

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СЕНСОРНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

Сенсорні радіомережі (СР) складаються з невеликих вузлів з інтегрованими функціями моніторингу зовнішнього середовища, обробки та передавання даних. Вузли СР мають обмежені енергетичні ресурси. Складність знаходження балансу між ефективністю енергозбереження та продуктивністю передачі інформаційних потоків вимагає розробки нових інтелектуальних методів енергозбереження в СР.

Сенсорные радиосети (СР) состоят из небольших узлов с интегрированными функциями мониторинга внешнего пространства, обработки и передачи данных. Узлы СР имеют ограниченные энергетические ресурсы. Сложность нахождения баланса между эффективностью энергосбережения и производительностью передачи информационных потоков требует разработки новых интеллектуальных методов энергосбережения в СР.

Wireless sensor networks (WSN) consist of small sensor nodes with the integrated functions of environmental monitoring of, data processing and transfer. WSN nodes has the independent power supply. Complexity of finding of balance between the efficiency of power saving and transmission productivity of information flows demands development of new power saving intellectual methods.

Ключові слова: сенсорна радіомережа, вузли мережі, енергозберігання,

Перспективна мобільна компонента тактичних мереж зв'язку буде включати сенсорні радіомережі (СР) спеціального призначення, що складаються з маленьких сенсорних вузлів з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних [1]. Основними елементами сенсорних вузлів є: датчики контролю зовнішнього середовища, мікрокомп'ютер, батарея живлення, прийомопередавач.

Сенсорні радіомережі спеціального призначення повинні відповідати наступним вимогам: децентралізоване функціонування, енергозберігання, великий час функціонування мережі, достатня пропускну здатність, малий час затримки передачі, мобільність, масштабування, адаптування до зміни щільності та кількості вузлів, протидія засобам радіоелектронної боротьби (РЕБ), передача неоднорідного и пріоритетного трафіка тощо.

Вузли СР мають автономне джерело електроенергії обмеженої ємності, тому характерними вимогами до них є мінімізація витрат енергетичних ресурсів вузлів та максимізація часу функціонування мережі. Ці задачі вирішують методи управління енергоспоживанням в мобільних радіомережах (МР) [2], які можуть бути реалізовані в підсистемі управління енерговитратами системи управління вузлів МР. Для сенсорних радіомереж задача мінімізації енерговитрат є першочерговою, що вимагає розробки окремих методів енергозбереження вузлів СР [3].

Метою статті є проведення аналізу методів енергозбереження в сенсорних радіомережах, їх класифікації та визначення можливості застосування в автоматизованих системах спеціального призначення тактичної ланки управління.

Складність знаходження балансу між ефективністю енергозберігання та продуктивністю передачі інформаційних потоків вимагає розробки ряду методів енергозбереження вузлів СР. Для визначення напрямків подальших досліджень проведемо загальну класифікацію існуючих методів енергозбереження вузлів СР. Для цього будемо використовувати структуру передачі даних від вузлів СР до адресата, представлену на рис.1. Збір інформації сенсорною радіомережею здійснюється через один або декілька окремих шлюзів, які в свою чергу передають інформацію адресату з використанням зовнішньої мережі зв'язку.

