

## КООРДИНАТНА МАРШРУТИЗАЦІЯ В ІМПУЛЬСНИХ НАДШИРОКОСМУГОВИХ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ (MANET)

*Розглянуто особливості реалізації функцій методів координатної маршрутизації в імпульсних надширокосмугових мобільних радіомережах.*

*Рассмотрены особенности реализации функций методов координатной маршрутизации в импульсных сверхширокополосных мобильных радиосетях.*

*The features of the coordinate routing methods functions realization in the impulsive ultra-wideband mobile radio networks are considered.*

**Ключові слова:** координатна маршрутизація, радіомережі з можливістю самоорганізації, імпульсні надширокосмугові сигнали.

**Актуальність.** Розглядаються мобільні (MP) радіомережі з можливістю самоорганізації або мережі MANET (*Mobile Ad-Hoc Networks*) [1] – динамічна архітектура побудови мереж, з можливістю самоорганізації, яка припускає відсутність фіксованої мережевої інфраструктури (базових станцій) і централізованого управління. Вузли мережі можуть бути як мобільними так і стаціонарними. Кожен вузол виконує функції терміналу (сенсора, комп'ютера) і бездротового маршрутизатора.

Класичними областями застосування зазначених радіомереж є: сенсорні мережі, мережі поля бою й надзвичайних ситуацій, домашні й офісні мережі, мережі конференцій і віртуальних класів, мережі транспортних засобів і т.д.

Особливостями MP є: динамічна топологія; ненадійність і динамічність радіоресурсу, колективний характер його використання; обмеженість і неоднорідність ресурсів вузлів (енергоємність батарей, продуктивність процесорів, обсяг пам'яті і т.д.); обмежена безпека та ін. Забезпечити ефективне управління мобільною радіомережею, неможливо без відповідної системи управління [3], реалізованої на кожному вузлі мережі. Одним з основних завдань оперативного управління MP є маршрутизація інформаційних потоків.

Методи маршрутизації, які застосовуються в стаціонарних мережах зв'язку [4], орієнтовані на статичну мережеву топологію і неефективні в MP. За останні кілька років запропонована значна кількість методів маршрутизації для використання в MP [4 – 10]. Однак поява перспективного напрямку побудови MP на основі надширокосмугових сигналів, необхідність надання нових послуг і нові сфери застосування самих MP викликають необхідність розробки нових ефективних методів маршрутизації.

До надширокосмугових систем UWB (*UltraWide Band*) відноситься будь-яка технологія бездротового зв'язку, яка формує сигнали в діапазоні ширшому за 500 МГц або має відносну ширину смуги частот більше 0,2 [2, 3] (відносна ширина смуги частот рівна  $2 \cdot (F_H - F_L) / (F_H + F_L)$ , де  $F_H$  і  $F_L$  – відповідно верхня і нижня граничні частоти діапазону). Один з можливих способів реалізації системи UWB надає метод імпульсного радіо (IR, *Impulse Radio*), який ґрунтується на передачі дуже коротких (порядку декількох наносекунд) і малопотужних імпульсів [2, 3]. При цьому на кожен символ припадає не один, а декілька імпульсів, кількість яких визначається коефіцієнтом розширення спектру системи. Коефіцієнт розширення спектру служить для гнучкого регулювання швидкості передачі, коефіцієнта бігових помилок BER (*Bit Error Ratio*) і зони покриття системи. Положення імпульсів у межах циклу (кадру) визначається індивідуальним псевдовипадковим кодом, що присвоюється кожному абонентові.

При реалізації систем UWB методом імпульсного радіо використовуються й інші варіанти, наприклад, розширення спектру методом прямої послідовності. Перевага імпульсного радіо в тому, що воно усуває необхідність у перетвореннях з підвищенням і зниженням частоти, а також дозволяє використовувати нескладні прийомопередавачі. Крім того, даний метод дозволяє застосовувати різні методи модуляції, включаючи амплітудну маніпуляцію, амплітудноімпульсну модуляцію, фазо-імпульсну модуляцію та фазову маніпуляцію, а також використовувати різні типи приймачів, такі як детектор потужності, RAKE і приймач з виділенням несучого сигналу.

