

УДК 621.382

Довженко Н.М., к.т.н.; Домрачева К.О., к.т.н.; Ільїн О.О., д.т.н.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Dovzhenko N.M., Domracheva K.O., Ilin O.O. Development of the mathematical model of functioning of the sensor networks.

This article is about the main criteria for the functioning of sensor networks. The need to increase the network lifetime by using routing protocols is emphasized. This will allow the energy remaining in the nodes to calculate the best routes for the transfer of data arrays between the nodes. At the same time, the level of failures may increase proportionally. In turn, this can lead to the isolation of other nodes. To avoid this, or at least to continue the connectivity of all components of the network, you need to increase the number of nodes. However, in this case, it is necessary to coordinate the work of protocols, which previously satisfied the conditions of the connectivity of all components of the network. The mathematical model of connectivity has to be presented and border effects to be taken into account in sensory networks.

Keywords: sensor networks, sensor nodes, international standards, fault tolerance, mathematical model, reliability, telecommunication network.

Довженко Н.М., Домрачева К.О., Ільїн О.О. Розробка математичної моделі функціонування сенсорної мережі.

В даній статті приділено увагу головним критеріям функціонування сенсорних мереж. Підкреслено необхідність збільшення часу життя мережі за рахунок застосовувати протоколів маршрутизації. Це дозволить використовувати енергію, що залишається у вузлах для обчислення оптимальних маршрутів, а також збільшити кількість вузлів в мережі. При цьому рівень відмов може пропорційно збільшитися, що в свою чергу може призвести до ізоляції інших вузлів.

Ключові слова: сенсорні мережі, інтелектуальні датчики, міжнародні стандарти, відмовостійкість, математична модель, надійність, телекомунікаційна мережа.

Довженко Н.М., Домрачева К.А., Ильин О.А. Разработка математической модели функционирования сенсорной сети.

В данной статье уделено внимание главным критериям функционирования сенсорных сетей. Подчеркнута необходимость увеличения времени жизни сети за счет использования протоколов маршрутизации. Это позволит использовать энергию, которая остается в узлах для вычисления оптимальных маршрутов и добавит большее количество узлов в сеть. При этом уровень отказов может пропорционально увеличиться, что в свою очередь может привести к изоляции других узлов.

Ключевые слова: сенсорные сети, интеллектуальные датчики, международные стандарты, отказоустойчивость, математическая модель, надежность, телекоммуникационная сеть.

Вступ

Сенсорні мережі являються однією із найбільш актуальних та перспективних технологій для широкого впровадження. Порівняно недорогі компоненти мережі, а саме – сенсорні датчики, в значних кількостях об'єднані між собою в безпроводову мережу. Далі отримують можливість прямого підключення до мережі зв'язку загального користування чи до мереж наступного покоління зі оптичними складовими. Шляхом використання обчислювальних пристроїв надається доступ до значного набору послуг, таких як: контроль, управління будинками, обладнанням, підприємствами, супутниками, автомобілями тощо. І все через те, що успіхи в області обчислювальної та комунікаційної технології дали змогу інтегрувати зондування, розробити інтерфейси безпроводового зв'язку та впровадити використання мікропроцесорів в крихітні пристрої, що дозволяють обчислювати великі об'єми даних зі значними потужностями в довільних середовищах.

© Довженко Н.М., Домрачева К.О., Ільїн О.О., 2018

В сенсорних мережах можна використовувати велику кількість вузлів, що, в свою чергу, окрім функціональності мережі, призводить до зниження надійності мережі в цілому. Разом з тим, існують певні обмеження щодо можливої відстані для передачі інформації по бездротових каналах зв'язку [1]. Із цього випливає, що з великою ймовірністю, рано чи пізно виникатимуть відмови вузла, що призведе до ізоляції інших вузлів. Щоб уникнути цього, або, принаймні, забезпечити зв'язність мережі під час впливу на неї потоку відмов, необхідно влаштувати більше число вузлів на певній ділянці.

1. Узагальнені критерії функціонування сенсорної мережі

Через наявність зв'язності між інтелектуальними датчиками та сенсорними вузлами, виникає цілий ряд ключових особливостей, які повинні бути враховані при проектуванні такої мережі та розгортання її в реальних обставинах.