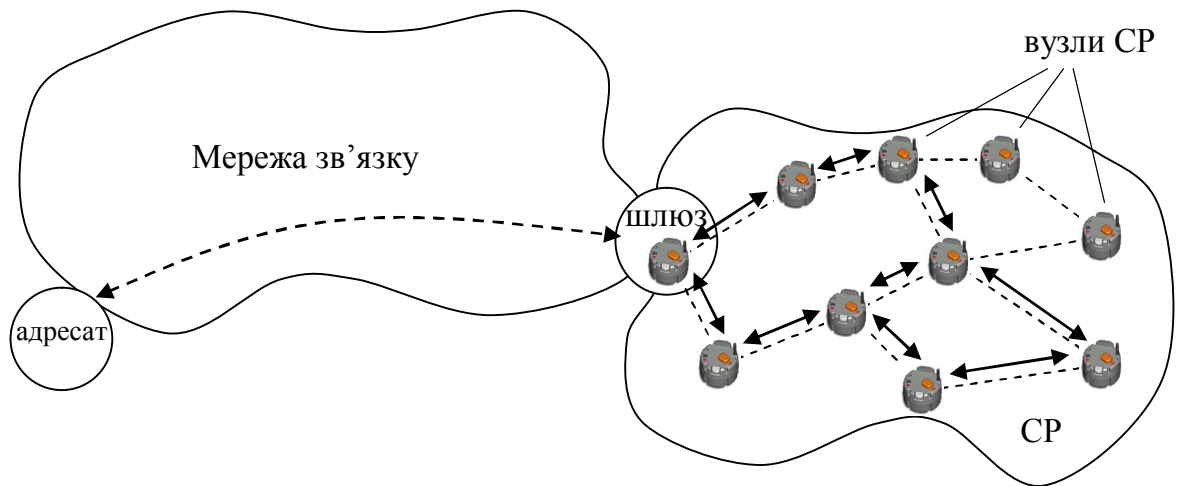


Рис. 1. Структура передачі даних від вузлів CP до адресата

Склад підсистем окремого вузла CP містить (рис. 2): підсистему датчиків, підсистему обробки інформації, телекомунікаційну підсистему та підсистему електроживлення. В окремих випадках вузол CP може включати зовнішнє електроживлення (сонячну батарею тощо), підсистему руху (змінення положення вузла або орієнтації антени), підсистему визначення положення в просторі (відносно інших вузлів або глобального) тощо.

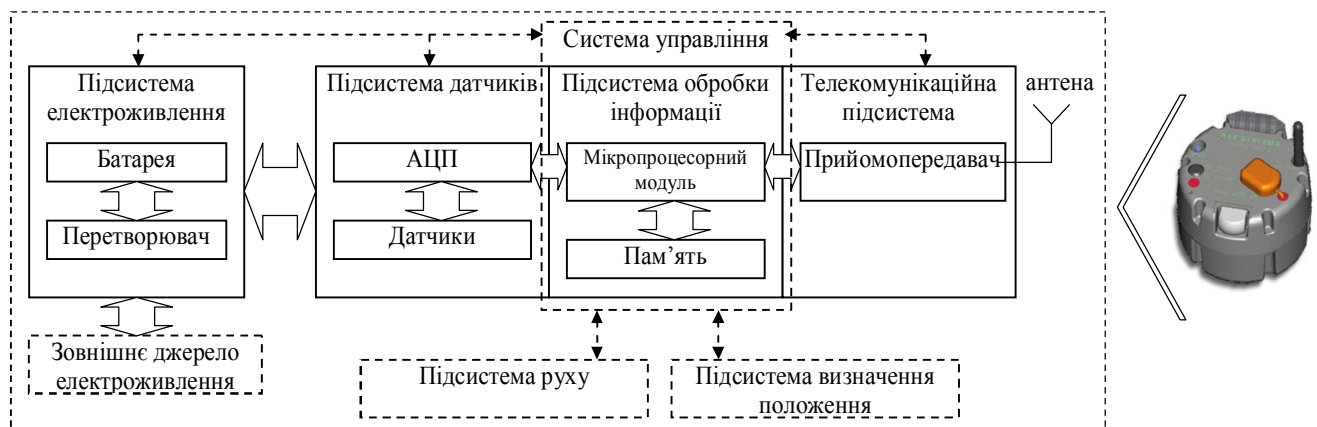


Рис.2. Структура вузла CP

Явно видно, що використання енергетичних ресурсів вузлів залежить від взаємодії його окремих підсистем, розміщення вузла в мережі та його функцій (кінцевий збирач інформації, ретранслятор, шлюз). Загальні співвідношення енергоспоживання вузлів наступні [4]:

у телекомунікаційної підсистеми набагато більше споживання енергії ніж у підсистеми обробки інформації (передача 1 біта використовує кількість енергії, достатньої на проведення тисячі і більше операцій мікропроцесора [4]);

в режимі прийому та очікуванні прийому телекомунікаційна підсистема вузла використовує приблизно однакову кількість енергії, тому енергозбереження буде ефективно тільки при періодичному повному відключенні прийомопередавача;

використання енергії вузлів суттєво залежить від режимів роботи підсистеми датчиків.

Зростанню енергоспоживання в CP також сприяють наступні фактори:

- колізії, які передбачають додаткові передачі пакетів;
- „підслухування”, коли вузли приймають пакети, які їм не адресовані;

- витрати протоколів більш високого рівня на передачу службової інформації, які в БСМ можуть досягати 70 % глобального трафіка [3];
- передача пакетів в час, коли вузол-адресат не готовий до прийому: при цьому здійснюються повторні передачі;
- розмір пакетів: з одного боку, при передачі пакетів малого розміру витрачається більше енергії на передачу службової інформації (заголовків пакетів тощо), з іншого – передача великих пакетів потребує більше енергії;
- флуктуації трафіка: різке збільшення глобального трафіку в мережі може призвести до значного збільшення кількості колізій.

