

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКА В БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Безпроводні сенсорні мережі (БСМ) – розподілені мережі, що складаються з маленьких сенсорних вузлів, з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних.

Особливостями БСМ військового призначення є: особливості розміщення, покриття поля бою, змінна топологія, велика розмірність та ієрархічність, обмежені ресурси вузлів (ємність батарей, продуктивність процесора тощо), різномірний трафік (дані, відео).

В статті розглянуто існуючі моделі характеристик трафіка: модель відправки даних з постійною швидкістю CBR, модель з розподілом трафіка за законом Пуассона, модель з розподілом трафіка за законом Парето, а також більш складна модель „Включення – Відключення” з розподілом довжин інтервалів відповідно до розподілу Парето (для додатків стеження за ціллю, за умови, що рух цілі носить випадковий характер).

Аналіз моделей за допомогою імітаційного моделювання показав, що середня тривалість періодів відправки пакетів вузлами БСМ стеження за ціллю, яка випадково рухається, впливає на ступінь самоподібності і довготривалої залежності агрегованого на шлюзі трафіка в більшій мірі, ніж форма розподілу цієї величини і середньої тривалості періодів, коли пакети не відправляються.

Напрямоком подальших досліджень буде розробка гібридної моделі характеристик трафіка для БСМ стеження за ціллю, яка рухається випадковим чином.

Ключеві слова: безпроводні сенсорні мережі, моделі трафіка, агрегований трафік.

Білан А.Н., Жук А.В., Алексенко В.П., Сова О.Я. Анализ характеристик трафика в беспроводных сенсорных сетях военного назначения.

Беспроводные сенсорные сети (БСМ) – распределенные сети, состоящие из маленьких сенсорных узлов, с интегрированными функциями мониторинга окружающей среды, обработки и передачи данных.

Особенностями БСМ военного назначения являются: особенности размещения, покрытие поля боя, переменная топология, большая размерность и иерархичность, ограниченные ресурсы узлов (емкость батарей, производительность процессора и т.д.), разнородный трафик (данные, видео).

В статье рассмотрены существующие модели характеристик трафика: модель отправки данных с постоянной скоростью CBR, модель с распределением трафика по закону Пуассона, модель с распределением трафика по закону Парето, а также более сложная модель "Включение - Отключение" с распределением длин интервалов согласно распределению Парето (для приложений слежения за целью, при условии, что движение цели носит случайный характер).

Анализ моделей с помощью имитационного моделирования показал, что средняя продолжительность периодов отправки пакетов узлами БСМ слежения за целью, которая случайно движется, влияет на степень самоподобия и долговременной зависимости агрегированного на шлюзе трафика в большей степени, чем форма распределения этой величины и средней продолжительности периодов, когда пакеты не отправляются.

Направлением дальнейших исследований будет разработка гибридной модели характеристик трафика для БСМ слежения за целью, которая движется случайным образом.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, модели трафика, агрегированный трафик.

A.Bilan, A.Zhuk, V.Aleksenko, O.Sova Analysis of traffic characteristics in wireless military sensor networks.

Wireless sensor networks (BSM) - distributed networks consisting of small sensor nodes, with integrated functions of environmental monitoring, processing and data transmission.

Military-specific BSM features are: placement features, battlefield coverage, variable topology, large dimensionality and hierarchy, limited node resources (battery capacity, processor performance, etc.), heterogeneous traffic (data, video).

The following models are considered in the article: a constant speed CBR data sending model, a model with traffic distribution according to the Poisson law, a model with traffic distribution according to the Pareto law, as well as a more complex On / Off model with the distribution of interval lengths according to the Pareto distribution (for applications tracking the target, provided that the movement of the target is random).

The analysis of models using simulation showed that the average duration of the periods of sending packets by the BSM nodes to track a target that randomly moves affects the degree of self-similarity and the long-term dependence of the traffic aggregated on the gateway to a greater extent than the form of distribution of this value and the average duration of the periods when packets are not sent.

