

МЕТОДИ САМООРГАНІЗАЦІЇ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

В статті наведено, що сучасний рівень розвитку безпроводних технологій телекомунікацій створює передумови для впровадження та широкого поширення самоорганізованих Ad-Hoc TA Mesh мереж. Сформовано основні принципи самоорганізації мереж та описано кілька варіантів розрахунку вартості шляху маршрутизації. Наведені приклади побудови самоорганізованих безпроводних сенсорних мереж. Також представлені різновиди топологій безпроводних сенсорних мереж, їхні недоліки та переваги.

Ключові слова: самоорганізація, безпроводна сенсорна мережа (БСМ), Ad-Hoc мережі, Mesh-мережі.

Вступ і постановка задачі

Безпроводна сенсорна мережа (БСМ) - це розподілена, самоорганізована і стійка до відмови мережа з великою кількістю автономних вузлів, здатних обмінюватися повідомленнями і ретранслювати їх за допомогою безпроводної технології.

Існує велика безліч різних протоколів маршрутизації БСМ. Ієрархічні протоколи (наприклад, LEACH, PEGASIS, TEEN and APTEEN, SOP) об'єднують вузли в кластери, з певною ієрархією. Вони спрямовані на збільшення енергозбереження мережі в поєднанні з оптимальною доставкою даних до базової станції, шляхом об'єднання вузлів в кластери (області).

Вона здатна без специфічного впливу ззовні формувати просторову, тимчасову або функціональну структуру, тобто самостійно змінює свої структуру і організацію на основі принципу структурно-функціональної єдності.

Можна виділити наступні принципи самоорганізації:

- 1) Відсутність нав'язуючого, який диктує зовнішній вплив на систему;
- 2) Самостійний вибір дій з можливих варіантів елементами системи.

Застосування самоорганізації мережі дозволяє скоротити час, дії, енергію, що витрачаються для збору інформації від вузлів і їх подальшого конфігурації.

Безпроводну сенсорну мережу можна представити у вигляді безлічі вузлів:

$$N = \{n_1, n_2, \dots, n_{N_{all}}\} \quad (1)$$

де N_{all} - загальна кількість вузлів БСМ без урахування типу пристроїв, яку можна визначити як:

$$N_{all} = \sum_{i=1}^n N_i \quad (2)$$

де N_i – і вузол БСМ.

Підхід при виключенні маршрутизаторів характерний для тимчасової мережі, де кожен пристрій може взаємодіяти з будь-яким іншим пристроєм, що знаходиться в межах його радіуса дії [10].

Беручи до уваги, що БСМ складається з кінцевих пристроїв, роутерів і координатора, безліч може бути розбите на три підмножини, які об'єднують всі три типи пристроїв в БСМ:

$$N \subset K, N \subset R, N \subset E, \quad (3)$$

де K – підмножина координаторів в мережі;

R – підмножина роутерів в мережі;

E – підмножина кінцевих пристроїв в мережі.

Відповідно, загальна кількість вузлів в мережі:

$$N_{all} = \sum_{i=1}^n N_i = \sum_{j=1}^k N_j + \sum_{l=1}^r N_l + \sum_{s=1}^e N_s, \quad (4)$$

де k – кількість координаторів в мережі, згідно специфікації IEEE 802.15.4,

$k = 1$ – константа;

r – кількість роутерів в мережі;

e – кількість кінцевих пристроїв в мережі;

N_j – j -й координатор в безпроводній сенсорній мережі;

N_l – l -й роутер в мережі;

N_s – S -й крайовий вузол в мережі.

Використовуючи багаторівневий підхід при декомпозиції мережі, можна виділити три рівня ієрархії її структури: рівень координатора, рівень маршрутизатора, рівень кінцевих пристроїв.

Об'єднання вузлів БСМ в кластер утворює простий граф (Рис. 1) в двовірному просторі.