Для зменшення енерговитрат вузлів необхідно використовувати комплекс методів енергозбереження. Провівши аналіз енергоспоживання в СР, всі методи енергозбереження можна поділи на такі напрямки:

- організацію режимів роботи вузлів (сон, прослуховування, передача) з періодичним відключенням прийомопередавачів;
- управління потужністю передач;
- зменшення обсягу передачі даних;
- використання мобільності вузлів.

Загальна класифікація енергозберігаючих методів в СР представлена на рис.3

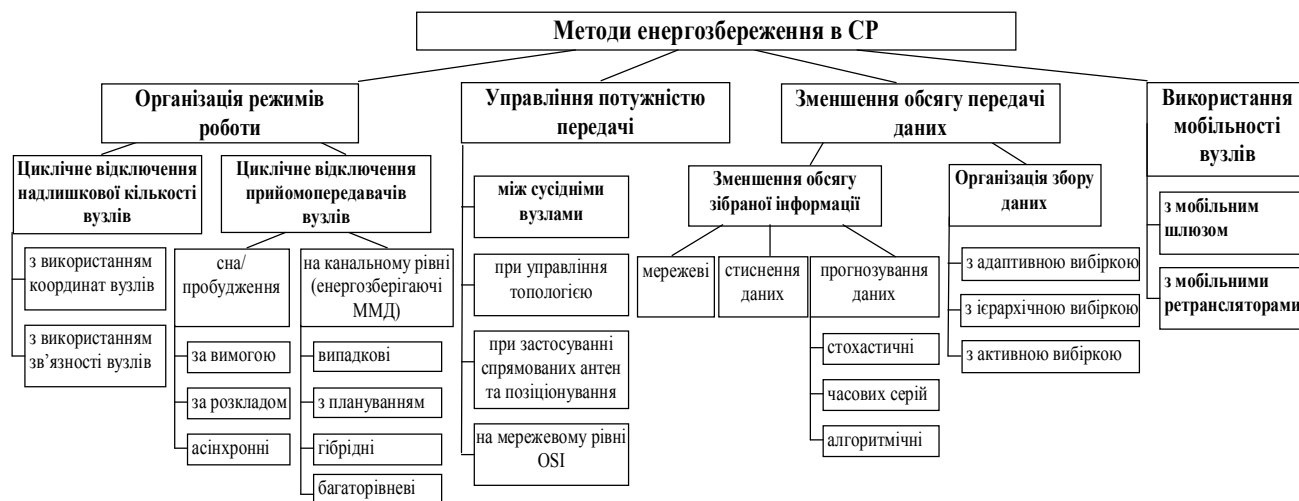


Рис. 3. Класифікація методів енергозбереження вузлів СР

Розглянемо детально енергозбереження за напрямками.

1. Організація режимів роботи.

Енергозберігаючі методи організації режимів роботи спрямовані на забезпечення зменшення споживання енергетичних ресурсів вузлів СР за рахунок періодичного відключення вузлів мережі або їх прийомопередавачів.

В методах циклічного відключення надлишкової кількості вузлів використовується повне відключення окремих надлишкових вузлів СР на визначений довгий період часу. Дані вузли зберігають ресурс батарей і в подальшому можуть замінити вузли, які більше інших витрачають енергетичний ресурс. Основна задача методів даного класу полягає в виборі тих вузлів СР, які на черговому циклі роботи можуть бути відключені. Для цього можуть бути використані дані про розташування (координат) вузлів або їх зв'язність.

Наприклад, метод GAF (Geographical Adaptive Fidelity) [5] розбиває мережу на окремі чарунки за ознакою місця розташування таким чином, що вузли сусідніх чарунок завжди можуть зв'язатися між собою. Вузли в окремій чарунці вважаються рівнозначними, з них вибирається один (з більшим енергетичним ресурсом), який функціонує на черговому циклі роботи мережі.

Метод GeRaF (Geographic Random Forwarding) [6] використовує адаптивну випадкову схему включення/відключення вузлів СР. При необхідності передачі вузол взаємодіє з множиною вузлів, що включені, з яких для подальшої передачі вибирається вузол, координати якого ближче до адресата.

