

А. В. Гаптельманов, О. П. Міхаль, О. О. Щепка

Харківський національний технічний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Анотація. Актуальність. Бездротові сенсорні мережі (БСМ) є перспективною галуззю розвитку комп'ютерних мереж. Ключова ідея БСМ – автоматизація збору інформації про навколишнє середовище та керування об'єктами. БСМ особливо корисні там, де присутність людини в контрольованій зоні неможлива або збирання інформації необхідно проводити тривалий час. БСМ отримали широке поширення після активного розвитку сучасної мікроелектроніки, технологій бездротової взаємодії та відповідного апаратного забезпечення. **Метою даної роботи** є розробка аналіз алгоритмів підвищення енергозбереження в бездротових сенсорних мережах з використанням методів машинного навчання. **Об'єктом дослідження** є тривалість функціонування вузла в бездротовій сенсорній мережі. **Предметом дослідження** є алгоритми підвищення енергозбереження. **Результати.** Запропоновано адаптивний енергозберігаючий алгоритм передачі даних, який може застосовуватися в бездротових сенсорних мережах, де необхідно приймати рішення про стан сенсорної мережі (завдання класифікації) на основі безлічі показань із сенсорів. Для функціонування алгоритму необхідно навчити дерево рішень та отримати предикати для сенсорів. **Висновок.** Розроблено алгоритми роботи сенсора БСМ та побудови бінарного дерева рішень, які можуть бути використані для підвищення енергозбереження функціонування вузлів в бездротових сенсорних мережах. Розглянуто методи машинного навчання. Вони дозволяють оперувати з безліччю структурованих даних, отримуючи з них знання в вигляді моделі, яку можна використовувати в майбутньому для ухвалення рішення. Для реалізації запропонованого алгоритму обрано метод дерева рішень. Вибір пов'язаний з тим, що даний метод має високу інтерпретацію та схожий із процесом прийняття рішення оператором. Крім цього, дерева рішень дозволяють проводити класифікацію з пропусками у вхідних даних, що може досить часто відбуватися у сенсорних мережах. Грунтуючись на ідемпотентності предикатів дерева рішень, пропонується скоротити кількість сеансів зв'язку за рахунок динамічного визначення частоти передачі. Таким чином, цей підхід дозволить позбутися постійної передачі даних бездротовим каналом зв'язку, тим самим буде зекономлено енергоресурси вузлів мережі.

Ключові слова: енергозбереження, бездротова сенсорна мережа, вузол, машинне навчання, дерево рішень, класифікація.

Вступ

Структура БСМ часто залежить від її цільового призначення та навколишнього середовища інфраструктури. У класичному варіанті БСМ є безліч взаємопов'язаних по бездротовій мережі вузлів (сенсорів), розташованих на певній території та виконуючих збір характеристик довкілля. Як правило, вузол мережі – це малогабаритний пристрій, до складу якого входять датчик, блок обробки даних (мікропроцесор і зовнішня пам'ять), приймач і автономне джерело живлення. Сенсор реєструє зміни конкретних параметрів довкілля (освітлення, температура, вологість, тиск, рух тощо), потім обробляє їх та передає на базову станцію. Вузол мережі також може виступати в ролі ретранслятора повідомлень, за рахунок чого досягається значна зона покриття мережею за низьких фінансових витрат.

БСМ використовують для виконання таких функцій, як автоматичний збір даних, стеження параметрами середовища [1]. Серед основних типів БСМ виділяють: наземні, підземні, підводні, мультимедійні та мобільні мережі. Їх відмінні риси полягають у різних топологіях, технічній складовій сенсора, періодичності та швидкості передачі даних, особливості каналу зв'язку.

За рахунок низької вартості, швидкості розгортання та високої ефективності БСМ широко застосовуються практично у всіх сферах життєдіяльності, особливо популярні в оборонній галузі, промисловості, сільському господарстві та охороні здоров'я.