The direction of further research will be to develop a hybrid model of traffic characteristics for BSM tracking a randomly moving target.

Ключеві слова: wireless sensor networks, traffic models, aggregated traffic.

Постановка завдання в загальному вигляді

Безпроводні сенсорні мережі (БСМ) – розподілені мережі, що складаються з маленьких сенсорних вузлів, з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних.

Особливостями БСМ військового призначення є: особливості розміщення (детерміновано або випадково), покриття (бар'єрне, площі, цілі) поля бою, змінна топологія (щільність мережі, відмови вузлів, рівень „життя”), велика розмірність та ієрархічність, обмежені ресурси вузлів (ємність батарей, продуктивність процесора тощо), різномірний трафік (дані, відео). Ці та інші особливості визначають ключові вимоги до методів управління БСМ, які забезпечують різні цілі функціонування мережі (вузла) – покриття, моніторинг та передача всіх видів інформації із заданою якістю обслуговування з виконанням вимог щодо прийняття рішень в реальному часі, мінімальне завантаження мережі службовою інформацією, мінімізація використання вузлових та мережевих ресурсів (обчислювальних, енергетичних та ін.), оптимізація параметрів функціонування сенсорних вузлів та БСМ в цілому [1].

Вкрай актуальним є всебічне дослідження різних аспектів функціонування БСМ і, в тому числі, характеристик трафіка, виробленого в БСМ, а також створення адекватних моделей надходження трафіка від окремих сенсорних вузлів і БСМ в цілому.

Аналіз останніх публікацій.

В області дослідження трафіка БСМ існує ряд дослідницьких робіт, які умовно поділяються на два наукових напрямки.

Перша група робіт розглядає питання моделювання трафіка даних, який генерується окремими сенсорними вузлами без врахування транзитного трафіка.

У роботах [2 – 6] проаналізований трафік окремих сенсорних вузлів медичного призначення та стеження за цілями, які рухаються випадковим чином. Запропоновані аналітичні моделі характеристик трафіка таких вузлів, а саме, модель періодичної відправки пакетів, розміри яких мають нормальний розподіл, також модель “Включення-Відключення” з тривалістю інтервалів, які розподілені відповідно до закону Парето.

Друга група робіт стосується характеристик загального трафіка в БСМ. У ряді вітчизняних і зарубіжних робіт [2], [4], [7], [8] наводяться дослідження, що показують наявність властивостей самоподібності і довготривалої залежності агрегованого трафіка БСМ.

Проведений аналіз показав, що єдиної моделі характеристик трафіка, яку можливо використовувати для різного типу сенсорних мереж, не існує.

Метою статті є аналіз існуючих моделей характеристик трафіка сенсорних вузлів БСМ військового призначення.

Виклад основного матеріалу

В процесі вивчення трафіка БСМ важливим етапом є визначення моделі джерела трафіка. Для цього необхідно зібрати і проаналізувати трафік, який генерується та відправляється окремими вузлами реальної або змодельованої мережі, а потім підібрати математичну модель, яка апроксимує характеристики зібраних даних з достатнім ступенем точності.

Додатково, за посередництвом аналізу процесів, що відбуваються у вузлі мережі, може бути створена теоретична модель джерела трафіка, яку можна верифікувати шляхом порівняння теоретичної моделі з результатами вимірювань трафіка реального або змодельованого вузла.

Одна з проблем вивчення трафіка БСМ полягає в тому, що характеристики трафіка в таких мережах значною мірою залежать від додатків, або режиму роботи БСМ.

Всі різноманітні сценарії роботи БСМ з врахуванням трафіка, який генерується окремими вузлами (без врахування транзитного трафіка), можна поділити на три типи: періодична відправка даних Constant Bit Rate (CBR), відправка даних за запитом (on demand), відправка даних за подіями (event-driven).

Періодична відправка даних являє собою регулярні, через рівні інтервали часу, відправлення інформації, яка була зібрана сенсорним вузлом.