До головних критеріїв, які описують сенсорні мережі можна віднести наступні:

1. Сенсорна мережа повинна бути безпроводовою;
2. Сенсорна мережа складається з тисяч сенсорів (вузлів мережі) з будь-якою зоною покриття і виконує будь-які покладені на неї завдання;
3. Сенсори, що входять в мережу повинні самоорганізовуватися в безпроводову мережу, здатну передавати довільну інформацію між двома будь-якими сенсорами мережі, причому з необхідною швидкістю передачі;
4. Сенсорні вузли повинні споживати незначну кількість енергії, адже працюють протягом значного проміжку часу;
5. Сенсорні вузли повинні оперативно реагувати, бути непомітними, зручними в експлуатації та мати низьку вартість.

На сьогодні лише частка сенсорних мереж можуть бути порівняні із зазначеним вище вимогам [2]. Сенсорні мережі складаються з сотень сенсорів, але при цьому, вони мають обмежену зону покриття, здатні виконувати незначну кількість завдань. Сенсорні вузли можуть передавати лише певний, узгоджений тип інформації від одного датчика до іншого, і тільки в заданій смузі пропускання.

Споживання енергії також не можна назвати малим – заряду батареї вистачає всього на кілька днів. На жаль, технології енергоживлення та зберігання даних розвиваються не так швидко. Крім вдосконалення джерел енергоживлення та скорочення енергоспоживання апаратури дослідження в цій галузі включає збір енергії з навколишнього середовища, розробку більш ефективних алгоритмів керування енергоспоживанням і методів оптимізації використання елементів живлення. Крім того, в сенсорних мережах, для продовження часу життя мережі можна застосовувати протоколи, що дозволяють використовувати енергію, що залишилася у вузлах, для обчислення оптимальних маршрутів для передачі масивів даних між вузлами.

При цьому рівень відмов може пропорційно збільшитися. Можна припустити, що з великою ймовірністю рано чи пізно виникатимуть помилки роботи вузла. В свою чергу, це може призвести до ізоляції інших вузлів. Щоб уникнути цього, або принаймні продовжити зв'язність усіх компонентів мережі, необхідно збільшити кількість вузлів. Проте в цьому випадку потрібно узгодити роботу протоколів, які раніше задовольняли умови зв'язності усіх компонентів мережі. Для цього необхідно представили математичну модель зв'язності [3].

2. Модель зв'язності вузлів сенсорної мережі

Припустимо, що вузли сенсора рівномірно розподілені на плоскій поверхні. Радіус зв'язку постійний. Передбачається, що він незалежно від місця розташування або сусідів вузла, також не враховує екологічні втручання. Крім того, вузли не адаптують свою потужність передачі. Знехтуємо так звані «прикордонні ефектами», оскільки вони суттєво не впливають на результати. Кожна реалістична область розгортання обмежена. Вузли, розташовані поблизу кордону області розгортання, мають, наприклад, менше сусідів,

ніж вузли, розташовані далі від кордону. Таким чином, виникне певна помилка, якщо така формула буде застосована в реалістичному контексті.

Зазвичай модель розгортання для мереж датчиків вважається випадковою, тобто вузли розподілені випадковим чином на площині в обмеженій області, наприклад, квадрат або кола [4]. Найчастіше передбачається рівномірний випадковий розподіл. Ця математична модель складається з сенсорних вузлів A та B .

Для області розгортання з довжиною сторони w ми можемо розглянути лише вузли, розташовані в квадраті, визначеному (R, R) (верхній лівий кут) та $(w - R, w - R)$ (нижній - правий кут), де R - радіус зв'язку вузлів. Вважається, що вузли мають інше значення, залежно від того, є вони внутрішніми вузлами чи зовнішніми вузлами.

