

УДК 621.396

Я.Л. Уманець

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ

ПРОТОКОЛИ ТА МЕТОДИ МАРШРУТИЗАЦІЇ ПОТОКІВ ДАНИХ В ПЕРСПЕКТИВНИХ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ З ДИНАМІЧНОЮ ТОПОЛОГІЄЮ

Проведено аналіз існуючих протоколів та методів маршрутизації потоків даних, запропонованих для використання в мобільних радіомережах класу MANET. Визначено напрямки модернізації існуючих протоколів з метою підвищення ефективності функціонування мобільних радіомереж класу MANET.

Ключові слова: методи маршрутизації, потоки даних, мобільні радіомережі.

Вступ

Мобільні радіомережі (МР) з динамічною топологією або *Mobile Ad-Hoc Networks* (MANET) – новий різновид радіомереж, які являють собою сукупність автономних мобільних радіовузлів, об'єднаних між собою через радіоканали без будь-якої попередньо розгорнутої мережевої інфраструктури [1, 2]. Областями застосування МР є території, де мережеву інфраструктуру неможливо або недоцільно розгорнути; проведення аварійно-рятувальних операцій; стихійні лиха чи аварійні ситуації; узгодження дій підрозділів в ході сучасних високоманеврених бойових дій чи військових операцій.

В порівнянні з проводовими мережами зв'язку, МР характеризуються частими і непередбачуваними змінами топології радіомережі, відсутністю постійних маршрутів передачі даних, а також окремих мережевих пристроїв (маршрутизаторів), які б виконували цю функцію, так як кожен вузол МР виконує роль кінцевого пристрою і маршрутизатора одночасно. Разом з тим, у порівнянні зі стільниковими мережами зв'язку, де доступ до мережі здійснюється через базову станцію, в МР використовується багатострибковий (multihop) підхід до передачі даних у радіомережі. Зазначені особливості МР призводять до того, що маршрутизація потоків даних стає першочерговим завданням, яке необхідно вирішити при проектуванні МР як цивільного, так і військового призначення.

Сьогодні існує значна кількість протоколів та методів маршрутизації (ММ), розроблених як для існуючих стаціонарних, так і для безпроводових мереж передачі даних. Ці ММ відрізняються один від одного багатьма характеристиками, однак, не всі з них задовольняють вимогам, що накладаються з боку МР (розподілене функціонування; мінімальна завантаженість мережі службовою інформацією; можливість боротьби з перевантаженнями; відсутність зацикленних маршрутів, тощо). Враховуючи

зазначене, наукове завдання, пов'язане з аналізом існуючих протоколів та ММ для визначення можливості їх використання в МР, є актуальним сьогодні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На відміну від стаціонарних мереж зв'язку, де мережева топологія (і, відповідно, маршрути передачі) залишається незмінною протягом тривалого проміжку часу, вузли МР не мають жодної інформації про топологію радіомережі, тому повинні самі виявити її і побудувати маршрути в разі необхідності передачі даних.

В МР, як і в стаціонарних мережах зв'язку, процес маршрутизації реалізується з допомогою ММ, які являють собою сукупність семантичних і синтаксичних правил, що визначають процес побудови та підтримання маршрутів передачі між відправником та адресатом в МР і забезпечують ефективно використання мережевих ресурсів при заданій якості обслуговування користувачів [3, 4].

У загальному, функціонування будь-якого ММ в МР зводиться до вирішення динамічної задачі оптимізації, метою якої є надання вузлам-відправникам маршрутів передачі даних, які повинні:

- бути оптимальними з точки зору деякого критерію (наприклад, мінімальної відстані);
- задовольняти деяким обмеженням (наприклад, обмеженої потужності мобільних вузлів);
- забезпечувати необхідну якість обслуговування (QoS) різних типів трафіка.

Сьогодні в науковій літературі розглядається значна кількість методів та протоколів маршрутизації, які розраховані для радіомереж з різною мобільністю вузлів, швидкістю передачі інформації між вузлами, передбачають різні алгоритми управління навантаженням у радіомережі та управління затримкою передачі пакетів з даними. В [1, 4, 5] наведена детальна класифікація методів та протоколів маршрутизації, запропонованих для використання в МР. На рис. 1. зображені основні класи ММ в мобільних радіомережах.

Як видно з рис. 1, запропоновані на сьогодні ММ можна поділити на три групи: таблично-орієнтовані (активні), зондові (реактивні) та гібридні.

Метою даної статті є аналіз особливостей найбільш популярних методів та протоколів маршрутизації, які відносяться до кожної із наведених вище груп.

Таблично-орієнтовані ММ

Головна особливість таблично-орієнтованих методів маршрутизації (ТОММ) полягає у необхідності підтримання повної інформації про всі маршрути в мережі у своїх маршрутних таблицях. Це означає, що активні протоколи постійно оновлюють список адресатів та маршрутів до них шляхом періодичного розсилання маршрутних таблиць мережею. Тобто, коли виникає необхідність передачі пакетів з інформацією – маршрути вже відомі і можуть бути використані негайно, як у традиційній проводовій мережі.

ТОММ використовують два підходи для обчислення найкоротшого шляху [4, 5]:

1. Використання повної інформації про стан мережі ("Link-State") – в цьому випадку кожен вузол

використовує централізований алгоритм пошуку найкоротшого маршруту Дійкстри;

2. Використання локальної інформації про стан мережі ("Distance-Vector") – кожен вузол володіє локальною інформацією про стан мережі, використовуючи розподілену версію алгоритму Беллмана-Форда.

Зазначені вище особливості таблично-орієнтованих протоколів спричиняють значні затрати мережевих ресурсів під час застосування цих протоколів в радіомережах класу MANET. До основних недоліків, якими характеризуються таблично-орієнтовані протоколи при використанні в МР є:

– значні об'єми даних для збереження маршрутної інформації (особливо при великих розмірах МР), що, у свою чергу, спричиняє значні об'єми службового трафіка, який передається в МР;

– повільна реакція на реструктуризацію радіомережі і відмову окремих вузлів.