Передача даних за запитом передбачає, що сенсорний вузол ніколи сам не є ініціатором передачі даних і може самостійно передавати лише транзитну та службову інформацію, яка надходить від інших вузлів. У той же час, деяким центральним пристроєм обробки даних сенсорному вузлу можуть відправлятися запити інформації, і тільки в цьому випадку вузол ініціює відправку власних зібраних даних.

Передача даних за подіями передбачає, що дані відправляються з ініціативи сенсорного вузла, але тільки в тому випадку, якщо ці дані є в наявності, або досягли якихось граничних показників. Цей же тип відправки даних притаманний БСМ, які призначені для виявлення вторгнень, або стеження за ціллю: в таких мережах сенсорні вузли відправляють дані, тільки якщо відбулася подія появи будь-якого об'єкта в їх області сканування.

Передачу даних за запитом та за подіями можна вважати одним і тим же типом, якщо взяти до уваги, що відправка даних за запитом також відбувається внаслідок якоїсь події, тільки ця подія відбувається не в сенсорній області, а в пристрої, що є кінцевим споживачем даних.

Проаналізуємо існуючі моделі характеристик трафіка сенсорних вузлів БСС.

Модель характеристик трафіка для БСМ з періодичною відправкою даних (CBR)

Для БСМ, що використовують сценарій періодичної відправки даних, існує проста і інтуїтивно підходяща модель джерела трафіка – модель відправки даних з постійною швидкістю (CBR).

Модель передбачає, що вузол регулярно, через рівні проміжки часу T відправляє пакети даних фіксованого розміру N (рис. 1). При цьому загальна швидкість передачі пакетів становить N/T .

Протокол прикладного рівня сенсорного вузла створений таким чином, що ніякі зовнішні події, крім виключення сенсорного вузла, не можуть вплинути на періоди відправки даних. Всі додатки телеметрії, моніторингу навколишнього середовища найчастіше працюють саме за цим сценарієм.

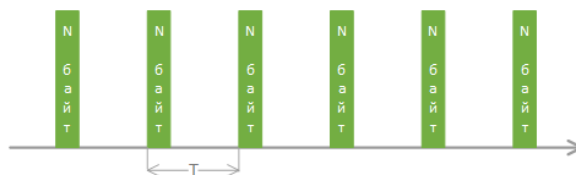


Рис. 1. Модель відправки даних з постійною швидкістю

Модель CBR підходить тільки для сценаріїв роботи БСМ, при яких дані відправляються через фіксовані інтервали часу і на відправку даних не впливають зовнішні події.

Переваги: простота та наочність використання.

Недоліки: не може бути використана в додатках БСМ з керованою подіями відправкою даних.

Модель характеристик трафіку для БСМ з відправкою даних за запитом

У багатьох сценаріях роботи БСМ моменти відправки даних, навпаки, залежать від якихось зовнішніх подій, які в загальному випадку є випадковими. Тому можна вважати, що і моменти часу, в які відбувається відправка пакетів, є випадковими величинами, що мають ті чи інші закономірності (рис. 2).



Рис. 2. Приклад непостійній відправки пакетів

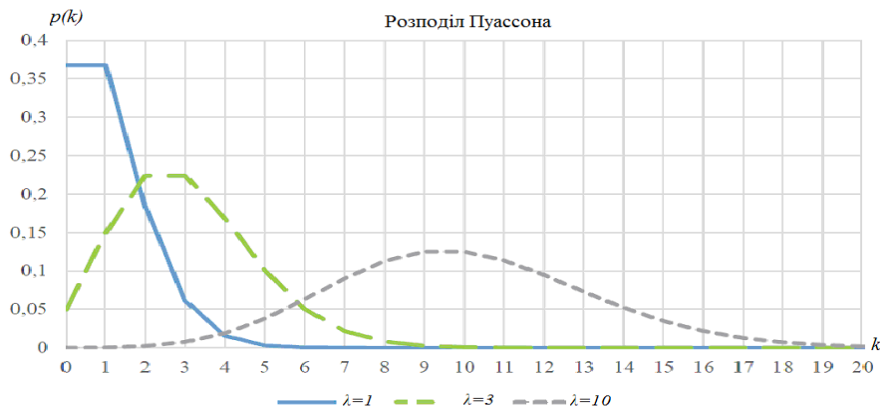
Для опису випадкових величин та їх закономірностей використовуються функції розподілу. При цьому, досить очевидно, що так як відправка пакетів сенсорними вузлами ініціюється зовнішніми подіями, то закон розподілу моментів відправки пакетів (або числа пакетів, відправлених в одиницю часу) збігається, або, принаймні, тісно пов'язаний з законом розподілу моментів часу, в які відбуваються ці зовнішні події (або законом розподілу числа подій, що відбуваються в одиницю часу).