Метод Span [7] адаптивно вибирає «координаторів вузлів мережі» з використанням інформації про зв'язність вузлів. «Координатори» функціонують на черговому циклі роботи мережі і здійснюють маршрутизацію інформаційних потоків. Інші вузли основний час відключені і періодично включаються для перевірки необхідності стати «координатором». Для підтримання потрібної кількості „координаторів” використовуються наступні основні правила:

1) якщо вузол не може зв'язатись з сусідом безпосередньо, або через один чи декілька „координаторів”, то він вирішує стати „координатором”;

2) перед тим, як стати „координатором”, вузол вичікує випадковий проміжок часу, зворотно пропорційний його енергетичному ресурсу;

3) вузол перестає бути „координатором”, якщо всі вузли, з якими він зв'язаний доступні між собою безпосередньо, або через інші „координатори”.

Метод Span отримує дані про зв'язність вузлів з протоколів мережевого рівня і тому його використання залежить від діючих методів маршрутизації.

Метод ASCENT [8] (Adaptive Self-Configuring sEnsor Networks Topologies) на відміну від методу Span не залежить від методів маршрутизації. Основна його суть в тому, що неактивні вузли знаходяться в режимі прослуховування. Якщо кількість активних вузлів в мережі недостатня, вузли, які виявили втрату пакетів, починають передавати інформацію про це в мережу. Неактивні вузли приймають цю інформацію і за відповідним алгоритмом переходять в активний стан.

Метод Naps [9] пропонує децентралізований алгоритм відключення/включення вузлів. В цьому методі цикли роботи кожного вузла розділяються та випадкові інтервали часу $0..T$. Після свого включення, вузли передають ширококомовний запит. Якщо вузол отримує відповіді від своїх сусідів, він відключається до наступного циклу. Якщо відповідь не отримана (сусіди відключені або вийшли з ладу), вузол переходить в активний стан. Математично та за допомогою моделювання доказано, що вибравши відповідні параметри режимів роботи окремих вузлів, можна знайти прийнятний баланс між показниками енергоефективності та продуктивністю заданої СР [9]. Крім цього методи цього класу гнучкі та легко масштабуються.

Методи циклічного відключення надлишкової кількості вузлів можуть збільшити час функціонування мережі, їх доцільно використовувати разом з іншими методами енергозбереження в якості допоміжних. При цьому необхідно враховувати їх можливий вплив на ефективність застосування інших методів збереження енергоресурсів вузлів.

Методи відключення прийомопередавачів вузлів можуть реалізовувати функції енергозбереження як на прикладному рівні відповідно моделі взаємодії відкритих систем OSI (методи сна/пробудження), так і на канальному рівні (енергозберігаючі методи множинного доступу).

Методи сна/пробудження можуть включати прийомопередавачі за вимогою, за розкладом або асинхронно.

Методи сна/пробудження за вимогою ефективні в СР, в яких основний час не здійснюється передача інформації (наприклад, мережі спостереження і виявлення окремих подій). В такій мережі вузли більшу частину часу знаходяться в контролюючому стані з відключеними прийомопередавачами з гарантованою обмеженою затримкою можливого переходу в стан передачі.

Так метод STEM (Sparse Topology and Energy Management) [10] для виявлення ініціації передачі використовує додатковий радіоканал активації меншої потужності. При цьому окремий вузол включає прийомопередавач кожний період включення $T_{\text{вкл}}$ на час активації $T_{\text{акт}}$. Якщо вузлу необхідно передати пакет він передає серію спеціальних маяків по каналу

активації. При прийомі маяка вузол-адресат передає підтвердження прийому і активує канал прийому даних. Любий з двох вузлів, виявивши колізію, активує канал передачі даних. Якщо час на передачу маяка дорівнює T_m , а час передачі підтвердження прийому $T_{\text{підтв}}$, то для коректного прийому запиту на передачу вузли періодично повинні бути активовані на час $T_{\text{акт}} > 2T_m + T_{\text{підтв}}$. $T_{\text{вкл}}$ в низькошвидкісних мережах повинно бути достатньо великим для забезпечення енергозбереження і сумування всіх періодів часу на мультитранзитному шляху проходження пакету даних може дати велику затримку. Існують різновиди методу STEM з використанням конвеєрного пробудження, які зменшують вплив цих недоліків [3].