Сьогодні велика кількість таблично-орієнтованих протоколів маршрутизації запропонована для використання в МР. Серед них – DSDV, WRP, OLSR, GSR, FSR, STAR, DREAM, MMWN, CGSR, HSR та ін. [3]. Розглянемо їх детальніше.

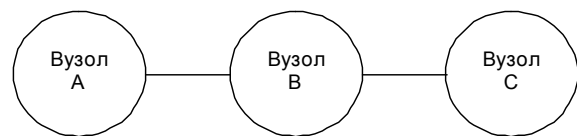


Рис. 1. Основні класи методів маршрутизації в МР

Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) – таблично-орієнтований протокол маршрутизації, який базується на класичному алгоритмі Беллмана-Форда, але вирішує проблему зациклення маршрутів, характерну для цього алгоритму [6].

Кожен мобільний вузол підтримує маршрутну таблицю до всіх можливих адресатів мережі. Кожен її вхід позначається порядковим номером, який визначається адресатом. Маршрутна інформація передається між вузлами шляхом відправки всієї маршрутної таблиці (нечасто) і додаткових оновлень, які передаються частіше.

На рис. 2, б представлена спрощена структурна схема маршрутної таблиці для мережі, зображеної на рис. 2, а.



а

Адресат	Наступний вузол	Номер вузла	Порядковий номер	Час встановлення
А	А	0	A46	001000
В	В	1	B36	001200
С	В	2	C28	001500

б

Рис. 2. Приклад структури маршрутної таблиці протоколу DSDV

Справжня маршрутна таблиця міститиме всі досяжні для вузла А маршрути разом з номерами наступних вузлів на цих маршрутах, їх порядковими номерами та часом встановлення маршруту.

Порядковий номер маршруту дозволяє вузлам розрізняти «старий» маршрут від «нового» для уникнення формування маршрутних циклів. Всі маршрутні повідомлення також нумеруються. Якщо маршрутизатор отримує нову інформацію, то він використовує повідомлення з останнім порядковим номером.

Переваги DSDV: відсутність зациклення маршрутів; в МР з малою кількістю вузлів забезпечує миттєву побудову маршрутів передачі.

Недоліки DSDV: вимагає регулярного оновлення своїх маршрутних таблиць, що потребує використання вузлових і мережевих ресурсів, навіть коли мережа знаходиться в режимі очікування, не підходить для радіомереж з високою динамікою зміни топології.

Wireless Routing Protocol (WRP) – таблично-орієнтований одноадресний протокол для радіомереж класу MANET. WRP використовує розширену версію протоколу маршрутизації та алгоритм Беллмана-Форда для обчислення маршруту. Через мобільну природу вузлів МР, протокол запроваджує механізми, які знижують ймовірність зациклення маршрутів і забезпечують надійний обмін повідомленнями [7].

WRP, як і DSDV, використовує механізм постійного оновлення маршрутних таблиць, що дозволяє йому володіти повною інформацією про стан мережі і бути в готовності надати маршрут до адресата. Але, на відміну від DSDV, який використовує тільки одну таблицю з топологією мережі, у протоколі WRP кожен вузол підтримує маршрути до всіх адресатів мережі за допомогою чотирьох таблиць: маршрутної, відстаней, вартості каналів і таблиці обліку передач маршрутних повідомлень.

Маршрутні повідомлення посилаються періодично або при зміні маршрутної таблиці. Якщо за період розсилки маршрутних повідомлень не відбулася зміна маршрутної таблиці, то передається пакет присутності (hello-пакет). Прийнявши маршрутне повідомлення, вузол коригує таблицю відстаней і формує новий маршрут (за критерієм мінімальної кількості ретрансляцій).

Якщо такий маршрут існує, то коригується маршрутна таблиця і розсилаються маршрутні повідомлення своїм сусідам.

Переваги WRP: відсутність зациклення маршрутів, швидка збіжність, менша кількість оновлень маршрутних таблиць.

Недоліки WRP: складність ведення декількох таблиць вимагає більшої пам'яті і більшої обчислювальної потужності від вузлів МР; в МР значних розмірів метод неефективний через низьку масштабованість.

Optimized Link State Routing (OLSR) – це таблично-орієнтований протокол IP-маршрутизації, оптимізований для радіомереж класу MANET, який використовує алгоритм Дійкстри та Hello-повідомлення для отримання інформації про стан маршрутів і топологію радіомережі. Кожен вузол розсилає цю інформацію між сусідніми вузлами для виявлення наступного вузла в напрямку до адресата, використовуючи в якості метрики найменшу кількість ретрансляцій [8].

Функціонування протоколу OLSR вимагає наявності бази даних про стан мережевої топології. Для цього OLSR використовує лавиноподібне розсилання маршрутних повідомлень про стан топології мережі, яке сприяє тому, що вузлова база даних не залишається несинхронізованою протягом тривалих періодів часу.

Переваги OLSR: відсутня затримка передачі потоків даних, пов'язана з процедурою виявлення та побудови маршрутів; витрати вузлових та мережевих ресурсів не зростають при збільшенні кількості маршрутів передачі.

Недоліки OLSR: неможлива побудова маршрутів заданої якості обслуговування; неефективне використання енергетичних і мережевих ресурсів при відправці службової інформації; у мережах великої розмірності вимагає відносно високої пропускної здатності радіоканалів та продуктивності вузлових процесорів.

Global State Routing (GSR) – таблично-орієнтований ММ, який використовує повну інформацію про стан мережі. Кожен вузол хвильовим способом посилає інформацію про вузли, які до нього підключені, усім іншими вузлами мережі. На основі цієї інформації всі вузли будують карту топології мережі, яку використовують для заповнення маршрутної таблиці. З метою скорочення об'ємів службової інформації GSR передбачає відправку „хвилі” маршрутних повідомлень тільки до вузлів-сусідів [9].

Переваги GSR: менші об'єми службового трафіка, можливість багатомаршрутної передачі.