За великим потенціалом використання БСМ стоїть чимало наукових та технічних проблем, що починаються ще з проектування мережі [2]. Ці проблеми мають концептуально новий характер. Важливість їх рішення полягає в тому, що невраховані деталі можуть суттєво вплинути на функціонування всієї мережі у майбутньому. На відміну від інформаційних мереж, БСМ містять набір відмінних характеристик, які сприяють створенню нових способів та методик проектування. В силу особливостей використання БСМ та обмеженого функціоналу сенсорів, що формують мережу, виникають нові параметри системи, такі як розгортання та конфігурація маршрутизації, зона покриття, енергоспоживання та термін автономної роботи вузла мережі [3]. Оскільки все частіше БСМ є важливим елементом у процесах зовнішніх систем, то необхідно приділяти велику увагу надійності та відмовостійкості мережі.

Проведений аналіз публікацій [4-7] показав актуальність питання енергозбереження в БСМ. Значна частина досліджень спрямована на рішення вузькоспеціалізованих проблем, що належать до конкретних областей застосування БСМ, і лише невелика частина досліджень сфокусована на загальних задачах, властивих різним типам БСМ [8, 9]. При проектуванні БСМ за заданими вимогами часто стикаються з безліччю обмежень, зумовлених зовнішнім середовищем, рівнем розвитку техніки, доступними ресурсами [10, 11].

Серед розв'язуваних завдань виділяють наступні значні напрямки: проектування апаратного

забезпечення, способи і алгоритми управління та обробки інформації, питання експлуатації.

Серед перерахованих вище завдань приділимо увагу розробці методів і алгоритмів управління та обробки інформації у мережі. Ключовими параметрами при оцінці запропонованих методів та алгоритмів комунікації в мережі є швидкість передачі даних та термін експлуатації БСМ.

Термін експлуатації мережі безпосередньо залежить від тривалості функціонування вузлів мережі. У свою чергу, вузол мережі може припинити функціонувати з причин внутрішньої несправності, агресивного зовнішнього середовища, виходу із зони дії бездротової мережі або вичерпання енергії джерела живлення. Вузол мережі споживає електроенергію для збору, обробки та передачі інформації, також при цьому повинна бути вирішена задача маршрутизації при топології, відмінної від топології «зірка». Як правило, вузол мережі містить автономне джерело живлення з лімітованим енергоресурсом та відсутні способи поповнення енергії із зовнішнього середовища. Час автономної роботи вузла мережі пов'язано безпосередньо з часом служби автономного джерела живлення.

Незважаючи на те, що для вузлів БСМ можна передбачити механізми отримання енергоресурсів із навколишнього середовища (сонячні батареї, механічна, електромагнітна енергія), не завжди існує прямий і постійний доступ до перерахованих ресурсів [12]. Також варто враховувати, що елементи перетворення енергії з довкілля мають високу вартість, яка доходить до собівартості самого датчика; в такому випадку використання перетворювачів стає безглуздом, оскільки часто однією з базових вимог до БСМ є низька вартість датчиків. У дослідженні [13] було підкреслено, що питома енергетична щільність сучасних хімічних джерел живлення зростає повільніше, ніж обсяг споживаної енергії. Ще важливим фактом є те, що джерела енергії з великою енергоємністю становлять підвищену небезпеку і вимагають особливих умов експлуатації, тому що в іншому випадку можуть статися загоряння та вибухи.

Отже, вибір енергоефективних методів і алгоритмів збору та передачі інформації між вузлами мережі є однією з основних актуальних наукових проблем під час проектування БСМ, що підтверджує актуальність даної роботи.

Метою роботи є розробка аналіз алгоритмів підвищення енергозбереження в бездротових сенсорних мережах з використанням методів машинного навчання.