Методи сна/пробудження за розкладом пропонують періодичне одночасне включення прийомопередавачів всіх вузлів. Головна перевага цих методів в тому, що якщо вузол передає дані, то гарантовано всі вузли на даний момент знаходяться в режимі прийому. Це дає можливість широкомовної передачі всім сусідам. Основним недоліком даних методів є необхідність використання складних механізмів синхронізації. Для цього розробляються окремі методи синхронізації вузлів CP. Крім цього, одночасний вихід зі сну може привести до одночасної ініціації передачі декількома вузлами, що призведе до колізій. Тому існують різновиди даних методів зі складними схемами включення. Методи сна/пробудження за розкладом практично реалізовані в платформах TinyDB [11] та TASK [12].

Асинхронні методи сна/пробудження не потребують синхронізації і гарантують перекриття активних періодів вузлів в межах визначеної кількості циклів. Прикладом є метод, реалізований в протоколі 802.11 PSM (Power Saving Mode) [13]. Існують методики складання асинхронних схем включення вузлів заданих CP з необхідними характеристиками [14]. Методи даного класу гнучкі та адаптовані до зміни топології мережі, однак неефективні для мереж низької щільності.

Енергозберігаючі методи множинного доступу реалізують функції енергозбереження на каналному рівні моделі OSI, де самим ефективним є мінімізація кількості повторних передач пакетів та часу знаходження вузлів в режимі прослуховування каналу. Складність знаходження балансу між ефективністю енергозберігання та продуктивності передачі інформаційних потоків призвело до розробки ряду енергозберігаючих методів МД [15–17].

Енергозберігаючі методи множинного доступу можна поділити на методи з плануванням, методи без планування, гібридні та багаторівневі.

Методи МД без планування (випадкові) прості в реалізації, масштабовані та адаптовані до зміни топології мережі, але піддані всім вказаним вище факторам, що заважають ефективному енергозберіганню. Ці методи базуються на CSMA або CSMA/CA і використовуються в мережах невеликої розмірності без жорстких вимог з енергоефективності та продуктивності. Так, наприклад, в операційній системі сенсорних вузлів TinyOS [11] використовується метод B-MAC (Berkeley MAC) [16–17]. Цей метод поєднує властивості методів доступу до каналу CSMA/CA та асинхронних методів сна/пробудження. Метод S-MAC (Sensor-MAC) [16–17] використовує схему сна/пробудження за розкладом. Метод D-MAC [16–17] адаптований для мереж зі деревовидною структурою.

Методи з плануванням основані на методах часового розподілу доступу до каналу. Ці методи мінімізують вплив основних факторів, що заважають ефективному енергозберіганню, але більш складні в реалізації, потребують застосування складних механізмів синхронізації вузлів, масштабування та адаптації до зміни топології мережі. Дані методи використовуються в мережах великої розмірності та інтенсивного трафіку.

Так, наприклад, метод TRAMA [16–17] поділяє час доступу до каналу на час випадкового доступу та час запланованого доступу. Часові проміжки випадкового доступу використовуються для резервування часових слотів, а час запланованого доступу – безпосередньо для передачі даних. Метод L-MAC [16–17] не витрачає час на резервування, а використовує схему випадкового вибору вільного слота .

Стандарт IEEE 802.15.4 дозволяє використовувати два типи доступу: з маяками (з плануванням) та випадковий. В даному стандарті розподіл слотів здійснює провідний вузол кластера тільки в межах одного кластера на одній ділянці передачі.

Гібридні методи об'єднують переваги та зменшують вплив недоліків вищевказаних методів, більш складні в реалізації та ефективні для окремих типів топологій мереж. Основна суть даних методів – застосування переключення різних механізмів доступу в залежності від рівня конкуренції в мережі. Так метод Z-MAC [16–17], на попередньому етапі, за допомогою розподіленого алгоритму розподіляє часові слоти між вузлами сенсорної радіомережі таким чином, щоб в межах двох ретрансляційних ділянок вони не повторювались. Після розподілу кожний вузол має карту розподілу слотів за їх „власниками”. На етапі функціонування вузли „не власники” можуть передавати по чужим каналам, якщо виявляють їх низьку завантаженість. При виділенні слота для передачі перевагою користується його „власник”. Такий підхід дозволяє підвищити рівень використання каналів при низькій конкуренції доступу.