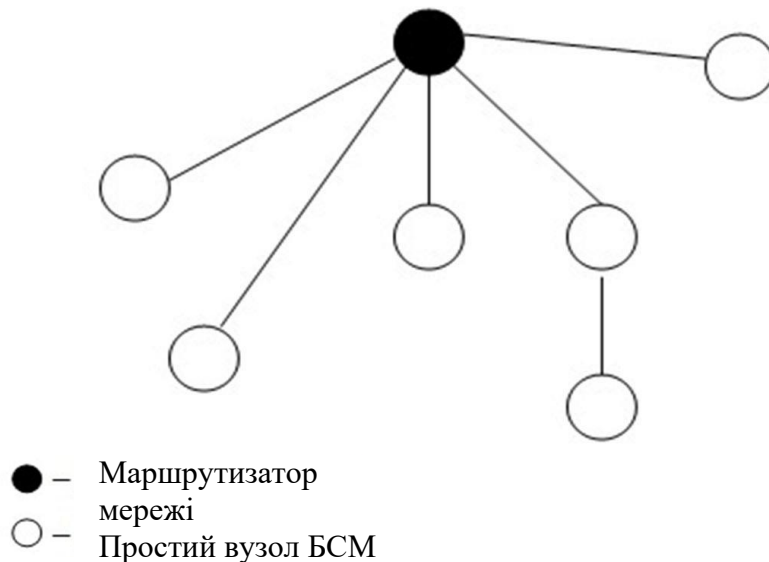


Рис.1. Підмножина вузлів, об'єднаних в простий граф

При організації такої мережі потрібно буде вирішити ряд нетривіальних завдань. Розглядаючи функціонування цієї мережі на цілком конкретному просторі, можливо установила, що число терміналів і/або вузлів в ній випадково і в загальному випадку коливається від 0 до N . Крім того, взаємозв'язок між терміналами і/або вузлами також випадковий, і кожен термінал і /або вузол знаходиться в межах зони дії мережі випадковий час. При цьому в такій мережі термінали і або вузли повинні не тільки самі зазначити про входження на територію, а й організувати взаємодію з іншими терміналами і/або вузлами, наприклад, найближчими до них в даний момент. Мережа повинна як би самоорганізуватися в різні проміжки часу з випадковим числом терміналів і/або вузлів і з випадковими взаємозв'язками між ними [1].

Такі мережі називаються самоорганізації і поділяються в даний час на цільові (Ad Hoc) і коміркові (Mesh). Основна відмінність між Ad Hoc і Mesh мережами складається в тому, що, як правило, Ad Hoc відноситься до термінальної мережі, а Mesh - до транзитної, хоча розподіл це досить умовно.

Ad Hoc-мережі такі безпроводні локальні мережі WLAN (Wireless Local Area Network) сімейства стандартів IEEE 802.1x (комерційна назва Wi-Fi – Wireless Fidelity), які можуть функціонувати в декількох режимах, при цьому в одному з них (неінфраструктурному) без наявності точки доступу (AP - Access Point). У цьому режимі з'являється можливість

спільного функціонування терміналів між пербоями без наявності будь-якої стійкої інфраструктури мережі, що і дозволяє реалізувати принципи Ad Hoc-мережі. На рис. 2 і 3 зображені відповідно інфраструктурна та неінфраструктурна мережі Wi-Fi, що ілюструють підхід до побудови Ad Hoc-мережі [1].