В області телекомунікацій для моделювання випадкових процесів приходу заявок до недавнього часу широко використовувався дискретний розподіл Пуассона.

Розподіл Пуассона характеризує число незалежних між собою подій, що відбуваються в одиницю часу. Аналітичний вираз розподілу Пуассона задається наступною функцією ймовірності:

$$p(k) = P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda},$$

де λ – середня інтенсивність приходу заявок (математичне очікування X , як і середньоквадратичне відхилення, дорівнює λ), $k = 0, 1, 2, \dots$. Графік функції щільності ймовірності розподілу Пуассона при різних величинах λ (рис. 3).

Рис. 3. Функція щільності ймовірності розподілу Пуассона при різних значеннях коефіцієнта λ

Розподіл Пуассона з високою точністю апроксимує, наприклад, число викликів, що приходять на вузол телефонної мережі в одиницю часу, так як факти приходу викликів є незалежні події.

В деяких роботах для моделювання джерела трафіка БСМ використовується розподіл Пуассона [12 – 13], але без обґрунтування цього вибору.

Розподіл Пуассона, безумовно, може підходити для моделювання деяких типів джерел трафіка в БСМ. Наприклад, якщо сенсорний вузол відправляє дані за запитом, причому запит може приходити від декількох джерел, а процес відправлення запиту кожним із джерел випадковий і незалежний від інших джерел, то можна припустити, що ініційований таким потоком запитів потік даних від сенсорного вузла також може мати розподіл Пуассона.

Переваги: у випадках, коли постійне отримання інформації від всіх вузлів мережі некритично, такий підхід дозволяє ефективніше використовувати ресурси БСМ.

Недоліки: не може бути використана в інших додатках БСС, складність реалізації, дозволяє ефективніше використовувати ресурси БСМ.

Модель характеристик трафіку для БСМ з відправкою даних за подіями

Трафік БСМ стеження за ціллю часто має властивість „пачковості”: пакети мають тенденції збиратися в групи тривалої довжини (рис. 4).

У БСМ, які слідкують за ціллю, такі „пачки” пакетів виникають, якщо ціль деякий час знаходиться в зоні сканування будь-якого сенсорного вузла, і в цьому випадку вузол регулярно відправляє пакети з інформацією про це.

Після того, як ціль виходить із зони сканування даного вузла, він перестає відправляти пакети.



Рис. 4. Приклад прояву властивості „пачковості” трафіка

Ця властивість трафіка не може бути апроксимована розподілом Пуассона, так як розподіл Пуассона – так званий розподіл з коротким хвостом, основна маса подій в якому зосереджена близько до середнього числа пакетів, що приходять у фіксовану одиницю часу. Однак, для наведеного вище сценарію роботи, з урахуванням тривалих тимчасових інтервалів, протягом яких ціль відсутня поблизу сенсорного вузла, і останній не передає дані, середнє число пакетів, що відправляються в одиницю часу буде невелика в порівнянні з числом пакетів в одиницю часу у періоди, коли ціль знаходиться в зоні сканування сенсорного вузла.

Таким чином, на графіку частотного розподілу такого роду даних не буде спостерігатися, як у випадку з розподілом Пуассона (рис. 5) швидкого загасання функції при відхиленні від середнього значення.

Навпаки, навіть при значному відхиленні від середнього буде видно, що такі значення досить часто трапляються у вибірці. Подібні розподілу називають розподілами з довгими (або важкими) хвостами.