В багаторівневих методах МД здійснюється взаємодія на різних рівнях моделі OSI, що дозволяє підтримувати баланс між енергозберіганням та продуктивністю мережі для підтримки QoS в залежності від характеристик інформаційних потоків. Приклади: MAC-CROSS, Q-MAC, EQ-MAC, CoCo [15-16].

2. Управління потужністю передачі.

Енергозберігаючі методи управління потужністю передачі спрямовані на забезпечення зменшення споживання енергетичних ресурсів за рахунок зменшення потужності випромінювання антенами окремих вузлів СР. Методи даного класу поділяються [18]:

- *методи зменшення потужності передач між сусідніми вузлами* зі збереженням необхідних параметрів радіоканалу: визначеного рівня відношення сигнал/завада, нормованого на біт $SINR = E_b/N_0$ (где E_b – енергія сигналу, N_0 – спектральна потужність шуму), ймовірність бітової помилки (BER) тощо.

- *методи управління топологією* припускають перерозподіл потужностей передач вузлів P_i і/або спрямованості їхніх антен γ_i . Збільшення потужностей передач вузлів приводить до збільшення ймовірності успішної передачі пакетів (за рахунок збільшення SINR), скороченню часу їхньої доставки та обсягу службової маршрутної інформації (внаслідок зменшення діаметра мережі), однак вимагає більшої витрати енергії батареї і визначає високий рівень взаємних перешкод (що приводить до різкого зниження пропускної здатності мережі). Зменшення потужності передачі дозволяє збільшити пропускну здатність мережі (за рахунок просторового рознесення каналів і зниження рівня взаємних перешкод), але приводить до збільшення часу доставки повідомлення й обсягу службового трафіка.

- *методи застосування спрямованих антен і системи позиціонування* дозволяють знизити рівень взаємних перешкод і збільшити енергетику радіоканалів. Дані методи на даний час складні в реалізації, але дозволяють зменшити витрачання потужності до 90% [18].

- *методи управління потужністю передачі на мережевому рівні OSI* застосовують вибір маршрутів за метриками, що враховують споживання енергоресурсу при передачі/прийомі повідомлень та/або ємність батарей і реалізуються в підсистемі маршрутизації системи управління вузлів СР [18].

3. Зменшення обсягу передачі даних.

Методи зменшення обсягу передачі даних поділяються на два класи. Методи першого класу дозволяють зменшити обсяг вже зібраної вузлами СР інформації для її подальшої передачі адресату. Методи другого класу дозволяють організувати енергоефективний збір даних.

Методи зменшення обсягу зібраної інформації зменшують надлишковість вибірок зібраних даних. Так мережеві методи [19] спрямовані на виключення надлишкових вибірок в проміжних вузлах на шляху передачі адресату (наприклад, кластерних вузлах). Застосування цих методів залежить від принципів збору даних в мережі та здійснюється відповідно на прикладному рівні моделі OSI.

Методи стиснення даних зменшують обсяг зібраних вузлом даних з використанням загальних методів кодування зі стисненням.

Суть методів прогнозування даних полягає в створенні абстракції явища, дані про яке збирають датчики вузла CP – моделі, яка характеризує зміну даних в часі. Якщо зібрані дані зі заданою точністю відповідають визначеній моделі, безпосередньо виміряні значення не передаються. Якщо дані не відповідають моделі, застосовується інша модель [3]. Так стохастичні методи використовують ймовірнісні математичні моделі. Методи часових серій використовують моделі зміни даних в часі.

Алгоритмічні моделі застосовують складні евристичні моделі зміни даних, що збираються, на окремих ділянках або у всій CP. Так метод PREMON [3] розроблений на основі загальних методів кодування відеосигналів. Загальна “картина” даних розділяється на окремі ділянки і в подальшому передається характер їх змін.

Методи організації енергоефективного збору даних дозволяють не тільки зменшити надлишковість даних, що збираються, але й зменшити енергоспоживання підсистеми датчиків вузлів CP, яке може бути суттєвим (при використанні активних датчиків тощо) [3]. Так методи адаптивної вибірки скорочують кількість вибірок даних з використанням просторово-часових кореляцій. Методи ієрархічної вибірки припускають використання датчиків різного типу (різної точності, енергоспоживання) для виявлення подій і вимірювання їх ознак. Методи активної вибірки аналогічні методам прогнозування даних при зменшенні обсягу зібраної інформації, але в них моделі використовуються для зменшення безпосередньо вибірок даних.

