучного інтелекту та машинного навчання бездротових сенсорних мереж, з використанням сенсорів, здатних до самонавчання та адаптації до змін у навколишньому середовищі та розроблення моделей для прогнозування майбутніх подій на основі даних, отриманих від сенсорних мереж.

Список бібліографічних посилань

1. Машталір В. В., Жук О. В., Міненко Л. М., Артюх С. Г. Концептуальні підходи застосування бездротових сенсорних мереж арміями передових країн світу. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2023. Т. 47. № 2. С. 96–112.
2. Галелюка І. Б. Моделювання бездротових сенсорних мереж. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2015. Вип. 14. С. 141–150.
3. Толпога С. В., Пархуць Л. Т., Власов О. М. Побудова та моделювання сенсорних мереж на сучасних інформаційних технологіях та забезпечення їх інформаційної безпеки. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. 2011. Вип. 4. С. 9–14.
4. Новіков В. І. Метод збільшення часу життя безпроводної сенсорної мережі з надлишковою кількістю вузлів під час стеження за цілями моніторингу. *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2017. Вип. 2. С. 24–29.
5. Гаптельманов А., Міхаль О., Щепка О. Підвищення енергозбереження бездротових сенсорних мереж з використанням методів машинного навчання. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць* 2022. № 4. С. 92–97.
6. Жук О. В. Концептуальна модель побудови системи управління бездротовими сенсорними мережами військового призначення. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО: доп. та тези доп. учасників XI науково-практичної конференції*, м. Київ, 8-9 листопада, 2018 р. Київ : ВІПІ ім. Героїв Крут, 2018. С. 20–28.
7. Міночкін А. І., Романюк В. А., Жук О. В. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж. *Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ»*. 2007. Вип. № 4. С. 112–119.
8. Лисенко О. І., Козелкова К. С., Новіков В. І., Прищепка Т. О., Романюк А. В. Функціональна модель системи управління бездротовою сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища. *Системи обробки інформації*. 2015. Вип. 10(135). С. 222–226.
9. Романюк А. В. Цільові функції управління вузлами безпроводних сенсорних мереж для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2017. № 2. Т. 28(67). С. 49–54.
10. Жук О. В., Романюк В. А., Сова О. Я. Методологічні основи управління перспективними неоднорідними бездротовими сенсорними мережами тактичної ланки управління військами. *Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ»*. Київ : ВІПІ. 2016. С. 34–44.
11. Жук О. В., Ткаченко Д. В., Остапенко О. О. Моделі управління покриттям в безпроводних сенсорних мережах. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку в АТО. Збірник тез доповідей IX наук.-техн. конф.*, (29 лист. 2016 р.) Київ. 2016. С. 93–96.
12. Жук О. В., Романюк В. А., Сова О. Я., Ткаченко Д. В. Управління топологією. *Проблеми телекомунікацій ПТ-2017. Матеріали XI міжн. наук.-техн. конф., присвяченої Дню науки та Всесвітньому дню телекомунікацій* (18–21 квіт. 2017 р.). Київ: ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 366–370.
13. Жук О. В., Стрела Т. С., Романюк А. В. Аналіз методів маршрутизації в бездротових сенсорних мережах. *Збірник наукових праць ВІПІ*. Київ : ВІПІ. 2017. № 4. С. 41–48.
14. Романюк А. В. Метод доступу до радіоканалу вузлами безпроводної сенсорної мережі при зборі даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами. *Збірник наукових праць ВІПІ*. Київ : ВІПІ. 2018. № 4. С. 84–91.
15. Стрела Т. С., Жук О. В., Олексенко В. П. Аналіз методів підвищення та забезпечення якості обслуговування в бездротових сенсорних мережах. *Збірник наукових праць ВІПІ*. Київ : ВІПІ. 2018. № 1. С. 112–122.

FUNCTIONAL MODEL OF THE CONTROL SYSTEM OF WIRELESS SENSOR NETWORKS FOR MILITARY PURPOSES

Zhuk Oleksandr (Doctor of Technical Sciences, Associate Professor)

Mashtalir Vadym (Doctor of Historical Sciences, Professor)

Hrozovskiy Roman (Candidate of Military Sciences)

Chekan Andrii

National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Formulation of the problem in general. A distinctive feature of the development of the modern system of communication and automation of control of the Armed Forces of Ukraine in repelling armed aggression is the tendency to re-equip and modernize troops (forces) with the latest high-tech means of communication, including wireless systems. Such systems may include wireless sensor networks capable of monitoring, data collection and information transmission. However, the complexity, limited resources, different types of traffic, unreliability and limited resources, and the need to dynamically adjust to changing conditions require the creation of an effective management model with the maintenance of security at the required level. The aim of the article is to improve the functional model of the wireless sensor network management system to ensure optimal resource utilization, adaptability to changing operating conditions, high reliability and safety of operation. The improvement of this model is carried out by adding a security management subsystem to the network operational management system.

Analysis of recent researches and publications. The scientific publications discuss the prospects for the development of tactical sensor networks, provide their classification and requirements, as well as a functional model of the sensor network management system. Taking into account the peculiarities of wireless networks, a self-organizing sensor network for monitoring environmental parameters is considered. It should be noted that the problem of using security systems in the above publications was not given due attention.