Останнє стає можливим внаслідок ширококомовного характеру реалізації процедури

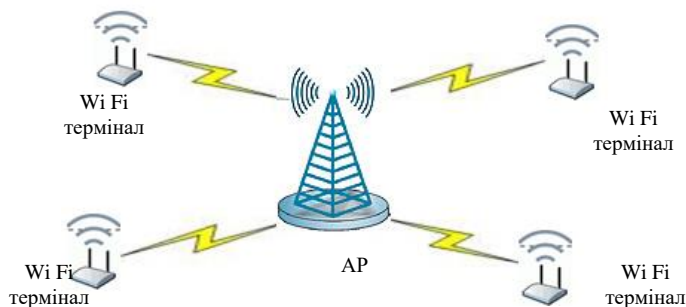


Рис. 2. Інфраструктурна мережа Wi Fi

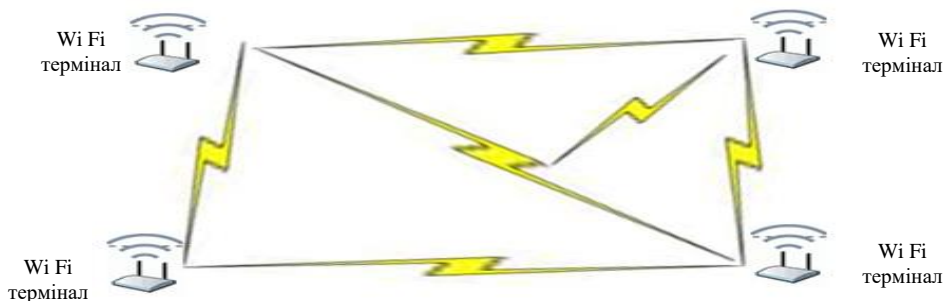


Рис.3. Неінфраструктурна мережа Wi Fi

доступу до середовища MAC (Medium Access Control) в стандартах серії IEEE 802.1х. Алгоритм функціонування RTS / CTS (Request to Send / Clear to Send), забезпечує ширококомовну процедуру передачі інформації і сприяє зниженню ймовірності колізій. При цьому інформацію сприймає тільки той термінал, який має відповідну адресу. Чи існує цей термінал в даний час в мережі чи ні, не так важливо для функціонування Ad Hoc-мережі - головне, щоб його адреса була в списку адрес цієї мережі.

Для запобігання колізій в IEEE 802.11х використовується добре відома процедура множинного доступу з детектуванням несучої і попередженням колізій CSMA / CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Таким чином, на технологіях стандартів IEEE 802.1х можуть бути організовані Ad Hoc-мережі.

Маршрутизація в мережах здійснюється децентралізованим способом. ZigBee-мережі є здатними до самоорганізації, після включення координатора мережі і вибору первинних налаштувань всі інші пристрої можуть підключатися самостійно.

Комірчаста маршрутизація підтримується на рівні координатора і маршрутизаторів. Прикінцеві пристрою не забезпечують комірчасту маршрутизацію і передають пакети даних тільки своїм батьківським вузлам, оскільки кінцеві пристрої не мають таблиць маршрутизації. Маршрутизатор, отримавши пакет даних, що не призначений для його вузла-нащадка або вузла-батьківського, і не маючи відповідного запису в таблиці маршрутизації, ініціюють процедуру виявлення маршруту, вона починається з розсилки відповідних ширококомовних команд всім маршрутизаторам в межах радіомовлення, всі маршрутизатори мережі, які взяли команду, створюють у себе тимчасові записи про прийняті запити і випадковим чином (це спеціально забезпечується таймерами з випадково обраною затримкою) ретранслюють команду далі, знову ж ширококомовно [5].

Можливо існування багатьох маршрутів проходження пакетів до вузла призначення, але кожен маршрутизатор на шляху слідування відкидає і не ретранслює пакети з командами

виявлення маршруту, що має більшу вартість шляху, що вже зафіксована цим маршрутизатором у попередніх пакетів. Якщо пакет має ту ж вартість шляху, що вже була зафіксована маршрутизатором, то він оновлює дані. Пріоритет віддається останньому.

Вартість шляху міститься в самому пакеті і оновлюється в ньому всякий раз, коли пакет ретранслюється маршрутизатором.

Специфікації Zig Bee пропонує кілька варіантів розрахунку вартості шляху. Найпростіший – це підрахунок кількості ретрансляцій по маршруту. Більш складний – обчислення вартості шляху по сумі параметрів якості обслуговування (QoS) між вузлами. Та найточніший і важко реалізуючий – це обчислення функцій від ймовірності проходження пакетів між вузлами, яка, в свою чергу, визначається зі статистичних даних.

У протоколі ZigBee передбачена процедура використання того ж шляху і для зворотної передачі, інакше для виявлення зворотного шляху потрібно запускати алгоритм маршрутизації повторно. Зворотний шлях може не збігатися з прямим навіть при розрахунку ціни за методом простого лічильника переходів, оскільки розгалуження по маршруту вибираються на основі генератора випадкових чисел [7].

Mesh-маршрутизація використовується для забезпечення функцій транзитних мереж, що доцільно враховувати при розробці системних рішень по впровадженню мереж безпроводного доступу.

Локальне позиціонування (RTLS - Real Time Location System) останнім часом набуває досить великого значення. RTLS – це система позиціонування в реальному часі, перед призначена для позиціонування поточного знаходження об'єкта в деякому заданому просторі (двовимірний чи трьохвимірному). Рішення по системам RTLS, пропонувані сьогодні на ринку засобів зв'язку, засновані на стандартах IEEE 802.11.