Основна частина

Сенсорні мережі дозволяють автоматизувати збирання даних про навколишнє середовище чи контрольований об'єкт. Бездротова взаємодія між вузлами мережі значно розширює сферу застосування, але несе безліч нових задач, якими представлено ряд досліджень. Однією з важливих завдань при проектуванні БСМ є збільшення терміну експлуатації мережі, яку, у свою чергу, пов'язано з терміном експлуатації вузлів мережі. Функціонування сенсора може бути порушено з кількох причин, і в цій роботі розглядаються проблеми обмеженого енергоресурсу біля вузла мережі та неенергоефективних алгоритмів обробки даних.

Аналіз споживання електроенергії вузлом БСМ ґрунтується на експериментальних даних, оскільки дослідження теоретичної моделі енергоспоживання вузла БСМ досить трудомістке і має низьку точність через наявність безлічі факторів, таких як: тип сенсора, дальність передачі даних, що виконуються обчислення. Результатом аналізу енергоспоживання є залежність витраченої енергії від виконуваних сенсором функцій. Перед аналізом енергоспоживання вузла мережі розглянемо його узагальнену структуру у складі БСМ. До складу вузла мережі (сенсора) входять (рис. 1):

- датчики, що вимірюють параметри навколишнього середовища;
- блок обробки даних, що складається з мікроконтролера та зовнішньої пам'яті;
- приймач;
- автономне джерело живлення.

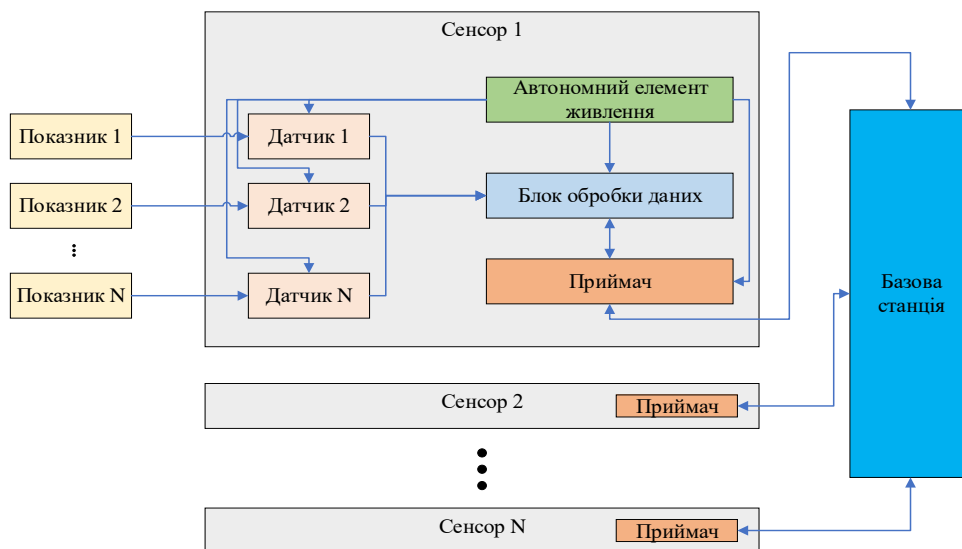


Рис. 1. Узагальнена структура вузла у складі БСМ

Вузол мережі вимірює параметри навколишнього середовища, обробляє їх, а потім посилає базову станцію, куди надходять дані з усіх сенсорів. З представленої структури видно, що енергія автономного елемента живлення витрачається на енергопостачання датчиків, мікроконтролера з пам'яттю та на приймач. На рис. 2 представлено запропонований алгоритм роботи сенсора БСМ.