Недоліки GSR: суттєве збільшення об'ємів маршрутних таблиць зі зростанням кількості вузлів мережі; низька масштабованість, характерна всім таблично-орієнтованим ММ.

Fisheye State Routing (FSR) – ММ, який ґрунтується на принципах роботи GSR. FSR передбачає обмін маршрутними повідомленнями, у яких міститься тільки запис про вузлів сусідів. Це дозволяє скоротити об'єми маршрутного повідомлення, хоча передаються вони частіше. Як наслідок, точність маршруту підвищується по мірі наближення маршрутного повідомлення до адресата [10].

Переваги FSR – на відміну від GSR він є масштабованим у мережах великих розмірів.

Недоліки FSR – зі зростанням мобільності вузлів мережі точність маршрутної інформації зменшується.

Source-Tree Adaptive Routing (STAR) – ММ, який передбачає побудову кожним вузлом дерева вихідних маршрутів, яке складається з каналів, що утворюють привілейовані маршрути до всіх адресатів мережі. Кожен вузол обмінюється власним деревом вихідних маршрутів зі своїми сусідами періодично, або після змін у дереві. Ґрунтуючись на інформації, отриманій від сусідніх вузлів в дереві вихідних маршрутів, кожен вузол будує частковий граф топології мережі, який використовується для заповнення маршрутної таблиці [11].

Переваги STAR – масштабованість.

Недоліки STAR – високі вимоги до продуктивності вузлових процесорів та об'ємів пам'яті, яка необхідна для збереження маршрутної інформації, особливо в мережах великих розмірів.

Distance Routing Effect Algorithm For Mobility (DREAM) – таблично-орієнтований ММ, який використовує спрямовану „хвилю” для передачі інформації до адресата. Напрямок „хвилі” визначається інформацією про місце розташування вузлів. Для цього вузли обмінюються інформацією про їх місце розташування, яка передається в маленьких повідомленнях і зберігається вузлами в окремій таблиці. Частота оновлення цією інформацією залежить від наступних чинників: відстані між вузлами (ближчі вузли оновлюють інформацію про місце розташування рідше); величини мобільності вузлів (високомобільні вузли обмінюються повідомленнями про їх місце розташування частіше, а ті, які стоять – не надсилають таких повідомлень) [12].

Переваги DREAM – масштабованість і низька обчислювальна складність; напрямок „хвилі” обчислюється тільки у разі необхідності відправки інформації (схоже, як у реактивних ММ).

Недоліки DREAM – потребує наявності модуля GPS у складі мобільного вузла для отримання інформації про його місце розташування.

Multimedia support in Mobile Wireless Networks (MMWN) – ієрархічний таблично-орієнтований ММ, який враховує вимоги до якості обслуговування (QoS) трафіка при побудові маршрутів передачі. Його робота нагадує роботу стільникових систем передачі, у яких декілька вузлів працюють у якості маршрутизаторів для інших вузлів [13].

Вузли самостійно поділяються на групи (кластери), у яких вибирають головний вузол і вузол-менеджер. Головні вузли знову поділяються на групи вищого рівня, обираючи новий головний вузол групи (на верхньому рівні є тільки одна група).

Для передачі інформації відправник звертається до головного вузла групи про місце розташування адресата. У свою чергу, головний вузол запитує вузол-менеджер про місце розташування головного вузла групи адресата, після чого, з використанням карти топології мережі будує маршрут.

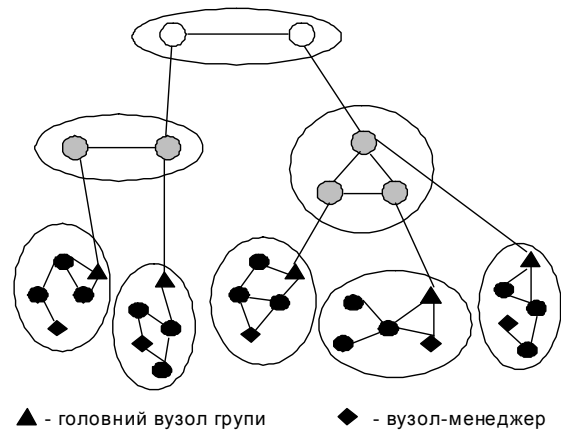


Рис. 3. Кластеризація мережі з використанням MMWN

Переваги MMWN – масштабованість і низькі об'єми службового трафіка.

Недоліки MMWN – ієрархічний принцип управління та мобільність вузлів можуть призвести до невідповідності, за якої один вузол належатиме кільком групам; кластеризація мережі потребує затрати значних вузлових та мережевих ресурсів.

Cluster-head Gateway Switch Routing (CGSR) – ієрархічний таблично-орієнтований ММ, який відрізняється від MMWN тим, що використовує кластери тільки одного рівня ієрархії. Крім того, головні вузли кластерів використовують протокол DSDV для маршрутизації повідомлень між собою, використовуючи вузли-шлюзи (які знаходяться в радіусі доступу головних вузлів кількох кластерів) (рис. 4).

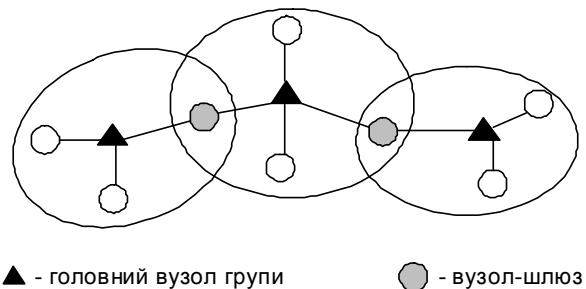


Рис. 4. Кластеризація мережі з використанням CGSR

Кожен вузол періодично розсилає повідомлення зі своїм ідентифікаційним номером, використовуючи який, головний вузол кластера складає таблицю з номерами всіх вузлів, які належать йому. Далі головні вузли обмінюються інформацією, яка міститься в їх таблицях, отримуючи таким чином маршрутну таблицю із записами про вузли-шлюзи, що забезпечать найкоротший шлях до головних вузлів того чи іншого адресата [14].