Будується RTLS як мережу клієнт-сервер, в якій кожен об'єкт, що входить в систему, зазначається спеціальною міткою.

Як правило, в рамках RTLS створюються деякі логічні зони. Про переміщення об'єктів через кордони цих зон поступальних надішле сигнали, а при переміщенні об'єктів всередині логічної зони за ними ведеться постійний контроль, використовуючи траєкторію якого можна зберігати у відповідній базі даних.

Внаслідок спочатку малого розміру стільники Wi-Fi точність позиціонування об'єктів в системі RTLS - до 1 м.

Архітектура системи локального позиціонування EkaHau RTLS. Основу модульної системи управління становить EkaHau Positioning Engine (EPE), точність позиціонування до 1 м будь-якого об'єкта, оснащеного персональним комп'ютером (ПК), кишеньковим ПК (КПК), інтегральним телефоном з можливістю роботи в мережі Wi-Fi або спеціальними позначками фірми EkaHau.

EkaHau Finder є web-додатком, яке дозволяє визначити місце розташування людини (співробітника) і/або в зоні знаходження або карті. EkaHau Positioning Engine - це модуль EPE, який безперервно в реальному часі відстежує переміщення співробітників і/або майна, сигналізує про їх переміщення за межі виділеної зони. EkaHau Logger забезпечує зберігання отриманої інформації, створює звіти і бази даних. Контроль за переміщенням співробітників і майна може здійснюватися локально або віддалено по мережі NGN або Інтернету.

Сучасна система локального позиціонування забезпечує оперативне визначення місцезнаходження об'єктів і відображає їх реальне переміщення в часі.

Система дозволяє накопичувати історію переміщень (трейсів) і сигналізувати про вихід об'єкта з певної для нього зони [1].

Важливо відзначити, що система RTLS органічно поєднується з Wi-Fi-мережею по стандартам IEEE 802.11b/g/n і з будь-якими технічними засобами (ПК, КПК, інтегральний телефон з Wi-Fi, мітки), виконаними з дотриманням стандартів IEEE 802.11b/g/n. Таким чином, система RTLS являє собою додаткову послугу, яку користувач може отримати, якщо він є зареєстрованим користувачем мережі Wi-Fi.

Важливо відзначити, що RTLS дозволяє забезпечити швидкий пошук об'єкта на карті або плані, включаючи його координати, швидкість переміщення зони знаходження. Системи RTLS працюють як на відкритому просторі, так і в приміщеннях. В основі побудови домашньої мережі лежать два взаємодоповнюючі процеси: майбутнє широке поширення безпроводних сенсорних мереж і можливості Wi-Fi по представлених як традиційних для NGN послуг, так і нових, базуються на Ad hoc- і Mesh-технологіях [6].

В даний час досить широко поширені системні і технічні рішення з надання пакету послуг Triple Play (мова + дані + відео) або на основі ADSL і його модифікацій ADSL 2 і ADSL2 +, або на основі провнення оптичного кабелю до житла (FTTH - Fiber to the Home). Останній з цих двох рішень просувається як більш сучасне, оскільки при використанні ADSL можуть виникнути і виникають проблеми із забезпеченням необхідної швидкості передачі, наприклад, при передачі телебачення високої чіткості HDTV (High Definition Television).

У зв'язку з цим не випадково, що Wi-Fi (за рекомендацією IEEE 802.11n) розглядається як перспективний спосіб реалізації IPTV. Крім того, до теперішнього часу вирішене, причому в практичній площині, питання про забезпечення гарантованого ного QoS при наданні послуг з передачі мови і відео використовуючи технічні засоби Wi-Fi.

Стандарт IEEE 802.11e надає категорії обслуговування AC (Access Category), повністю відповідає концепції диференційованих послуг і має відповідності з класами обслуговування рекомендацій MCE-T Y.1540 і Y.1541.

Таким чином, найбільш ймовірним є такий сценарій розвитку домашніх мереж і мереж абонентського доступу, коли технологія FTTH буде замінена Wi-Fi і можливо і FTTC (Fiber to the Curb), тобто доведення волокна до розподільної коробки, залишаючи для оптичних технологій, в першу чергу, ядро мережі і організацію мереж доступу на рівні мікрорайону.