Як правило, сенсор мережі функціонує циклічно, доки не закінчиться енергоресурс, тому представлений алгоритм не має завершення. Більшість досліджень у галузі підвищення енергоефективності вузла



Рис. 2. Алгоритм роботи сенсора бездротової сенсорної мережі

Збір даних – на зовнішній запит від базової станції сенсори зчитують показання з датчиків про параметри зовнішнього середовища або контрольованого об'єкта та відправляють на базову станцію. Моніторинг являє собою збір даних із певної періодичністю. Чергова ітерація збору даних може бути ініційована не тільки на запит від базової станції, а й за заданим розкладом, який зберігається локально у пам'яті сенсора. Як правило, на основі моніторингу в наступних приймається рішення про стан мережі або події подіях. Під функцією контролю мають на увазі моніторинг параметрів навколишнього середовища та подальшу їх перевірку на спрацювання заздалегідь певних умов. Спостереження – передача показань на головний модуль, якщо сенсор виявив конкретний об'єкт чи поведінку за заданим шаблоном. Формування керуючих команд – на основі отриманих із сенсорів показань приймається рішення про те, яку керуючу команду необхідно сформулювати для керованої системи. Для функцій моніторингу, контролю, стеження та формування керуючих команд потрібно на основі даних з вузлів БСМ приймати рішення про стан мережі або необхідну керуючу команду.

Тенденція нових розробок іде до того, щоб зберегти енергоресурси за рахунок зменшення кількості сеансів зв'язку між вузлами мережі. З іншого боку, завдання БСМ – своєчасно збирати дані про параметри навколишнього середовища та на їх основі приймати наступні рішення. У результаті, рішення, спрямоване на зменшення кількості сеансів зв'язку, створює технічну суперечність: «Зі збільшенням числа

БСМ мають характерну рису: запропоноване рішення є результатом пошуку компромісу між підвищенням енергоефективності мережі та зниженням якості інших параметрів мережі, таких як: своєчасність доставки повідомлень, простота реалізації комунікації та обробки інформації. Таким чином, досі залишається відкритим питання побудови алгоритмів передачі даних та обробки інформації в БСМ, що забезпечують одночасне підвищення енергозбереження, продуктивності та адаптивності мережі до довкілля.

Розглянемо п'ять основних напрямів функціонування БСМ (рис. 3).

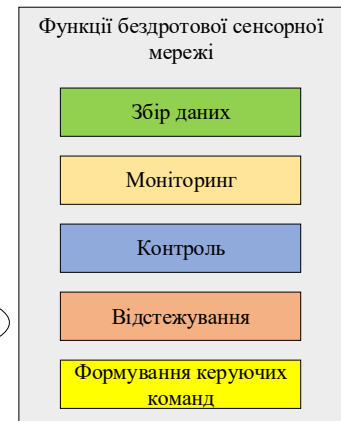


Рис. 3. Функції бездротової сенсорної мережі

передач даних збільшується енергоспоживання вузла мережі, що призводить до зменшення часу автономного термін служби сенсора, зі зменшенням кількості передач даних – збільшується ймовірність пропуску важливих подій, що може призвести до невірному ухвалення рішення».

Для вирішення даної технічної суперечності пропонується розробити алгоритм обробки інформації у БСМ, який з одного боку скоротить кількість сеансів зв'язку, тим самим підвищить енергоефективність вузла БСМ, а з іншого боку гарантуватиме, щоб головний модуль завжди володів необхідною інформацією про параметри довкілля для коректного прийняття рішення.

Для динамічного визначення частоти передач даних пропонується використовувати інформацію з бази знань, щоб сенсори самостійно ухвалювали рішення, коли необхідно передавати дані на базову станцію для загальної класифікації системи. Для реалізації цього алгоритму придатними є методи машинного навчання [14]. Дані методи спрямовані на створення математичної моделі процесу прийняття рішення на основі знань, отриманих з навчальної вибірки. Реалізація процесу ухвалення рішення про необхідність передачі даних на головний модуль має розташовуватися в логіці роботи вузла мережі, оскільки першоджерелом інформації є дані з датчиків, що знаходяться безпосередньо у складі вузла мережі. З іншого боку, для ухвалення рішення про передачу даних, можливо, знадобляться знання про процес класифікації, тобто дані про математичну модель прийняття рішення про стан мережі.