Переваги CGSR – ті самі, що і в MMWN.

Недоліки CGSR – значні затрати вузлових та мережевих ресурсів, необхідних для кластеризації мережі.

Hierarchical State Routing (HSR) – ММ, який призначений вирішити проблему невизначеності, характерну

методу MMWN, шляхом використання логічних підмереж [15]. Грунтуючись на фізичній відстані, вузли об'єднуються в кластери, які очолюються головним вузлом. При цьому передбачається більше одного рівня кластеризації. Кожен вузол має дві адреси:

– ієрархічну, що складається з MAC-адреси та доповнюється префіксом, який містить номер кластера, до якого належить цей вузол;

– логічну – у форматі <підмережа, вузол>.

Кожна логічна підмережа має домашнього агента – вузол, який містить інформацію про всі ієрархічні адреси вузлів даної підмережі. У свою чергу, ієрархічна адреса домашнього агента відома всім головним вузлам кластерів.

Для передачі інформації вузол-відправник інформує головний вузол про логічну адресу адресата. Далі головний вузол шукає ієрархічну адресу домашнього агента вузла-адресата і використовує її для відправки запиту про ієрархічну адресу адресата. Після отримання ієрархічної адреси вузла-адресата головний вузол використовує свою топологічну карту мережі для пошуку маршруту до головного вузла, який зв'язаний з адресатом.

Переваги і недоліки методу такі ж як і в попередніх методах ієрархічної маршрутизації.

Підсумовуючи інформацію щодо таблично-орієнтованих протоколів та ММ слід зазначити, що більшість з них є слабомасштабованими через значні затрати, які накладають на мережу. Ієрархічні методи є більш масштабними, ніж одно рівневі, однак у мережах з високою мобільністю вузлів вони потребують значних затрат вузлових та мережевих ресурсів, необхідних для кластеризації мережі. Таким чином, не дивлячись на всі переваги, якими володіють таблично-орієнтовані протоколи маршрутизації, зазначені вище недоліки зробили їх менш привабливими для використання в МР, особливо після появи великої кількості різноманітних зондових (реактивних) протоколів.

Зондові методи маршрутизації

Радіомережі класу MANET характеризуються обмеженою смугою пропускання радіоканалів та обмеженою ємністю вузлових батарей, тому доцільно щоб радіомережа перебувала в режимі очікування поки не буде необхідності передачі інформації. У зв'язку з цим, реактивні ММ не зберігають маршрути, а будують їх у разі потреби шляхом розсилання спеціальних зондів-запитів у мережі. У загальному перевагами зондових протоколів є:

– відсутність значних вузлових та мережевих затрат для побудови та підтримання в актуальному стані глобальної (для всієї мережі) таблиці маршрутизації;

– швидка реакція на реструктуризацію мережі чи вихід з ладу мобільних вузлів.

Разом з тим до недоліків зондових ММ можна віднести:

– значна затримка передачі даних, пов'язана з необхідністю пошуку та побудови маршруту;

– надмірна кількість зондів може призвести до захаращення радіомережі службовою інформацією.

Сьогодні існує велика кількість зондових протоколів та ММ для радіомереж класу MANET. Запропонованими для стандартизації є AODV, DSR та DYMO. Крім того пропонується розглянути характеристики протоколів ODCR, ROAM, ABR, SSA та новий інтелектуальний ММ.

Dynamic Source Routing (DSR) – зондовий протокол маршрутизації, який не використовує маршрутних таблиць на кожному вузлі, а будує маршрути у разі необхідності передачі інформації відправником. Відправник, не маючи маршруту і бажаючи передати пакет адресату, передає сусіднім вузлам зонд-запит, який містить ідентифікатор адресата. Вузол, який прийняв зонд-запит, може поступити наступним чином. Якщо він не знає маршруту до адресата, тоді додає свій ідентифікатор в зонд-запит і передає його далі своїм сусідам (це дозволить отримати зворотний шлях передачі і уникнути зациклення маршрутів). В іншому випадку (або при досягненні зондом-запитом адресата) відправнику надсилається зонд-відповідь з вказівкою маршруту. Вузол відправник, отримавши зонд-відповідь, поміщає маршрут у свою кеш-пам'ять. Проміжні вузли, які передають зонди-відповіді, також зберігають отримані маршрути до адресата і відправника [16].

Переваги DSR – швидка адаптація до змін топології мережі; відсутність періодичного розсилання службової інформації, характерної для табличних ММ.

Недоліки DSR – створює досить великі об'єми службового трафіка (прямопропорційні довжині маршруту); нездатність проміжних вузлів локально відновлювати маршрути; низька ефективність у мережах з високою мобільністю вузлів.

Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) – це зондовий протокол маршрутизації, який являє собою комбінацію протоколів DSR та DSDV. Побудова та підтримання маршрутів здійснюється зондовими методами, зберігання маршрутів відповідно до таблично-орієнтованих методів. Для підтримання інформації про „нові” маршрути використовується порядкова нумерація маршрутів. Протокол використовує чотири типи повідомлень: зонд-запит, зонд-відповідь, зонд-корегування та hello-повідомлення.

Маршрутна таблиця кожного вузла містить наступну інформацію: IP адресата, кількість ретрансляцій до адресата, наступний вузол на шляху до адресата, порядковий номер маршруту, час функціонування маршруту, список активних сусідів.

Функціонування протоколу відбувається наступним чином. За необхідності передачі пакета

вузол звертається до маршрутної таблиці за маршрутом. У випадку його відсутності передається зонд-запит усім сусіднім вузлам. Проміжні вузли, прийнявши зонд-запит і не маючи маршруту до адресата, ретранслюють його далі. Адресат, отримавши зонд-запит, формує зонд-відповідь і надсилає його відправнику, який коригує свою маршрутну таблицю і розпочинає передачу даних.

Переваги AODV: відсутність зациклення маршрутів; вирішення проблеми „кінцевого рахунку”; гарантія отримання „нових” маршрутів; підтримання багатокористувальницької маршрутизації; низька обчислювальна складність та потреба в ресурсах пам’яті.