Домашні Ad Hoc-мережі об'єднані за допомогою Wi-Fi Mesh-маршрутизаторів (або Mesh-маршрутизаторів, виконаних на інших безпроводних технологіях) в мережу мікрорайону, яка має вихід на житлові та експлуатаційні служби мікрорайону, а також через абонентські шлюзи (RG - Residential Gateway) до провайдерів послуг телекомунікацій [4].

У такій мережі крім традиційних послуг NGN можуть бути надані нові послуги, навіть групи нових послуг, серед яких можна виділити послуги:

- по взаємодії сучасної побутової техніки та людини;
- щодо забезпечення безпеки житла, офісів і тощо;
- з моніторингу стану житлових і робочих приміщень, включаючи моніторинг висвітлення, кліматичних умов, водопостачання, загазованості тощо;
- з моніторингу здоров'я;
- з моніторингу здоров'я, місцезнаходження та адекватності поведінки людей похилого віку;
- по контролю місцезнаходження дітей;
- по взаємодії співробітників служб мікрорайону, районів міста при виконанні ними ремонтних і профілактичних робіт;
- по взаємодії медичного персоналу, розташованого за викликом на дому, в офісі тощо, з районною поліклінікою, лікарнею, медичними базами даних;
- виду "Push to Buy" (примушування до покупки) в великих торгових центрах при створенні мереж SHANET (Shopping Ad HocNetwork);
- роумінгу для користувачів мереж 3G при знаходженні цих користувачів в якості гостей мережі HANET;
- роумінгу і доступу в Інтернет для користувачів персональних комп'ютерів і багатофункціональних терміналів при знаходженні цих користувачів в якості гостей в мережі HANET.

Список нових послуг можна продовжити, але наведений вище досить різноманітний для того, щоб усвідомити широту охоплення життєдіяльності людини при впровадженні Ad Hoc- і Mesh-мереж. Ці системні рішення призводять до необхідності розвитку існуючих уявлень.

Найбільш відповідним алгоритмом самоорганізації для БСМ є алгоритм AODV. Але застосування його в чистому вигляді недоцільно, так як він орієнтований на використання в мережах з наявністю мобільних вузлів [3].

У зв'язку з цим деякі механізми роботи AODV необхідно змінити і скоротити розміри службових пакетів. Визначати розрив каналу зв'язку в цьому випадку можна за відсутністю відповідного пакета на запит, спрямованого до заданого вузла. Таким чином не просто зменшується розмір службових пакетів, а прибирається цілий тип пакетів AODV-RERR, таким чином суттєво зменшуючи обсяг переданої по мережі інформації.

Крім скорочення обсягу службової інформації слід використовувати інший механізм визначення шляху між вузлами. В алгоритмі AODV маршрут прокладають між будь-якими двома пристроями мережі. В даному алгоритмі самоорганізації маршрут прокладається між центральним вузлом і всіма іншими вузлами мережі.

Центральний вузол є точкою збору даних, всі інші вузли можуть бути як ретрансляторами, так і кінцевими пристроями з підключеними сенсорними модулями. Можливий варіант, коли пристрій одночасно виконує функції і ретранслятора, і кінцевого пристрою.

Центральний вузол запускає процес організації мережі шляхом посилки в ефір спеціального широкомовного пакета ініціалізації. По суті, пакет ініціалізації є запрошенням до приєднання вузла до мережі. Вузли, які отримали такий пакет, ретранслюють його далі в ефір тільки в разі, якщо раніше не отримували його від іншого вузла. За рахунок такого підходу зменшується зайве навантаження на мережу. Отримуючи пакети ініціалізації, вузли створюють і зберігають у себе в пам'яті таблицю маршрутизації, в якій записані ідентифікаційний номер мережі, мережеву адресу центрального вузла і мережеву адресу батьківського (по відношенню до «дерева» зв'язків) вузла мережі. Батьківським по відношенню до розглянутого вузла, який стоїть в мережевий ієрархії на 1 щабель ближче до центрального і логічно з ним пов'язаний. У разі якщо пакет ініціалізації отримано безпосередньо від центрального вузла, то в таблиці маршрутизації адресу батьківського вузла збігається з адресою центрального вузла. Якщо пакет ініціалізації був отриманий від ретранслятора, то адреса батьківського вузла збігається з адресою цього ретранслятора [2].