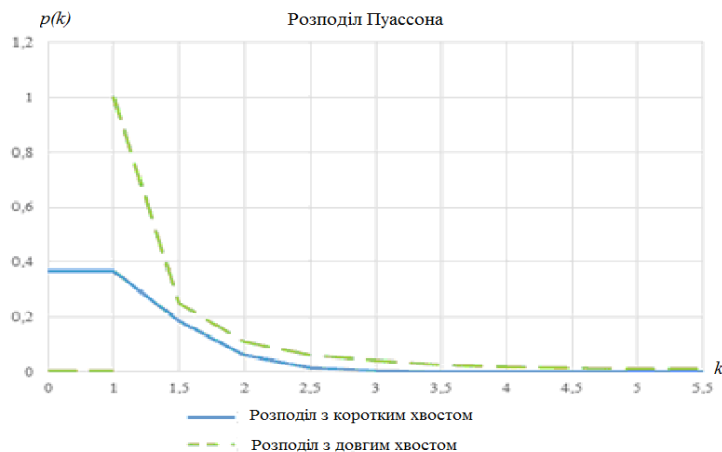


Рис. 5. Порівняння розподілів з довгим (важким) і коротким (легким) хвостами на прикладі розподілу Пуассона

Серед наявних в даний момент досліджень джерел трафіка в БСМ більшість містять дані про те, що розподіл Пуассона не підходить для апроксимації трафіка більшості сценаріїв БСМ і розподілу з новими властивостями, так чи інакше, повинні бути присутніми в моделях і апроксимації такого типу трафіка.

У дослідженні [3] запропоновано для БСМ стеження за ціллю та іншими подібними БСМ для моделювання джерела трафіка використовувати так звану модель „Включення-Відключення” (рис. 6). Модель „Включення-Відключення” являє собою послідовність інтервалів „Включення”, протягом яких сенсорний вузол передає пакети з постійною швидкістю (ціль присутня в зоні сканування сенсорного вузла) та інтервалів „Відключення”, протягом яких ніякі дані вузлом не передаються (ціль знаходиться за межами зони сканування сенсорного вузла).

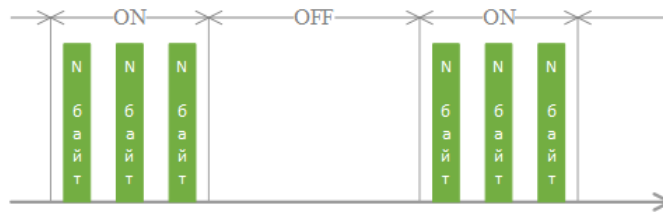


Рис. 6. Апроксимація „пачок” пакетів за допомогою „Включення-Відключення” моделі

При цьому в [3] за допомогою метода імітаційного моделювання було показано, що коли ціль рухається по сенсорній області випадковим чином, то довжини інтервалів „Включення” і „Відключення”, в загальному випадку, є випадковими величинами, які розподілені відповідно до узагальненого розподілу Парето. Ця модель використовується для моделювання трафіка шлюзу БСМ стеження за ціллю, яка рухається випадковим чином.

Очевидно, що характер трафіка сенсорних вузлів БСМ стеження за ціллю, в тому числі, і характер розподілу довжин інтервалів „Включення” і „Відключення” залежить від характеру і швидкості руху цілі.

Переваги: дозволяє ефективніше використовувати ресурси БСМ, підходить для додатків БСС стеження за ціллю.

Недоліки: складність реалізації не може бути використана в інших додатках БСС.

Дослідження характеристик агрегованого трафіка сенсорної мережі спостереження за ціллю

Розглянемо аналіз характеристик агрегованого трафіка (трафіка на шлюзі) БСМ та їх залежностей від різних параметрів архітектури, конфігурації і сценаріїв роботи БСМ.

Характеристики трафіка на шлюзі сенсорної мережі спостереження за ціллю: середня кількість пакетів в секунду і ступінь самоподібності отриманих даних.