Аналіз існуючих застосувань [15,16] з використанням методів машинного навчання у роботі БСМ виявив, що часто такий підхід пов'язаний з тим, що ручне створення моделі ухвалення рішення є складним процесом, іноді навіть нездійсненним за рахунок різноманіття зовнішніх факторів, що впливають на результат, а також їх непередбачуваність у майбутньому. Отже, створення методів прийняття рішення в БСМ є трудомісткою операцією, вимагає адаптивної настройки параметрів алгоритму для виконуваної задачі. Можлива ситуація, коли модель має надто багато вхідних даних, в результаті процес прийняття рішення може бути занадто довгим і

задовольняти поставленим вимогам. Тому важливо генерувати модель, яка з одного боку надаватиме коректні результати прийняття рішення, а з іншого – має бути не надто складним, щоб час прийняття рішення було у допустимому інтервалі. У машинному навчанні для спрощення моделі використовують ймовірні підходи, які дозволяють знайти компроміс між складністю моделі та точністю прийнятих рішень. Тому найчастіше під час використання методів машинного навчання виконують попередній етап аналізу вхідних даних. Серед основних завдань машинного навчання (рис. 4) виділяють завдання регресії, класифікації, кластеризації, пошуку аномалій.



Рис. 4. Узагальнена класифікація методів машинного навчання

Для кожного завдання використовуються різні методи, ефективність яких залежить від типу вхідних даних та бажаного результату. Представлені методи дозволяють генерувати модель прийняття рішення шляхом навчання на раніше відомій вибірці даних та результатах їх обробки. У випадку з БСМ вхідними даними будуть параметри зовнішнього середовища, отримані з сенсорів, та результати ухвалення рішення про стан мережі. Отже, у цій роботі для завдання ухвалення рішення пропонується використати методи машинного навчання. Для цього на основі раніше відомих прецедентів (бази знань) буде отримано математичну модель, за допомогою якої надалі автоматично прийматиметься рішення, імітуючи роботу оператора. Завдання визначення стану в сенсорній мережі за даними із сенсорів відноситься до задачі класифікації. Найбільш популярними методами класифікації на даний момент є: а) k-найближчих сусідів; б) найкращий байєсівський класифікатор; в) метод опорних векторів; г) лінійна регресія; г) індукція правил (дерево рішень, випадковий ліс). Вибір методу класифікації залежить від показників вхідних даних (кількість параметрів, пропуски в даних), точності та повноти класифікації, часу навчання та перенавчання.

Велика кількість досліджень із завдання класифікації об'єктів представлено у галузі машинного

навчання, штучного інтелекту. Проведено аналіз методів машинного навчання з метою пошуку найбільш відповідної реалізації запропонованого алгоритму. Для ухвалення рішення про стан об'єкта використовуються різні моделі класифікації об'єктів, які широко представлені в галузі машинного навчання. Безліч розроблених методів класифікації об'єктів дозволяє обрати найбільш відповідний спосіб залежно від специфіки даних, їх кількості, необхідної точності та часу класифікації. Для вирішення поставленої задачі пропонується використовувати метод дерева рішень, оскільки він має ряд переваг: інтерпретованість моделі, робота з перепустками в даних.

У цьому алгоритмі процес класифікації вхідних об'єктів побудований на кон'юнктивних правилах, що складаються з безлічі предикатів за вхідними даними. Для цього на основі навчальної вибірки виконується побудова логічної схеми, що реалізує організовану систему ієрархічно послідовних питань. Процес класифікації полягає у почерговій відповіді на питання моделі, причому наступне питання залежить від попередньої відповіді. В результаті після відповіді на всі питання визначається єдиний клас, який і є відповіддю класифікації. Також є можливість для кожного предикату моделі зберігати ймовірність відповіді, тоді за неможливості відповісти питанням

(наприклад, за відсутності даних), обирається найбільш популярна відповідь, тим самим метод дозволяє оперувати з перепустками у вхідних даних. До недоліків даного методу відноситься неможливість перенавчання моделі, так як навчання використовується вся навчальна вибірка.