Після отримання пакету ініціалізації вузол вичікує деякий час і відправляє пакет підтвердження підключення до мережі. Проміжним адресатом цього пакета виставляється ідентифікаційний номер батьківського вузла, а кінцевим – ідентифікаційний номер центрального вузла. Всі вузли, які отримують пакет підтвердження підключення до мережі, ретранслюють його до свого батьківського вузла. Таким чином, всі пакети підтвердження будуть передані на центральний вузол. Центральний вузол, отримуючи пакет підтвердження, обробляє його і реєструє новий підключений вузол. коли ідентифікаційний номер вузла, що відправив пакет підтвердження, зареєстрований на центральному вузлі, то цей вузол вважається проініціалізованим.

Процес ініціалізації вузлів обмежений за часом. Після закінчення цього часу центральний вузол будує топологію мережі на підставі отриманих даних з пакетів підтвердження. Процес самоорганізації безпроводної мережі завершений. В результаті роботи алгоритму самоорганізації будується топологія мережі типу «дерево», коренем якого є центральний вузол. При цьому передача даних від віддалених вузлів на точку збору здійснюється шляхом ретрансляції відповідних пакетів проміжними (батьківськими) вузлами.

У такому алгоритмі самоорганізації можливі ситуації, коли в один і той же проміжок часу різні вузли роблять обмін повідомленнями. Для запобігання колізій пакетів використовується алгоритм множинного доступу, CSMA (множинний доступ з контролем несучої – carrier sense multiple access) протоколу. Коли вузол готовий до передачі даних, він прослуховує канал протягом часу τ , щоб визначити, чи не передає дані будь-хто інший. Якщо канал вільний протягом часу τ , то вузол продовжує час прослуховування каналу на

випадковий інтервал часу θ . Причому $\theta = k \cdot T$, де $k = 0 \dots 10$, T - тривалість пакета ініціалізації. Якщо протягом часу $\tau + \theta$ канал вільний, то вузол передає дані. В разі зайнятості каналу вузол чекає, коли він звільниться [2].

У зв'язку з використанням в алгоритмі самоорганізації ймовірного доступу до каналу зв'язку, внаслідок чого можливе формування різної топології мережі, алгоритм був названий ймовірним.

Висновки

Таким чином впровадження Ad-Hoc і Mesh-технологій істотно розширює клієнтську базу і набір послуг, що надаються користувачам мережі, оскільки такі мережі володіють принципами самоорганізації.

Сформовано, що найточніший варіант розрахунку вартості шляху маршрутизації це обчислення функцій від ймовірності проходження пакетів між вузлами.

Література

1. От моделей поведения к искусственному интеллекту / под ред. В. Г. Редько - М.: КомКнига, 2006. - 456с.
2. Mills K.L. A brief survey of self-organization in wireless sensor networks // Wireless Communications and Mobile Computing. - 2007.- V. 7, N 7.- P. 823–834.
3. Dressler F. A Study of Self-Organization Mechanisms in Ad Hoc and Sensor Networks // Computer Communications. - 2008. - V. 31, N 13. - P. 3018–3029.
4. Handy M.J., Haase M., Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic Cluster-Heads selection // Proc. 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network. - 2002. - P. 368–372.
5. Lindsey S., Raghavendra C.S. Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems // Proc. of the IEEE. - 2002. - P. 924–935.
6. Perkins C.E., Belding-Royer E.M., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing // IETF RFC. - 2003.
7. Xu Y., Heidemann J., Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing // Proc. of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. - 2001. - P. 70–84.
8. Subramanian L., Katz R.H. An architecture for building self-configurable systems // Proc. Mobile Ad Hoc Network Comput. Workshop. - 2000. - P. 63–73.
9. Abramson N., The ALOHA System – Another Alternative for Computer Communications // Proc. 1970 Fall Joint Computer Conf., AFIPS Press, – 1970. - V. 37. - P. 281–285.
10. Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Юркин В.Ю. Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети на основе хаотических радиоимпульсов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. - 2009. - Т. 17, № 4.- С. 90-104.

Надійшла 03.03.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Аріпов М.М.