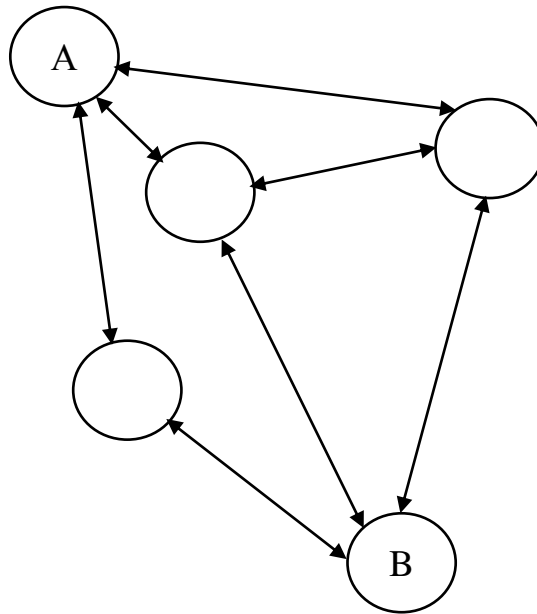


Рис.1. Математична модель зв'язності

З точки зору проектування, вузли, близькі до кордону, зазвичай не є цінними, ніж внутрішні вузли. Ця оцінка ґрунтується на наступному спостереженні. Зовнішні вузли менш щільно пов'язані і, отже, беруть участь у меншій кількості так званих “бесід”, ніж внутрішні вузли. Якщо область розгортання недоступна, зовнішні вузли також можуть служити точкою входу в мережу. Виникає проблема вирішення оптимізаційної задачі і вибору цільової функції $\Phi(\cdot)$. Такі рішення не мають спільних алгоритмів, і тому необхідно розглянути конкретні ситуації, які можуть та виникають в сенсорних вузлах [5]. Для цього необхідно розробити математичну модель функціонування сенсорних мереж.

3. Математична модель функціонування сенсорних мереж

Модель функціонування сенсорних мереж містить в собі наявність певних характеристик, наприклад швидкість передачі даних або вікна перевантаження. Згідно деякого адаптивного алгоритму, модель має вигляд системи рівнянь з деякими умовами та обмеженнями, що змінюють свій стан в дискретні моменти часу.

Якщо розглядається алгоритм TCP/IP, то складається відповідна система рівнянь, що описує в динаміці зміну керованих характеристик черг потоків даних на маршрутизаторах. Динаміку TCP з неоднорідним часом кругового обертання описує наступна модель [6].

Припустимо, що у кожного i -го джерела різні швидкості передачі даних, а i -м джерелом являє собою випадковий процес $X_{i,j}X(t_{i,j})$, де I – номер моменту коригування процесу, який здійснюється за рахунок зворотного зв'язку, $t_{i,j}$ – послідовність моментів часу, коли процес коригується. Відповідно до протоколу, збільшення швидкості, якщо немає втрат

пакетів дорівнює стану K_i одиниць, якщо ж є втрати, то відбувається спадання в k_i раз. Таку модель можна описати рекурентним співвідношенням:

$$X_{i,n+1} = X_{i,n} + K_i \chi(N_{i,n} = 0) - k_i X_{i,n} \chi(N_{i,n} > 0), \quad (1)$$

де $N_{i,j}$ – число втрачених пакетів за час $t_{i,j+1} - t_{i,j}$, $\chi(N)$ – індикатор множини випадкових ситуацій корекції [3]. Така математична модель може бути зведена до стохастичної рекурсивної процедури з дискретним часом виду:

$$X_{i,n+1} = X_{i,n} + \mu_{i,n} M_{i,n}(X_{i,n}, \xi_{i,n}), \mu_n > 0, i = 1, \dots, S, n \geq 0 \quad (2)$$

де $\xi_{i,n}$ – випадкова послідовність, $M_{i,n}$ – дійсна функція, $\mu_{i,n}$ – деяка послідовність позитивних чисел, яка прирівнюється до розмір кроку. З теорії алгоритмів відомо, що коефіцієнт $\mu_i > 0$ визначає величину кроку дискретизації, тому її ще називають кроковим коефіцієнтом (в більшості випадків, $\mu_i = \mu$). Від вибору коефіцієнта залежить стійкість рекурсивної процедури (і виконання умови $i \rightarrow \infty$)

Даний коефіцієнт повинен відповідати наступним умовам:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \mu_i \rightarrow \infty, \sum_{i=1}^{\infty} \mu_i^2 < \infty, \mu_i > 0. \quad (3)$$

Для безперервного проміжку часу ці умови мають вигляд:

$$\int_{\infty}^{\infty} \mu(t) \rightarrow \infty, \int_{\infty}^{\infty} \mu^2(t) < \infty, \mu(t) > 0. \quad (4)$$

У дослідженнях науковців, управління потоків в мережних технологіях (2) часто подається у вигляді:

$$x_{i+1} = (1 - \mu_i)x_i + \mu_i y_i$$

де y_i – це вимір (спостереження) параметра x_i .

$$y_i = x_i + \xi_i, \quad (5)$$

де ξ_i – похибки вимірювання, які часто апроксимуються випадковим процесом, наприклад Гаусів шум. Класичний вид рекурсивної процедури (2), (3) для математичної моделі у формі алгоритму Робінса-Монро має вигляд:

$$x_{i+1} = x_i + \mu_i [y_i - x_i]. \quad (6)$$

У технічній літературі рівняння (5) називають рівнянням спостереження, а (6) – рівнянням оцінки випадкової величини x_i , визначеної за критерієм мінімуму середніх втрат (оцінки середньої помилки).