Методи організації енергоефективного збору даних цілком залежать від алгоритмів збору даних в CP і реалізуються на прикладному рівні моделі OSI.

4. Використання мобільності вузлів.

Методи енергозбереження з використанням мобільності вузлів CP дозволяють зменшення кількості ретрансляцій повідомлень при переміщенні вузлів на місцевості. Ці методи можна поділити на два класи: методи мобільного шлюза та методи мобільних ретрансляторів [3].

Методи мобільного шлюзу використовують той факт, що збір даних в CP здійснюється в окремому напрямку – через шлюз до адресата. При відомому характері зміни положення шлюзу можна спланувати передачі даних в мережі з мінімальною кількістю ретрансляцій [20]. Методи мобільних ретрансляторів використовують мобільність окремих вузлів CP. В якості мобільних ретрансляторів можуть використовуватись безпілотні літальні апарати, транспортні засоби, що рухаються за маршрутами тощо. Так схема перенаправлення повідомлень [21] використовує „пароми” повідомлень – мобільні ретранслятори, за допомогою яких здійснюється безпосередня передача даних між вузлами CP, за рахунок чого зменшується кількість ретрансляцій.

Методи енергозбереження з використанням мобільності вузлів залежать від характеру збору даних в мережі, від наявності та руху мобільних вузлів, тому можуть застосовуватись в якості додаткових до інших методів енергозбереження.

Розглянуті вище за напрямками методи енергозбереження дозволяють зменшити використання енергетичного ресурсу вузлів CP. Умови функціонування CP спеціального призначення накладають додаткові обмеження на застосування окремих методів енергозберігання. Тому для ефективного енергозбереження необхідно застосовувати сукупність методів енергозберігання в залежності від умов функціонування CP. Доцільність застосування окремих методів необхідно оцінювати з застосуванням імітаційного моделювання.

В якості показника ефективності методів енергозбереження пропонується використовувати відносний приріст часу життя мережі $\delta t_{ж}$ [22]. Тоді

$$\delta t_{ж} = \frac{t_{ж}}{t_{ж0}},$$

де $t_{ж}$ – час життя мережі з застосуванням методу енергозбереження, $t_{ж0}$ – час життя мережі без застосування методу енергозбереження.

Якщо час життя визначається функціонуванням всіх вузлів мережі, тоді

$$t_{ж} = \min \{t_{ji}\}, i = \overline{1, N},$$

де t_{ji} – час життя i -го вузла, N – кількість вузлів.

Час життя в залежності від покладених на СР задач може визначатись через відсоткову кількість вузлів, які вийшли з ладу, втрату «зони покриття» моніторингу тощо.

Взагалі час життя СР можна визначити як проміжок часу, впродовж якого СР може виконувати покладені на неї задачі. В процесі функціонування і поступового виходу з ладу окремих вузлів (а саме, вичерпання їх енергетичних ресурсів) СР може втратити зв'язність між своїми ділянками, що не дозволить передачу даних адресату окремими вузлами мережі. Тому в подальшому при проведенні досліджень під часом життя мережі пропонується використовувати час функціонування мережі зі збереженням можливості ретрансляції повідомлень від діючих вузлів до адресата.

Висновки

Результати моделювання для мереж різної розмірності, інтенсивності трафіку та його обсягу не дають однозначної переваги окремих методів одного класу [3,15]. Аналіз методів енергозбереження вузлів СР показав, що єдиного універсального методу на даний час не існує. Крім того, для комплексів та засобів зв'язку та автоматизації тактичної ланки управління висуваються особливі вимоги зі стійкості, безпеки та прихованості. Більшість розглянутих в статті методів не відповідають цим вимогам і не можуть використовуватись для побудови СР спеціального призначення.

Тому актуальною є задача розробки нових методів енергозбереження та методик їх застосування в сенсорних радіомережах спеціального призначення, які повинні забезпечувати зберігання енергетичних ресурсів вузлів при забезпеченні заданої якості (QoS) передачі інформаційних потоків та адаптуватись до умов функціонування мережі. Дані методи пропонується розробляти з організацією взаємодії між вузлами СР на різних рівнях моделі OSI та використанням інтелектуальних методів управління в умовах невизначеності [23].