Трафік даних і сигнальний трафік (дані маршрутизації, всі види підтверджень) розглядалися окремо, також обчислювалися характеристики сумарного трафіка.

Для аналізу характеристик трафіка на шлюзі БСМ пропонується модель, яка досліджує два параметра трафіка кількома різними методами.

В першу чергу, методом визначення середньої інтенсивності трафіка і середньоквадратичного відхилення цієї величини, аналізується середня інтенсивність трафіка на шлюзі сенсорної мережі.

На другому етапі аналізується ступінь самоподібності і довготривалої залежності трафіка двома методами: методом аналізу нормованого розмаху і локальним методом Віттл.

Опис імітаційної моделі

З ціллю дослідження характеристик агрегованого трафіка сенсорної мережі спостереження була створена імітаційна модель.

Спрощена модель БСМ складається з 24 сенсорних вузлів та 1 шлюзу (для збору даних). Сенсорні вузли та шлюз рівномірно розподілені по сенсорній області 30×30 метрів, шлюз розташований в центрі. Шлюз і всі сенсорні вузли стаціонарні (рис. 7).

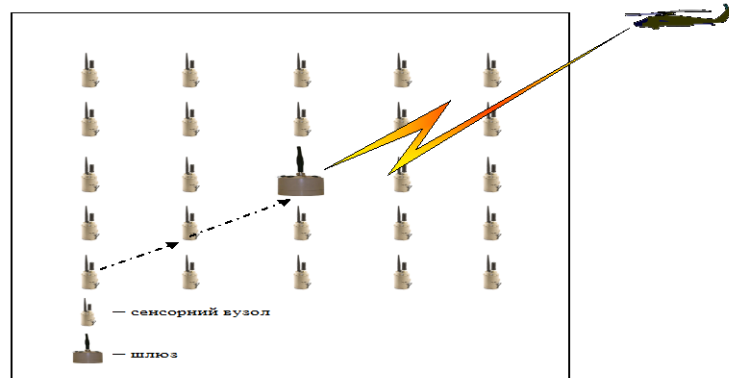


Рис. 7. Сенсорна область імітаційної моделі із розташованими на ній сенсорними вузлами (суцільні квадрати) і шлюзом (пунктирний квадрат)

На фізичному і каналному рівнях для передачі даних використовувався стандарт IEEE 802.15.4 (частота 2,4 ГГц). Область радіопокриття сенсорного вузла 15 – 20 метрів в діаметрі, що забезпечує можливість передачі інформації від будь-якого сенсорного вузла до шлюзу безпосередньо, або через один транзитний вузол.

Мережевий рівень – IP протокол (через обмеження пакета симуляції мереж NS2 замість більш типового 6loWPAN). Протоколу маршрутизації – AODV протокол.

На прикладному рівні були реалізовані дві моделі відправки трафіка:

а) моделювання випадкового руху цілі: модель „Включення – Відключення” з довжинами інтервалів „Включення” і „Відключення”, розподіленими відповідно до закону Парето. Середні значення довжин інтервалів „Включення” і „Відключення”, а також параметр форми розподілу α і швидкість передачі пакетів протягом інтервалу „Включення” в процесі дослідження змінювалися для з’ясування впливу даних параметрів на характеристики трафіка в мережі;

б) моделювання лінійного руху цілі – модель для БСМ стеження за лінійно рухомою цілю. У процесі дослідження змінювалася швидкість руху цілі, а також швидкість передачі даних протягом інтервалу „Включення”.

Для обох моделей була встановлена фіксована довжина одного пакета, переданого протягом інтервалу „Включення”, що дорівнює 20 байтам.

Імітаційна модель була реалізована за допомогою програмного пакета Network Simulator-2.

При імітаційному моделюванні були обрані значення за замовчуванням для параметрів моделі „Включення – Відключення” з довжинами інтервалів „Включення” і „Відключення”, розподіленими відповідно до розподілу Парето (таблиця 1).