На алгоритми обробки інформації в БСМ накладають низку характерних обмежень, таких як розмір програмного коду через обмежений ресурс внутрішньої пам'яті, кількість виконуваних операцій для економії енергоресурсу.

Далі зробимо опис моделі дерева рішень для завдання класифікації БСМ.

Структура даних «дерево» є звичайним пов'язаним графом (без наявності циклів), у якого виділено кореневу вершину. Листком дерева називають вершину, яка не має нащадків. Шлях у графі "дерево" проходить від кореня до листа без повторення вершин. Дерево рішень представлено кореневим деревом, у вершинах якого містяться логічні правила, а листі – результати класифікації. Логічні правила містять умову у форматі «якщо... то... інакше...». Дерева рішень відмінно справляються із завданням багатокласової класифікації, тобто дозволяють визначати належність вхідного об'єкта до одного із заздалегідь відомих класів. Цільова змінна може мати категоріальні, дискретні та бінарні значення. Алгоритм класифікації стану мережі за допомогою дерева рішень являє собою процес перетворення вхідного вектора даних на результат класифікації. Для кожної вершини дерева використовуються дані вхідного вектору, щоб відповідати на поставлені запитання. У листі дерева розташовуються результати класифікації, і навіть розмір класу, щоб у разі пропуску даних обирати найбільш популярний клас.

Запитання, що знаходяться у вершинах дерева рішень, використовують виключно один параметр вхідного об'єкта та мають уявлення "значення параметра x_{nk} більше значення ...". При позитивній відповіді перехід здійснюється до правого нащадка, при негативному – до лівого. Якщо нащадок містить правило, знову виконується процес відповіді питання. Внаслідок відповідей на запитання досягається один із листів дерева, де міститься інформація про цільовий параметр. За рахунок прозорої інтерпретації роботи алгоритму цей метод має високу наочність.

Алгоритм побудови бінарного дерева рішень представлений на рис. 5. На першій ітерації алгоритму розглядається вся безліч вхідних даних, далі алгоритм повторюється рекурсивно для підмножин, отриманих при розбитті:

Крок 1. Перевірка умови виходу з алгоритму. При виконанні умови слід вибрати для поточного вузла (аркуша дерева) значення з множини Y (результат класифікації вхідного об'єкта), інакше переходимо до виконання кроку 2.

Крок 2. Множина даних S розбивається на 2 непересічні підмножини S_1 і S_2 за раніше встановленим критерієм мінімізації ентропії. Цей критерій виражений як функція $Qt(x)$, на вхід якої подаються різні розбиття множини S і виконується пошук максимальної якості розбиття (максимальне зменшення ентропії).

Крок 3. Для підмножин S_1 і S_2 алгоритм продовжує виконуватись рекурсивно, для цього кожна підмножина окремо передається до кроку 1.

Для функції розбиття зазвичай використовують формулу розрахунку ентропії, і на кожній ітерації алгоритму прагнуть її мінімізувати. Таким чином, досягається найменший розмір дерева рішень. Для зменшення розміру дерева застосовують спеціальні методи раннього завершення алгоритму, такі як обмеження по глибині дерева, мінімальну кількість об'єктів у множині S , мінімально-допустиму зміну значення ентропії.