Радіомережі з імпульсними надширокосмуговими сигналами (НШС) характеризуються наступними перевагами [2, 3]:

- висока швидкість передачі;
- можливість визначення місця розташування (побудови координат розташування) вузлів;
- мала ймовірність виявлення, складність перехоплення та постановки прицільних завад;
- низьке енергоспоживання;
- простота реалізації апаратури та низька вартість;
- висока завадозахищеність і адаптивність до реальної ефірної обстановки (відсутність багатопроменевого поширення завмирання).

Але в той же час слід відзначити недоліки даних систем:

- потенційні завади існуючим вузькосмуговим системам;
- значний час синхронізації (при певних схемах синхронізації).

**Аналіз публікацій.** Всі методи маршрутизації, запропоновані для застосування в МР, можна класифікувати за наступними ознаками (рис. 1) [4]:

- за способом побудови й підтримання маршрутів: таблично-орієнтовані (далі табличні), зондові й гібридні;
- за кількістю одержувачів: однокористувальницькі, групові й „хвильові”;
- за кількістю та типом параметрів у метриці вибору маршруту: однопараметричні й багатопараметричні, енергозберігаючі, із заданою якістю обслуговування та ін.
- за кількістю маршрутів: одношляхові та багатшляхові;
- за типом маршрутів: симетричні й асиметричні.
- за наявністю обладнання позиціонування: координатні й некоординатні;
- за організацією мережі: ієрархічні й неієрархічні (однорівневі);
- за прийняттям рішень з маршрутизації: пасивні й активні (інтелектуальні).

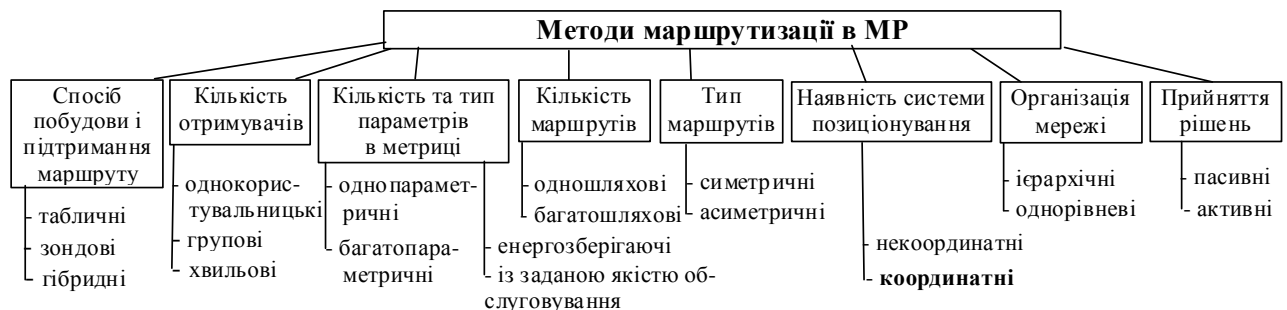


Рис. 1. Класифікація методів маршрутизації в МР

Завданням методу маршрутизації є створення, зберігання й підтримання маршруту(ів) передачі заданої якості (зазвичай найкоротшого) між відправником і адресатом. Найкоротший маршрут визначається як функція мінімальної вартості маршруту, обумовлена як сума вартостей всіх каналів маршруту.

*Табличні* методи маршрутизації припускають побудову й підтримання маршруту у вузлах мережі на основі ведення ними маршрутних таблиць і обміну маршрутними

повідомленнями (які містять змінені входи маршрутних таблиць) між вузлами. При цьому розрізняють два основні класи табличних методів, які обумовлюються алгоритмом пошуку найкоротшого шляху, що використовується (Дійкстри або Беллмана-Форда).