Таблиця 1

Значення за замовчуванням для параметрів моделі „Включення-Відключення” з довжинами інтервалів „Включення” і „Відключення”, розподіленими відповідно до розподілу Парето

Параметр	Значення за замовчуванням
Тривалість інтервала „Включення”	10 секунд
Тривалість інтервала „Відключення”	50 секунд
Параметр форми розподілу Парето для інтервалів „Включення” і „Відключення”	1,6
Кількість пакетів, передаваних за секунду протягом інтервалу „Включення”	1 пакет за секунду

Кожен із зазначених в таблиці 1 параметрів в процесі моделювання змінювався (при збереженні незмінними інших параметрів) для визначення впливу даного параметра на підсумкові показники трафіка на шлюзі.

Результати моделювання. Виходячи з того, яка модель трафіка кожного сенсорного вузла використовувалася, моделювання було розділене на дві частини.

Для моделі „Включення – Відключення” з розподілом довжин інтервалів „Включення” і „Відключення” відповідно до розподілу Парето (підходящої для моделювання трафіка кожного сенсорного вузла при випадковому русі цілі) було показано, що значний вплив на сумарний трафік роблять такі параметри, як середня тривалість інтервалу „Включення” і середня тривалість інтервалу „Відключення”. Форма розподілу тривалостей інтервалів „Включення” і „Відключення”, навпаки, не має значного впливу на характеристики трафіка на шлюзі БСМ.

Виходячи з результатів даної частини імітаційного моделювання можна сформулювати наступні рекомендації, що стосуються планування БСМ: слід звертати увагу на параметри БСМ стеження за випадково рухається метою, які можуть впливати на тривалість інтервалів „Включення” (наприклад, швидкість руху цілі) і тривалість інтервалів „Відключення” (наприклад, число цілей). При коротких інтервалах „Відключення” і, особливо, тривалих інтервалах „Включення” слід очікувати не тільки зростання інтенсивності трафіка, що приходить на шлюз БСМ, але і збільшення ступеня самоподібності і довготривалої залежності цього трафіка, що може негативно позначитися на якості обслуговування в БСМ.

У другій частині імітаційного моделювання використовувалася розроблена автором модель трафіка сенсорних вузлів при лінійному русі цілі, заснована на моделі „Включення – Відключення”, в якій тривалості інтервалів „Відключення” мають розподіл з довгими хвостами, в той час як тривалості інтервалів „Включення” мають короткий лівий хвіст і практично відсутній правий хвіст.

Результати другої частини імітаційного моделювання показали, що для випадку лінійно рухомій цілі швидкість мети не має значного впливу на інтенсивність і ступінь самоподібності і довготривалої залежності трафіка, що надходить на шлюз БСМ.

Крім того, обидві частини імітаційного моделювання показали, що збільшення швидкості передачі даних протягом інтервалів „Включення” (числа переданих в секунду пакетів) значно збільшує не тільки інтенсивність трафіка, що надходить на шлюз БСМ, але і ступінь самоподібності і довготривалої залежності такого трафіка. Таким чином, передача даних зі швидкістю понад 160–320 біт/с (або одного-двох 20-байтних пакетів) може значно погіршити показники якості обслуговування БСМ.

Висновки

У даній роботі були розглянуті різні моделі трафіка даних, що генерується сенсорним вузлом, було показано, для яких типів додатків БСМ краще використовувати ті чи інші моделі трафіка.

Зокрема, були розглянуті моделі: СВР (відповідна для додатків телеметрії), модель з розподілом трафіка за законом Пуассона (яка може застосовуватися тільки дуже обмежена, для специфічних додатків і після попередньої перевірки), модель з розподілом трафіка за законом Парето (для додатків, генеруючих пачковий трафік), а також більш складна модель „Включення – Відключення” з розподілом довжин інтервалів „Включення” і „Відключення” відповідно до розподілу Парето (для додатків стеження за ціллю, за умови, що рух цілі носить випадковий характер).