Недоліки AODV: тривала та складна процедура встановлення з’єднання; використання hello-повідомлень.

Dynamic MANET On-Demand Routing (DYMO)

– є наступником протоколу AODV, зберігаючи всі його переваги, разом з тим є дещо легшим для реалізації і може працювати як активний так і реактивний протокол. Для виявлення нових маршрутів протокол використовує наступні кроки [18]:

1. Спочатку відправник поширює спеціальний зонд-запит мережею, який містить список вузлів через які проходитиме, завдяки чому кожен адресат може одразу побудувати зворотній маршрут до відправника цього зонду;

2. Отримавши зонд-запит, адресат формує зонд-відповідь з підтвердженням, що маршрут знайдено. Зонд-відповідь, проходячи тим же маршрутом, що і зонд-запит, дозволяє проміжним вузлам записувати додаткові маршрути до адресата.

Переваги DYMO: крім переваг AODV – можливість побудови декількох маршрутів між відправником та адресатом.

Недоліки DYMO: збільшення об’ємів службових повідомлень зі зростанням довжини маршруту.

On-Demand Cache Routing protocol (ODCR) – зондовий протокол маршрутизації, який пропонує ефективний алгоритм для виявлення та підтримання маршрутів передачі з урахуванням мобільності вузлів. Так як кожен вузол МР обладнаний дворівневою кеш-пам’яттю (перший рівень від 64 до 256 кБіт, другий рівень від 256 кБіт до 2 МБіт), то ODCR передбачає її використання для зберігання маршрутної інформації. Кожен запис маршрутних даних називається „кеш-лінією”, в якій записується та маршрутна інформація, що нещодавно використовувалася [19].

Для встановлення з’єднання протокол передбачає наявність ідентифікаційного номеру кожного вузла та списку ідентифікаційних номерів у кеш-пам’яті кожного вузла. За необхідності відправки інформації, відправник звертається до маршрутної кеш-пам’яті з метою пошуку маршруту серед тих,

що використовувалися недавно. Якщо такий маршрут відсутній, то вузол розпочинає процедуру пошуку нових маршрутів, приєднуючи до кожного пакету з даними власний ідентифікаційний номер, ідентифікаційний номер адресата та порядковий номер пакета з даними. Кожен проміжний вузол використовує власну маршрутну кеш-пам’ять для передачі пакетів з даними до наступного вузла, або до адресата. Якщо якийсь із вузлів змінює своє місце розташування або новий вузол з’являється в МР – протокол передбачає процедуру оповіщення про топологічні зміни в радіомережі з метою оновлення маршрутної кеш-пам’яті вузлів.

Переваги ODCR: незначні об’єми пам’яті для збереження маршрутної інформації; менший час встановлення маршруту; можливість локального відновлення розірваних маршрутів; відсутність періодичного розсилання hello-пакетів.

Недоліки ODCR: у якості метрики пошуку маршруту використовує тільки відстань до адресата.

Routing On-demand Acyclic Multi-path (ROAM)

– зондовий ММ, який передбачає побудову множини маршрутів передачі між відправником та адресатом, а також забезпечує відсутність їх зациклення. Крім того, метод вирішує проблему нескінченного пошуку, яка полягає в тому, що часто вузли захищають радіомережу службовою інформацією, шукаючи абонента, якого взагалі немає в МР. Для цього в маршрутній таблиці такого абонента позначають як „недосяжний” і всі вузли протягом деякого часу не використовують його ані для побудови маршруту, ані для передачі інформації до нього. Крім маршрутної таблиці метод передбачає наявність таблиці відстаней до вузлів (як у таблично-орієнтованих ММ) [20].

Для пошуку нового маршруту ROAM використовує хвильовий спосіб розсилання зондів, при цьому в маршрутній таблиці записується декілька можливих маршрутів до адресата. У якості метрики вибору маршруту використовується його довжина.

Переваги ROAM: можливість побудови декількох маршрутів між відправником та адресатом.

Недоліки ROAM: витрати вузлових ресурсів для підтримання в актуальному стані маршрутних таблиць; використання тільки однієї метрики для пошуку найкращого маршруту.

Associativity-Based Routing (ABR) – протокол маршрутизації, який передбачає пошук маршрутів вузлом відправником на основі стабільності каналів між вузлами. У якості метрики для вибору маршруту використовується його „час життя”. Для цього кожен вузол періодично надсилає hello-повідомлення до своїх сусідів. Усі вузли мають таблицю із записами порядкового номера hello-пакета від кожного сусіднього вузла. Для пошуку маршруту вузол-відправник використовує зондування.

Отримавши зонд-запит, кожен проміжний вузол записує в нього свій ідентифікаційний номер і показник стабільності каналу, по якому до нього надійшов запит. Адресат, отримавши зонд-запит, обчислює маршрут з найбільшим показником стабільності („часом життя”). За наявності декількох таких маршрутів вибирається той, у якого менша кількість ретрансляційних участків [21].

Переваги ABR: використання у якості метрик пошуку маршруту відстані між відправником та адресатом і „часу життя” маршруту.

Недоліки ABR: наявність hello-повідомлень, які примушують вузли залишатися в активному стані навіть тоді, коли інформація не передається, що спричиняє витрату енергії вузлових батарей.

Signal Stability Adaptive (SSA) – ММ, який передбачає пошук маршрутів вузлом відправником на основі стабільності каналів між вузлами, тільки, на відміну від ABR, у якості метрики для вибору маршруту використовується потужність радіосигналу. Процедура пошуку маршруту відбувається так як і у методу ABR [22].

Переваги SSA: у порівнянні з ABR – відсутність hello-повідомлень.

Недоліки SSA: значна затримка при побудові маршруту; не завжди вибираються найкоротші маршрути.