*Зондові* методи маршрутизації будують і обновлюють маршрути на основі зондування мережі спеціальними службовими пакетами (зондами).

При необхідності передачі в мережі інформації від одного абонента до декількох (всім) одержувачів виникає необхідність *групової (хвильової)* маршрутизації.

Залежно від параметрів, що враховуються при виборі маршруту, розрізняють *одно-* або *багатопараметричні* методи маршрутизації.

Якщо необхідно будувати й підтримувати кілька маршрутів передачі (наприклад, вимога до безпеки передачі), то говорять про *багатошляхову* маршрутизацію.

Залежно від типу радіоканалів (через неоднорідну потужність передачі вузлів) можливе застосування *асиметричної* маршрутизації між парами відправник-адресат.

При зростанні розмірності мережі до сотні й тисячі абонентів виникає завдання введення ієрархії управління мережею і, відповідно, *ієрархічної* маршрутизації.

Якщо ухвалення рішення з маршрутизації реалізоване на основі використання бази знань, то мова йде про *активну* або *інтелектуальну* маршрутизацію.

При наявності у вузлах мережі системи позиціонування можливе застосування методів *координатної* або географічної маршрутизації.

**Метою статті** є використання особливостей надширококутних сигналів при маршрутизації в IR-UWB мобільних радіомережах.

Можливість одержання в системі UWB координат місця розташування вузлів з високою точністю (до сантиметрів) дозволяє використовувати в даних мережах методи координатної маршрутизації [5, 6]. Основною перевагою даних методів маршрутизації в порівнянні з методами, що не використовують координатну інформацію, є значне зменшення обсягу службового трафіка.

Однак, за відсутності у вузлах обладнання позиціонування, наприклад, GPS (*Global Position System*), необхідно буде враховувати *особливості побудови системи позиціонування в надширококутних мобільних радіомережах*:

наявність певної затримки при побудові маршруту, пов'язаної з побудовою вузлами „карти мережі” (час на роботу алгоритмів визначення місця розташування вузлів [11] плюс час на поширення координатної інформації в мережі);

можливі помилки в інформації позиціонування через тимчасову відсутність зв'язності або зміни топології мережі – тому алгоритм маршрутизації повинен бути здатним будувати й підтримувати маршрути в умовах неповної (неточної) координатної інформації або її відсутності;

недоступна інформація про абсолютну швидкість переміщення абонентів, яку вимагають деякі алгоритми координатної маршрутизації.

При цьому методи маршрутизації повинні [4]:

– відповідати особливостям МР;

– задовольняти низці обов'язкових і/або додаткових вимог  $\{B_q\}$ ,  $q=1...Q...$ . Наприклад,  $B_1$  – децентралізоване функціонування (обов'язкова);  $B_2$  – швидка збіжність і відсутність зациклення маршрутів (обов'язкова);  $B_3$  – мінімальне завантаження мережі службовою інформацією (може виступати цільовою функцією);  $B_4$  – одержання маршруту в міру необхідності (режим „мовчання” мережі);  $B_5$  – забезпечення декількох маршрутів доставки інформації до адресату;  $B_6$  – забезпечення маршрутів заданої якості (за продуктивністю, затримкою та ін.);  $B_7$  – підтримка односпрямованих каналів;  $B_8$  – мінімізація потужності, яка витрачається вузлами, оснащеними батареями;  $B_9$  – безпека процесів маршрутизації та ін.

При синтезі (виборі) методу координатної маршрутизації необхідно реалізувати

виконання даних вимог і забезпечити наступні функції (рис. 2) [4, 5]: збір інформації про стан мережі; зберігання маршрутів; обчислення маршруту передачі пакету (визначення правил вибору одного або декількох вузлів-ретрансляторів). Розглянемо дану класифікацію детальніше.

### 1. Збір інформації про стан мережі.

За охопленням контролю стану мережі збір інформації може здійснюватися *глобально* (інформація про стан всієї мережі) або *локально* в межах певної відстані, вираженої кількістю  $(1, 2, \dots, R)$  ретрансляційних ділянок.