ЛІТЕРАТУРА

1. Міночкін А.І., Романюк В.А., Жук О.В. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж // Збірник наукових праць № 4. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2007. – С. 112 – 119.
2. Миночкин А.И., Романюк В.А. Методы множественного доступа в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2004. – № 2. – С. 46 – 50. http://viti.kpi.ua/Articles/rva/rva_2004_46.pdf.
3. G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella, Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: a Survey, Journal Ad Hoc Networks, Vol. 7 Issue 3, May, 2009.
4. G. Pottie, W. Kaiser, „Wireless Integrated Network Sensors, Communication of ACM”, Vol. 43, N. 5, pp. 51 – 58, May 2000.
5. Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, „Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc”, Proc. ACM MobiCom 2001, pp. 70 – 84. Rome, 2001.
6. M. Zorzi and R. R. Rao, „Geographic Random Forwarding (GeRaF) for Ad Hoc and Sensor Networks: Energy and Latency Performance”, IEEE Transactions Mobile Computing, Vol. 2, No. 4, Pp. 349 – 365, 2003.
7. B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, R. Morris, „Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks”, ACM Wireless Networks, Vol. 8, N. 5, September 2002.
8. A. Cerpa, D. Estrin, „Ascent: Adaptive Self-Configuring Sensor Network Topologies”, Proc. IEEE INFOCOM 2002.

9. *P. B. Godfrey, D. Ratajczak*, „Naps: Scalable, Robust Topology Management in Wireless Ad Hoc Networks”, Proc. of the 3rd international Symposium on information Processing in Sensor Networks (IPSN '04), Berkeley, California, USA, April 26 – 27, 2004.
10. *C. Schurgers, V. Tsiatsis, M. B. Srivastava*, „STEM: Topology Management for Energy Efficient Sensor Networks”, IEEE Aerospace Conference '02, Big Sky, MT, March 10 – 15, 2002.
11. *S. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, W. Hong*, „TinyDB: an Acquisitional Query Processing System for Sensor Networks”, ACM Transactions on Database Systems, Volume: 30, Issue: 1, Pages: 122 – 173, 2005.
12. *P. Buonadonna, D. Gay, J. Hellerstein, W. Hong, S. Madden*, „TASK: Sensor Network in a Box”, Proc. European Workshop on Sensor Networks (EWSN 2005), January 2005.
13. *Y. Tseng, C. Hsu, T. Hsieh*, „Power Saving Protocols for IEEE 802.11 Ad Hoc Networks“, Proc. IEEE Infocom 2002, New York (USA), June 2002.
14. *R. Zheng, J. Hou, L. Sha*, „Asynchronous Wakeup for Ad Hoc Networks”, Proc. ACM MobiHoc 2003, pp 35 – 45, Annapolis (USA), June 1 – 3, 2003.
15. *Коваленко І.Г.* Енергозберігаючі методи множинного доступу в безпроводних сенсорних мережах: збірник матеріалів V науково-технічної конференції „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” / – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2010. – С. 141 – 142.
16. *B. Yahya, J. Ben-Othman*, „Towards a classification of energy aware MAC protocols for wireless sensor networks”, „Wireless Communications and Mobile Computing”, 2009, №9, pp 1572 – 1607.
17. *L. Chaari, L. Kamoun*, „Wireless sensors networks MAC protocols analysis, Journal of Telecommunications”, volume 2, ISSUE 1, 2010.
18. *Минович А.И., Романюк В.А.* Управление энергоресурсом мобильных радиосетей // Зв'язок. – 2004. – № 8. – С. 50 – 53.
19. *E. Fasolo, M. Rossi, J. Widmer, M. Zorzi*, „In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey”, IEEE Wireless Communications, Volume: 14, Issue: 2, Pages: 70 – 87, April 2007.
20. *Z. M. Wang, S. Basagni, E. Melachrinoudis, C. Petrioli*, „Exploiting Sink Mobility for Maximizing Sensor Networks Lifetime”, Proc. of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '05), Hawaii, 03 – 06 Jan. 2005.
21. *H. Jun, W. Zhao, M. Ammar, E. Zegura, and C. Lee*, „Trading Latency for Energy in Wireless Ad Hoc Networks using Message Ferrying”, Proc. IEEE PerCom Workshops, International Workshop on Pervasive Wireless Networking (PWN 2005), March 2005.
22. *Rai V., Mahapatra, R.N.* Lifetime Modeling of a Sensor Network, Proc. Design, Automation and Test in Europe, 2005.
23. *Герасимов Б.М., Дивидинюк М.М., Субач И.Ю.* Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2004. – 320 с.