Інтелектуальний метод маршрутизації (IMM) – новий підхід, запропонований для підвищення ефективності існуючих зондових ММ, який полягає в застосуванні технологій обробки знань для інтелектуалізації прийняття рішень з маршрутизації. Так, в [23] авторами запропоновано інтелектуальний ММ, який на відміну від традиційних ММ, передбачає вибір цільової функції управління маршрутами (побудова маршруту мінімальної (заданої) вартості за вибраними метриками), типу маршрутизації, кількості маршрутів та способу зондування в мережі. Виконання цих функцій можливе тільки за умови реалізації системи управління в кожному вузлі МР, до складу якої буде входити підсистема управління маршрутизацією [23].

Через високу динаміку зміни топології МР, складність формування повної системи показників їх функціонування, неповноту й невірогідність контрольної інформації про стан інформаційного напрямку пропонується побудова підсистеми управління маршрутизацією на основі нечіткого контролера, який для прийняття рішень з маршрутизації використовує апарат нечіткої логіки [23].

Переваги інтелектуального методу: прийняття рішення про вибір маршрутів проводиться з врахуванням стану інформаційного напрямку та вимог до передачі різних типів трафіка.

Недоліки інтелектуального методу: необхідність розробки системи управління в складі кожного мобільного вузла МР.

Гібридні методи маршрутизації

Даний тип ММ комбінує в собі переваги таблично-орієнтованих та зондових ММ. Зазвичай пошук маршруту вузлом-відправником розпочинається з використанням таблично-орієнтованих ММ, а далі, в залежності від відстані до адресата та мобільності проміжних вузлів, використовуються зондови (реактивні) ММ. Головними недоліками гібридних ММ є:

– їх продуктивність залежить від кількості вузлів, залучених до передачі;

– реакція на вимоги до передачі того чи іншого типу трафіка залежить від об'ємів трафіка.

Основними представниками гібридних ММ є ZRP, OORP, GOR. Розглянемо коротко особливості кожного з цих методів.

Zone Routing Protocol (ZRP) – перший гібридний ММ, який містить активну та реактивну компоненти і спрямований на зменшення вузлових та мережевих затрат, які присутні в таблично-орієнтованих ММ, а також скорочення часу затримки передачі, пов'язаного з необхідністю пошуку нового маршруту, що характерне для зондових ММ.

ZRP передбачає виділення кожним вузлом маршрутною зони, радіус якої зазвичай становить три ретрансляції [24]. Побудова та підтримання маршрутів до адресатів, що знаходяться всередині маршрутною зони, здійснюється табличними (періодичне корегування маршрутних таблиць), а за її межами – зондовими ММ (розсилання зондів-запитів та прийом зондів-відповідей).

Переваги ZRP: відносно, у порівнянні з таблично-орієнтованими ММ, скорочення об'ємів службового трафіка.

Недоліки ZRP: неможливість локального відновлення маршруту в разі його втрати.

Order One Network Protocol (OORP) – представляє алгоритм для комунікації між радіовузлами в чарункових (mesh) радіомережах. Основна ідея алгоритму полягає в тому, що мережа самоорганізується в граф типу „дерево”. Вузол, який ініціює маршрут передачі стає коренем дерева, а маршрути, відповідно, рухатимуться від кореня до гілок дерева. При виявленні маршрутів до адресата вибирається найкоротший з них [25].

При організації дерева мережі вузли формують ієрархію шляхом вибору ключового вузла. Ним може бути будь-який сусідній вузол, який може зв'язатися з найбільшою кількістю інших вузлів. Така ієрархія дозволяє створити своєрідний топологічний цент мережі, що дозволяє уникнути використання складних алгоритмів маршрутизації та великої кількості зв'язань між вузлами.

Всі вузли підтримують зв'язок один з одним через маршрути мережевого дерева. Вузол, який

хоче передати інформацію, відправляє запит до мережевого дерева і завжди знайде маршрут, для чого OORP використовує алгоритм Дійкстри.

Переваги OORP: можливість роботи в мережах великої розмірності; низькі об'єми службового трафіка.

Недоліки OORP: наявність ключових вузлів робить мережу в певній мірі централізованою, а вихід їх з ладу призводить до необхідності реконфігурування всієї мережі; неможливість забезпечення аутентифікації користувачів та безпеки передачі даних.

Global On-Demand Routing protocol (GOR) – гібридний ММ, який передбачає наявність ідентифікаційного номера кожного вузла та координат його розташування в мережі, а також фіксованого радіусу передачі k для кожного вузла (рис. 5) [26].

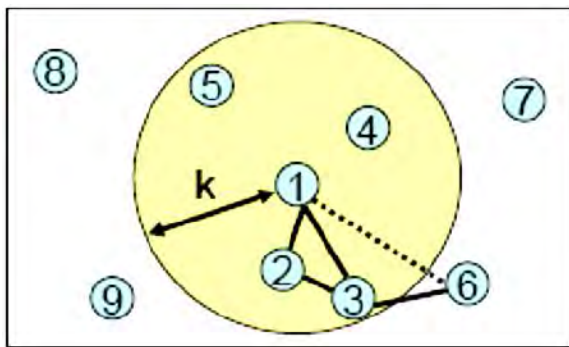


Рис. 5. Побудова маршруту з використанням методу GOR

Для пошуку оптимальних маршрутів використовується алгоритм Дійкстри. Використовуючи координати місця розташування кожного вузла, визначається центральний вузол мережі, який розпочинає зондування з метою створення таблиці локації для кожного вузла. На основі цієї таблиці кожен вузол зможе знайти маршрути передачі до будь-якого адресата.

Особливістю цього методу є те, що GOR не передбачає негайного оновлення маршрутних таблиць у результаті будь-якої зміни вузлами їх статусу. Натомість, протоколом приймаються до уваги тільки ті зміни, які призводять до суттєвої зміни топології мережі, або якщо відстань між вузлами стає більшою, ніж радіус передачі k .

Переваги GOR: уникнення частих оновлень маршрутних таблиць сприяє скороченню об'ємів службового трафіка в мережі та зменшенню обчислювальних та енергетичних ресурсів вузлів.