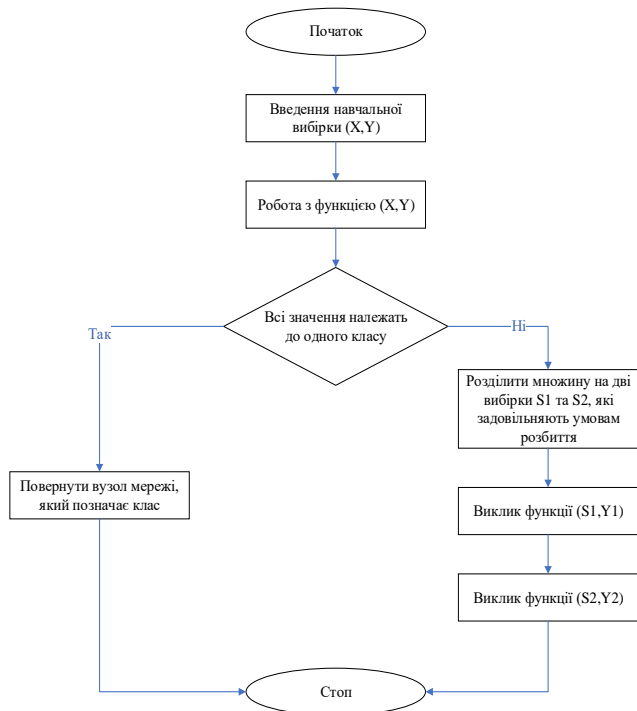


Рис. 5. Алгоритм побудови бінарного дерева рішень

В результаті використання даних методик зменшується ймовірність перенавчання моделі дерева рішень, що позитивно позначається на точності класифікації моделі, і навіть зменшується загальний розмір моделі. Спосіб розрахунку абсолютного значення енергоефективності пропонованого алгоритму досить складно висловити, оскільки підсумковий результат в основному залежить від динаміки параметрів довкілля. Для більш точної оцінки енергоефективності запропонованого адаптивного енергозберігаючого алгоритму необхідно мати дані щодо поведінки параметрів зовнішнього середовища.

Висновки

Розроблено алгоритми роботи сенсора БСМ та побудови бінарного дерева рішень, які можуть бути використані для підвищення енергозбереження функціонування вузлів в бездротових сенсорних мережах. Розглянуто методи машинного навчання. Вони дозволяють оперувати з безліччю структурованих даних, отримуючи з них знання в вигляді моделі, яку можна використовувати в майбутньому для ухвалення рішення. Для реалізації запропонованого алгоритму обрано метод дерева рішень. Вибір пов'язаний

з тим, що даний метод має високу інтерпретацію та схожий із процесом прийняття рішення оператором. Крім цього, дерева рішень дозволяють проводити класифікацію з пропусками у вхідних даних, що може досить часто відбуватися у сенсорних мережах. Грунтуючись на ідемпотентності предикатів дерева