Аналіз імітаційного моделювання показав, що середня тривалість періодів відправки пакетів вузлами БСМ стеження за ціллю, яка випадково рухається, впливає на ступінь самоподібності і довготривалої залежності агрегованого на шлюзі трафіка в більшій мірі, ніж форма розподілу цієї величини і середньої тривалості періодів, коли пакети не відправляються. Також в результаті аналізу даних імітаційного моделювання з’ясовано, що в порівнянні з відомими результатами про збільшення інтенсивності трафіка при збільшенні

швидкості передачі даних протягом інтервалу „Включення”, це збільшення призводить і до істотного зростання (до 60%) ступеня самоподібності і довготривалої залежності агрегованого на шлюзі трафіка.

Напрямок подальших досліджень буде розробка гібридної моделі характеристик трафіка для БСМ стеження за ціллю, яка рухається випадковим чином.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жук О.В. Методологічні основи управління перспективними неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами тактичної ланки управління військами. Тези доповідей та виступів учасників ІХ науково-практичної конференції [„Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”], (Київ, 2016 р.) / Жук О.В., Романюк В.А., Сова О.Я. –К.: ВІТІ, 2016. – С. 34 – 44.
2. Akyildiz, I.F. A Survey on Sensor Networks / I.F. Akyildiz, W.Su , Y.Sankarasubramaniam , and E.Cayirci // IEEE Communications Magazine. – August 2002. – Vol. 40. – N 8. – 102–114 pp.
3. Wang, Q. Source traffic modeling in wireless sensor networks for target tracking / Q. Wang, T. Zhang // In Proc. of the 5th ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad-Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN'08). – 2008. – 96 – 100 pp.
4. Wang, P. Spatial Correlation and Mobility-Aware Traffic Modeling for Wireless Sensor Networks / P. Wang, I.F. Akyildiz // IEEE/ACM Transactions on Networking. – December 2011. – Vol. 19. – N 6. – 1860–1873 pp.
5. Zhang, X. Bluetooth Simulations for Wireless Sensor Networks using GTNetS / .X. Zhang, G.F. Riley // Proceedings of the IEEE Computer Society’s 12th Annual International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS’04). – 2004. – 375 – 382 pp.
6. Messier, G. Traffic Models for Medical Wireless Sensor Networks / G.G. Messier, I.G. Finvers // IEEE Communications Letters. - January 2007. – Vol. 11. – N 1. – 13 – 15 pp.
7. Кучерявый, А.Е. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета / А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов, Е.А. Кучерявый. – Москва: ФГУП ЦНИИС, 2008. – 151 – 176 с.
8. Кучерявый, А.Е. Сети связи следующего поколения / А.Е. Кучерявый, А.Л. Цуприков. – Москва: ЦНИИС, 2006.
9. Koucheryavy, A. Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Telemetry Applications / A. Koucheryavy, A. Prokopiev // Lecture Notes in Computer Science: Proceedings of the 11th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking. – 2011. – Vol. 6869. – pp. 287 – 294 pp.
10. Koucheryavy, A. Ubiquitous Sensor Networks Traffic Models for Medical and Tracking Applications / A. Koucheryavy, A.Vybornova // Lecture Notes in Computer Science: In Proceedings of the 12th International Conference Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking. – 2012. – Vol. 7469. – pp. 338 – 346 pp.
11. Wang, P. Spatial Correlation and Mobility-Aware Traffic Modeling for Wireless Sensor Networks / P. Wang, I.F. Akyildiz // IEEE/ACM Transactions on Networking. – December 2011. – Vol. 19. – N 6. – 1860 – 1873 pp.
12. Tang, S. An analytical traffic flow model for cluster-based wireless sensor networks / S. Tang // Proceedings of the 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing. – 2006.
13. Tseng, H.W. An energy consumption analytic model for a wireless sensor MAC protocol / H.W. Tseng, S.H.Yang , P.Y. Chuangi , E.H.K. Wu , and G.H. Chen // in Proceedings of the IEEE 60 th –Vehicular Technology Conference. – 2004. – Vol. 6. – 4533 – 4537 pp.