У рівняннях (3), (4), (5) не враховані важливі механізми, пов'язані з наявністю зворотніх зв'язків, що обмежують перевантаження працездатності сенсорних вузлів. Така процедура обмеження здійснюється за протоколом AQM-RED при відповідному присвоєнні прапорців пакетам [7].

При описі математичної моделі було припущено, що існує ймовірність P_m для m -го каналу і було відзначено фіксований момент t . З урахуванням процесу маршрутизації необхідно було отримати систему диференціальних рівнянь у вигляді:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_i} \{K_i - (K_i + k_i x_i) [1 - \prod_{i:T_i} (1 - P)^{x_i \tau_i}]\}, \quad (7)$$

де τ_i – середній час, який представлений сукупністю шумів та затримок у прямому і зворотньому каналах. Система диференціальних рішень (7) може бути спрощена для випадку малого навантаження, коли $p < (0.1 \dots 0.2)$ при цьому рівняння зводиться до вигляду:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = k_i [w_i - x_i(t) \sum_{m=1}^M R_{mi} p_m (\sum_{s=1}^S R_{ms} x_s(t))]. \quad (8)$$

Таким чином, середні швидкості передачі даних і середні характеристики черг на маршрутизаторах можуть бути описані системою нелінійних диференціальних рівнянь і рівняннями зв'язку між складовими компонентами – сенсорними вузлами. Відповідна система диференціальних рівнянь може бути вирішена чисельно і перевірена моделюванням.

Висновки

Таким чином в статті було розроблено математичну модель функціонування сенсорної мережі, яка являє собою систему рівнянь, де в якості фіксованого стану обрана швидкість передачі даних джерелом у відповідному каналі з урахуванням наявності моментів коригування, втрат пакетів і випадкових впливів, що діють в цих каналах. При дослідженні сенсорних мереж важливим залишається питання надійності та відмовостійкості складових компонентів.

Список використаної літератури

1. Sohraby K. Wireless sensor network. Technology, protocols, and application / K. Sohraby, D. Minoli, T. Znati. - L.: Wiley, 2007. - 139 p.
2. McGrath M. Sensor Technologies: Healthcare, Wellness and Environmental Applications / Michael J. McGrath, Clodhna Ni Scanaill. - L.: Wiley, 2013. - 336 p.
3. Marcelloni F., Vecchio M. A simple algorithm for data compression in wireless sensor networks. Communications Letters, IEEE, 2008, 12.6. – Pp. 411-413.
4. Christian Bettstetter and Johannes Zangl. How to Achieve a Connected Ad Hoc Network with Homogeneous Range Assignment: An Analytical Study with Consideration of Border Effects. In 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communication Networks. IEEE, 2002.
5. Су Цзюнь. Повышение эффективности передачи данных в беспроводных сенсорных сетях на основе многопутевой маршрутизации / Су Цзюнь, В.В. Яцкив, А.О.Саченко // Физика, математика, информатика. Вестник Брестского государственного технического университета, Брест.– 2010. – № 5 (650). – С. 21 – 24.
6. Тужилкин О.В., Ульянин Н.С. Методы оценки эффективности работы беспроводной сенсорной сети. Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. – № 130.5. – С.28-32.
7. ДСТУ ISO/IEC TR 13335-1: 2003 Інформаційні технології. Настанови з керування безпекою інформаційних технологій. Частина 1.

Автори статті

Довженко Надія Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Домрачева Катерина Олексіївна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри телекомунікаційних систем та мереж, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Ільїн Олег Олександрович – доктор технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Authors of the article

Dovzhenko Nadiia Michailivna – candidate of Science (technic), Associate Professor of the Department of Information and Cybersecurity, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Domracheva Kateryna Oleksiivna – candidate of Science (technic), Senior Teacher of the Department of Telecommunication and networks, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Oleh Ilin Oleksandrovych – doctor of Science (technic), Associate Professor of the Department of Computer science, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 01.11.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Вишнівський