рішень, пропонується скоротити кількість сеансів зв'язку за рахунок динамічного визначення частоти передачі. Таким чином, цей підхід дозволить позбутися постійної передачі даних бездротовим каналом зв'язку, тим самим буде зекономлено енергоресурси вузлів мережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Akyildiz, I. F., Weilian, S. A survey on sensor networks // *IEEE Communications magazine*. 2002. 40(8). P. 102–114. doi: 10.1109/MCOM.2002.1024422.
2. Abbas, I., Liu, J., Faheem, M., Noor, R. S. Different sensor based intelligent spraying systems in Agriculture // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. Volume 316. P. 1–16.
3. Alias, F., Carrie, J. C., Alsina-Pages, R. WASN-Based day–night characterization of urban anomalous noise events in narrow and wide streets // *Sensors*. 2020. 20(17) 26 p.
4. Chen, Y., Nasser, N. Energy-balancing multipath routing protocol for wireless sensor networks // *Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks*. New York: Qshine, 2006. Vol. 21. – P. 245–249. doi: 10.1145/1185373.1185401.
5. Das, K., Behera, R. N. A survey on machine learning: concept, algorithms and applications // *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2017. 5(2). P. 1301–1309.
6. Gao, T., Greenspan, D., Welsh, M., Juang, R. R., Alm, A. Vital signs monitoring and patient tracking over a wireless network // *Proceedings of the 27th IEEE EMBS Annual International Conference*. 2005. P. 66–74.
7. Huang, J.H., Amjad, S., Mishra, S. CenWits: A sensor-based loosely coupled search and rescue system using witnesses // *Proceedings of the Third Int. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys)*, San Diego, CA. 2005. P. 180–191.
8. Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network / Werner-Allen, G., Johnson, J., Ruiz, M., Lees, J., Welsh, M. // *Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks*, IEEE. Istanbul, 2005. 13 p.
9. Hardware design experiences in ZebraNet / Zhang, P., Sadler, C. M., Lyon, S. A., Martonosi, M. // *Proceedings of the SenSys'04*, Baltimore, MD. 2004. P. 227–238. Li Q.-L. (2016), “Nonlinear Markov processes in large networks”, *Special Matrices*, Vol. 4(1), doi: <https://doi.org/10.1515/spma-2016-0019>
10. Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D. Analysis of a Prediction-based Mobility Adaptive Tracking Algorithm // *Proceedings of the IEEE Second International Conference on Broadband Networks (BROADNETS)*, Boston. 2005. Vol. 1. P. 753–760
11. Yu, Z., Tsai J. J., Weigert T. An automatically tuning intrusion detection system // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. 2007. 37(2). P. 373–384.
12. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems / Raghunathan, V., Kansai, A., Hse, J., Friedman, J., Srivastava, M. // *Proceedings of the IPSN*. 2005. P. 457–462.
13. Second Generation System-on-Chip Solution for 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / RF4CE ZigBee [Electronic resource] // *Texas Instruments*. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2530.pdf>. 05.05.2023. 36 p
14. Pelckmans, K., Jos, D. B., Johan, A. S., Bart, D. M. Handling missing values in support vector machine classifiers // *Neural Networks* 18. 2005. №5-6. P. 684–692
15. Venkatesan, R., Meng, J. E. A novel progressive learning technique for multi-class classification // *Neurocomputing*. 2016. 207. P. 310–321.
16. Yu, Z., Tsai, J. J. P. A Framework of Machine Learning Based Intrusion Detection for Wireless Sensor Networks // *2008 IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing*. 2008. P. 272–279.

Received (Надійшла) 01.03.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.05.2023

Enhancement of energy saving of wireless sensor networks using machine learning methods

Artem Haptelmanov, Oleg Mikhal, Oleksii Schepka

Abstract. Topicality. Wireless sensor networks (WSN) are a promising branch of computer network development. The key idea of BSM is to automate the collection of information about the environment and controlled objects. WSN is especially useful where the presence of a person in the controlled area is impossible or the collection of information must be carried out for a long time. BSMs became widespread after the active development of modern microelectronics, wireless communication technologies and corresponding hardware. **The goal of this work** is the development and analysis of algorithms for increasing energy saving in wireless sensor networks using machine learning methods. **The object of research** is the duration of the operation of a node in a wireless sensor network. The subject of research is algorithms for increasing energy saving. **The subject of research** is algorithms for increasing energy saving. **Results.** In this paper, a method of simulation modeling of computer network traffic with fractal properties is proposed. The theory of fractal analysis and the theory of Markov processes were used to generate traffic. This method can be part of a software simulation model of a computer network, which in turn can be used for testing network algorithms and protocols. **Conclusions.** Algorithms for the operation of the WSN sensor and the construction of a binary decision tree have been developed, which can be used to increase the energy saving of the functioning of nodes in wireless sensor networks. Methods of machine learning are considered. They allow you to operate with a lot of structured data, obtaining knowledge from them in the form of a model that can be used in the future to make a decision. The decision tree method was chosen to implement the proposed algorithm. The choice is due to the fact that this method has a high interpretation and is similar to the process of decision-making by the operator. In addition, decision trees allow classification with gaps in the input data, which can happen quite often in sensor networks. Based on the idempotency of the predicates of the decision tree, it is proposed to reduce the number of communication sessions due to the dynamic determination of the transmission frequency. Thus, this approach will make it possible to get rid of the constant transmission of data through a wireless communication channel, thereby saving energy resources of network nodes.

Keywords: energy saving, wireless sensor network, node, machine learning, decision tree, classification.