Недоліки GOR: наявність модуля GPS у складі мобільного вузла ускладнює його структуру.

В табл. 1 наведена узагальнена інформація щодо характеристики проаналізованих вище протоколів та ММ.

Як видно з таблиці, кожен з розглянутих ММ має свої переваги і недоліки. Вибір конкретного ММ

буде залежати від умов функціонування МР (спосіб організації і розмірність радіомережі, мобільність вузлів) та вимог до передачі того чи іншого типу трафіка.

Так, при низькій динамічності зміни мережевої топології більш ефективними є таблично-орієнтовані ММ, а з ростом динаміки топології мережі перевагу отримують зондові ММ. Зазначену невідповідність намагаються вирішувати гібридні ММ, які об'єднали в собі переваги таблично-орієнтованих та зондових ММ.

Крім того, на вибір конкретного ММ будуть впливати вимоги, які накладаються з боку МР (наприклад, неможливість використання „сигналів присутності” вузла в МР спеціального призначення) чи необхідність ефективного використання вузлових та мережевих ресурсів (економія батарей, функціонування в жорстко визначеному діапазоні частот та ін.).

З урахуванням вищезазначеного, можна визначити перспективні напрямки модернізації існуючих протоколів та ММ:

1) багатопараметрична маршрутизація з можливістю динамічного формування метрик вибору маршруту;

2) багатокористувальницька та багатошляхова маршрутизація;

3) QoS-маршрутизація, яка забезпечить інтегровану якість обслуговування для різних типів трафіка;

інтелектуалізація процесів прийняття рішення з маршрутизації, що передбачає прийняття рішення з вибору маршрутів на основі використання різних технологій обробки знань.

Висновки

Таким чином, існуючі ММ показують різну ефективність за різних умов функціонування МР, які визначаються кількістю вузлів, швидкістю їх переміщення, об'ємами трафіка, який передається та вимогами до якості обслуговування того чи іншого типу трафіка.

Також не всі методи забезпечують задану якість обслуговування при передачі різних типів трафіка.

До перспективних напрямків модернізації існуючих протоколів та ММ можна віднести використання багатопараметричної, багатокористувальницької та багатошляхової маршрутизації, QoS-маршрутизації, а також інтелектуалізацію процесів прийняття рішення з маршрутизації.

В ході подальших досліджень буде проведена розробка нових та удосконалення існуючих ММ з використанням визначених напрямків модернізації, а також оцінена ефективність їх функціонування за різних умов функціонування МР.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів (протоколів) маршрутизації в МР

	Класифікація	Маршрутна метрика	Підтримання маршруту	Пакети присутності	Мобільність вузлів	Використання GPS	
DSDV	Т, ДЦ, Н	Найкоротший маршрут	Присвоєння порядкових номерів маршрутам	Ні	Низька	Ні	
WRP	Т, ДЦ, Н			Ні	Низька	Ні	
OLSR	Т, ДЦ, Н	Кількість ре-трансляцій	Хвилеподібне розсилання маршрутних повідомлень	Так	Низька	Ні	
GSR	Т, ДЦ, Н, Б			Ні	Низька	Ні	
FSR	Т, ДЦ, Н, Б			Ні	Низька	Ні	
STAR	Т, ДЦ, Н	Найкоротший маршрут	Стирання маршруту та корегування маршрутних таблиць	Ні	Середня	Ні	
DREAM	Т, ДЦ, Н		Хвилеподібне розсилання маршрутних повідомлень	Ні	Середня	Так	
MMWN	Т, ДЦ, І, QoS		Стирання маршруту та корегування маршрутних таблиць	Ні	Середня	Ні	
CGSR	Т, ДЦ, І, QoS			Ні	Середня	Ні	
HSR	Т, ДЦ, І, QoS		Ні	Середня	Ні		
DSR	З, ДЦ, Н, Б, QoS		Стирання маршруту та оповіщення відправника	Ні	Середня	Ні	
AODV	З, Н, ДЦ, Груп		Так	Середня	Ні		
DYMO	З, Н, ДЦ, Б, Груп		Стирання маршруту та оповіщення відправника	Так	Середня	Ні	
ODCR	З, Н, ДЦ, Б		Локальне відновлення розірваних маршрутів	Ні	Висока	Ні	
ROAM	З, Н, ДЦ, Б		Стирання маршруту та корегування маршрутної таблиці	Ні	Середня	Ні	
ABR	З, Н, ДЦ, Н		Найкоротший маршрут „час життя” маршруту	Локалізація зондів-запитів	Так	Висока	Ні
SSA	З, Н, ДЦ, Н		Потужність радіосигналу	Локалізація зондів-запитів	Ні	Висока	Ні
IMM	З, Н, ДЦ, Н, Б, Груп, QoS	Багатопараметрична	Стирання маршруту та оповіщення відправника	Ні	Висока	Ні	
ZRP	Г, Н, ДЦ	Найкоротший маршрут	Стирання маршруту та корегування маршрутної таблиці	Ні	Висока	Ні	
OORP	Г, І, Ц		Використання дерева маршрутів	Ні	Висока	Ні	
GOR	Г, Н, Ц		Використання таблиці локації	Ні	Висока	Так	

Скорочення які використані в таблиці: З – зондовий метод маршрутизації; Т – таблично-орієнтований метод маршрутизації; Г – гібридний метод маршрутизації; Ц – централізований, ДЦ – децентралізований; Н – неієрархічна маршрутизація; І – ієрархічна маршрутизація; Б – багатошляхова маршрутизація; Груп – групова маршрутизація; QoS – забезпечення заданої якості обслуговування.

Список літератури

1. Самоорганізуючіся радіосети со сверхширокополосными сигналами / [С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк]. – К.: Наук. думка, 2012. – 444 с.
2. Романюк В.А. Еволюція тактичних радіомереж: Тези доповідей та виступів учасників VI науково-

практичного семінару [“Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”], (Київ, 20 жовтня 2011р.) / В.А. Романюк. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2011. – С. 45-52.