Presenting the main material. The improved model provides for the structuring of the system into levels, in particular: the level of sensors, the level of data processing, and the level of information transmission, and consists of subsystems. Key components and processes such as energy management, load balancing, adaptive routing, and security are identified. The model supports flexibility in network configuration, which makes it possible to adapt to changes in the structure or operating conditions. The difference between this model and the existing ones, which determines its novelty, is the use of a new set of route search metrics. These metrics include: the type of traffic transmitted, the residual battery capacity of nodes, the energy required for transmission, and the limitations on radio channel capacity. In addition, the model uses advanced route selection rules, which reduces energy consumption and thereby increases the lifetime of the wireless sensor network.

Elements of scientific novelty. The functional model of the operational network management system is improved by using the security management subsystem and is refined by the model of decision-making by the network management system by levels and functions.

Practical significance of the article. The introduction of a functional model of the wireless sensor network management system will make it possible to create an adaptive distributed architecture for building wireless sensor networks with the possibility of network self-organization and increase the efficiency of the wireless sensor network as a whole by increasing the duration of the network operation, provided that the requirements for information exchange are met.

Conclusion and the perspectives of future researches. The presented improved functional model of the network operational management system implements the principle of adaptation to the operating conditions and can provide the required quality of service when performing certain management functions and ensure the required level of security. The direction of further research should be the introduction of artificial intelligence and machine learning of wireless sensor networks, using sensors capable of self-learning and adaptation to changes in the environment and the development of models for predicting future events based on data obtained from sensor networks.

Keywords: wireless sensor networks, functional management model, monitoring, telecommunications, security management subsystem.

References

1. Mashtalir, V., Zhuk, O., Minenko, L., Artiukh, S., (2023). Conceptual approaches to the use of wireless sensor networks by the armies of the world's leading countries. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. 2, 96-112.
2. Halelyuka, I., (2015). Modeling of wireless sensor networks. *Computer Means, Networks and Systems*. 14, 141-150.
3. Tolyupa, S., Parkhuts, L., & Vlasov, O., (2011). Construction and modeling of sensor networks using modern information technologies and ensuring their information security. *Scientific Notes of the Ukrainian Scientific Research Institute of Communication*. 4, 9-14.
4. Novikov, V., (2017). A method for increasing the lifetime of a wireless sensor network with redundant nodes during target monitoring. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences*, 2, 24-29.
5. Gaptelmanov, A., Mikhail, O., & Shchepka, O., (2022). Improving energy efficiency of wireless sensor networks using machine learning methods. *Control, Navigation, and Communication Systems*, Collection of Scientific Papers, Poltava: National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». 4, 92-97.
6. Zhuk, O., (2018). Conceptual model for constructing management systems of military wireless sensor networks. In *Priority Directions of Development of Telecommunication Systems and Networks of Special Purpose*, 20-28. Kyiv: VITI named after Heroes of Krut.
7. Minochkin, A. I., Romaniuk, V. A., & Zhuk, O. V., (2007). Prospects for the development of tactical sensor networks. *Collection of Scientific Papers of VITI NTUU «KPI»*. 4, 112-119.
8. Lysenko, O., Kozelkova, K., Novikov, V., Pryshchepa, T., & Romaniuk, A., (2015). Functional model of a self-organizing wireless sensor network management system for environmental parameter monitoring. *Information Processing Systems*. 10 (135), 222-226.
9. Romaniuk, A., (2017). Target functions for managing wireless sensor network nodes for critical infrastructure monitoring. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences*. 28(67), 2, 49-54.
10. Zhuk, O., Romaniuk, V., & Sova, O., (2016). Methodological foundations for managing prospective heterogeneous wireless sensor networks of tactical control units. In *Priority Directions of Development of Telecommunication Systems and Networks of Special Purpose*, 34-44. Kyiv: VITI NTUU «KPI».
11. Zhuk, O., Tkachenko, D., & Ostapenko, O., (2016). Coverage management models in wireless sensor networks. In *Priority Directions of Development of Telecommunication Systems and Networks of Special Purpose*, 93-96.
12. Zhuk, O., Romaniuk, V., Sova, O., & Tkachenko, D., (2017). Topology management. In *Problems of Telecommunications PT-2017*, XI International Scientific and Technical Conference Materials, dedicated to Science Day and World Telecommunication Day, 366-370. Kyiv: ITS KPI named after Igor Sikorsky.
13. Zhuk, O., Strela, T., & Romaniuk, A., (2017). Analysis of routing methods in wireless sensor networks. *Collection of Scientific Papers of VITI*, Kyiv: VITI. 4, 41-48.
14. Romaniuk, A., (2018). Access method to the radio channel by nodes of a wireless sensor network during data collection by telecommunication aeroplatforms. *Collection of Scientific Papers of VITI*, Kyiv: VITI. 4, 84-91.
15. Strela, T., Zhuk, O., & Oleksenko, V., (2018). Analysis of methods for improving and ensuring the quality of service in wireless sensor networks. *Collection of Scientific Papers of VITI*, Kyiv: VITI. 1, 112-122.