3. Fenglien Lee. Routing in Mobile Ad Hoc Networks / Fenglien Lee // INTECH: Mobile Ad-Hoc Networks: Protocol Design. – January 30, 2011. – Access mode:

4. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.intechopen.com/books/mobile-ad-hoc-networks-protocol-design/routing-in-mobile-ad-hoc-networks>
5. Минович А.И. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях / А.И. Минович, В.А. Романюк // 36'язок. – 2001. – №1. – С. 31-36.
6. Минович А.И. Маршрутизация в мобильных радиосетях / А.И. Минович, В.А. Романюк // Сети и телекоммуникации. – 2002. – № 1. – С. 42-47.
7. Perkins C.E. Highy Dynamic Destination–Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers / Perkins C.E., Bhagwat P. // *Comp. Commun. Rev.* – Oct. 1994. – P. 234-244.
8. Murthy Shree. An efficient routing protocol for wireless networks / Murthy Shree, Garcia-Luna-Aceves J. J. // *Mobile Networks and Applications* (Hingham, MA: Kluwer Academic Publishers). – 1996. – № 1 (2). – P. 183-197.
9. Clausen T. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) / Clausen T., Jacquet P. // *Network Working Group: Request for Comments: 3626.* – October 2003. – Access mode: 10. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>.
11. Chen T.-W. Global State Routing: A New Routing Scheme for Ad-hoc Wireless Networks / Tsu-Wei Chen, Mario Gerla // *Proc. IEEE ICC'98.* – 1998. – P. 171-175.
12. Pei G. Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks / Guangyu Pei, Tsu-Wei Chen, Mario Gerla // *In Proceedings Of ICC 2000.* – 2000. – P. 70-74.
13. Garcia-Luna-Aceves J.J. Source-Tree Routing in Wireless Networks / J.J. Garcia-Luna-Aceves, Marcelo Spohn // *In Proceedings Of ICC'99.* – 1999. – P. 273-282.
14. Bakhouya M. Performance evaluation of DREAM protocol for inter-vehicle communication / Bakhouya M., Gaber J., Wack M. // *In Proceedings Of WIRELESSVITAE'09.* – 2009. – P. 289-293.
15. Kasera K.K. A location management protocol for hierarchically organised multihop mobile wireless networks / K.K. Kasera, R. Ramanathan // *In: Proceedings of the IEEE ICUPC'97, San Diego, CA.* – October 1997. – P. 158-162.
16. Chiang C.-C. Routing in clustered multihop mobile wireless networks with fading channel, in: *Proceedings of IEEE SICON.* – April 1997. – P. 197-211.
17. A wireless hierarchical routing protocol with group mobility / [G. Pei, M. Gerla, X. Hong, C. Chiang] // *In Proceedings of Wireless Communications and Networking.* – New Orleans, 1999.
18. Johnson D.B. Dynamic Source Routing in Ad-Hoc Wireless Networks / Johnson D.B., Maltz D.A. // *Mobile Computing*, 1996. – P. 153-181.
19. Perkins C.E. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing / Perkins C.E., Royer E.M. // *Proc. of IEEE WMCSA'99, Feb. 1999.* – P. 90-100.
20. Chakeres I.D. Dynamic MANET On-demand Routing Protocol / Ian D. Chakeres, Elizabeth M. Royer, Charles E. Perkins // *IETF Internet Draft.* – Feb. 2005.
21. Swanson L. An Efficient On-Demand Cache Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks / Lee Swanson, Liu // *Proceedings of IEEE ICCSIT'09, Beijing, China.* – 2009. – P. 150-155.
22. Raju J. A new approach to on-demand loop-free multipath routing / J. Raju, J. Garcia-Luna-Aceves // *In Proceedings of the 8th Annual IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), Boston, MA.* – October, 1999. – P. 522-527.
23. Toh C. A novel distributed routing protocol to support ad-hoc mobile computing / Toh C. // *In IEEE 15th Annual International Phoenix Conf.* – 1996. – P. 480-486.
24. Signal stability based adaptive routing (SSA) for ad hoc mobile networks / R. Dube, C. Rais, K. Wang, S. Tripathi // *IEEE Personal Communication.* – 1997. – № 4 (1). – P. 36-45.
25. Минович А.И. Интеллектуальная маршрутизация в мобильных радиосетях / Минович А.И., Романюк В.А., Сова О.Я. // 19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь.: КрыМуКо'09. – 2009.
26. Hass Z.J. Zone routing protocol for ad-hoc networks / Z.J. Hass, R. Pearlman // *Internet Draft.* – 1999. – Available from:
27. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://people.ece.cornell.edu/~haas/wnl/Publications/draft-ietf-manet-zone-zrp-04.Txt>, 7/2002.
28. Boland R. OrderOne Networks / Boland R. // *Signal Online.* – July 2007. – Access mode:
29. <http://www.afcea.org/content/?q=node/1345>.
30. Lee K. A Global On-Demand Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks / Lee Kimm, Reinhart // *Proceedings of IEEE NCA2007, Boston, MA.* – 2007.

Надійшла до редколегії 19.04.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Кувшинов, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ.

ПРОТОКОЛЫ И МЕТОДЫ МАРШРУТИЗАЦИИ ПОТОКОВ ДАННЫХ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ МОБИЛЬНЫХ РАДИОСЕТЯХ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

Я.Л. Уманец

Проведен анализ существующих протоколов и методов маршрутизации потоков данных, предложенных для использования в мобильных радиосетях класса MANET. Определены направления модернизации протоколов с целью повышения эффективности функционирования мобильных радиосетей класса MANET.

Ключевые слова: методы маршрутизации, потоки данных, мобильные радиосети.

ROUTING PROTOCOLS AND METHODS IN PROSPECTIVE MOBILE RADIO NETWORKS WITH DYNAMIC TOPOLOGY

Y.L. Umanets

The analysis of existing routing protocols and methods proposed for using in MANET is presented in the article. The directions of protocols modernization to improve the MANET efficiency are defined.

Keywords: methods of routing, flows of data, mobile radio networks.