Тип і спосіб збору інформації про стан мережі тісно взаємопов'язані.

*Хвильовий* (потоківий, *flooding*) спосіб застосовується при зборі всієї інформації про стан мережі і спричиняє значне зростання службового трафіка, наприклад, метод OLSR [4].

*Зондовий* (*reactive*) спосіб здійснює пошук маршруту в міру необхідності (забезпечує „режим мовчання”) і передбачає хвильове розсилання в мережі спеціальних пакетів (зондів-запитів) і збір зондів-відповідей, які містять інформацію про маршрути до адресатів (для координатної маршрутизації – інформацію про координати вузлів). Представники методів зондової некоординатної маршрутизації: DSR, AODV, ABR, SSR, TORA [4] та ін., серед методів координатної – LAR (*Located-Aided Routing*) [5, 6].



Рис. 2. Функції методів координатної маршрутизації

*Проактивний* (*proactive*) або *табличний* (*table-drive*) спосіб передбачає обмін маршрутними повідомленнями між сусідніми вузлами (за аналогією з некоординатними табличними методами маршрутизації DARPA PRNET, DSDV, WRP [4]). Кожен вузол періодично (або за подіями) інформує (розсилає маршрутні повідомлення, що містять змінені входи маршрутних таблиць) своїх сусідів про координати сусідніх з ним вузлів. Приймавши маршрутне повідомлення, вузол модифікує входи своїх маршрутних таблиць. Величина періоду розсилання ( $t_{пр}$ ) координатних повідомлень визначається кожним вузлом залежно від його мобільності – координатний метод DREAM (*Distance Routing Effect Algorithm for Mobility*) [5, 6]: ближнім вузлам –  $t_{пр} = R_n / (kv)$ , де  $R_n$  – радіус передачі вузла,  $k$  – коефіцієнт,  $v$  – швидкість переміщення; дальнім вузлам –  $t_{пр} = \text{const}$ .

*Гібридний* спосіб припускає, що кожен вузол мережі збирає інформацію про координати сусідніх вузлах на глибину  $R_{мз}$  (маршрутна зона) проактивно, за межами  $R_{мз}$  – зондовим способом [4]. Величина  $R_{мз} = f(v)$  варіюється залежно від динаміки мережевої топології  $v$ . Процес побудови зони базується на знанні вузлом координат своїх сусідів. Так як коректування маршрутних таблиць здійснюється локально (у межах  $R_{мз}$ ), то обсяг службового трафіка всередині зони не залежить від розмірності мережі  $N$ , а залежить від розміру зони  $N_z$ , ступеню зв'язності вузлів  $C$  та інтенсивності зміни топології усередині зони.

### 2. Зберігання маршрутів.

Загальний підхід до *зберігання* інформації про мережу при координатній маршрутизації полягає в підтримці кожним вузлом таблиці місця розташування наступного формату:

ідентифікатор адресата  $j$ , його координати  $(x, y)_j$ , швидкість  $v_j$ , напрямок переміщення  $\gamma_j$ , час генерування даної інформації  $t_j$

Інформація про місце розташування вузлів може зберігатися двома способами: *автономним* або *розподіленим*. Перший полягає в тому, що кожен вузол ініціює процес збору інформації про стан мережі й зберігає її у своїй маршрутній таблиці, другий – припускає призначення певних вузлів, названих домашніми агентами (Home Agent – HA), які зберігають інформацію про місце розташування того або іншого вузла [6]. Роль домашнього агента може виконувати один вузол або їх сукупність.

У першому випадку при зміні свого місця розташування вузол  $d$  інформує вузол – HA ( $HA_d$ ) про нові координати (на рис. 3 зображено пунктирною лінією). Передача пакета від вузла  $s$  до вузла  $d$  може здійснюватися в такий спосіб:

- послідовно запит до домашнього агента про місце розташування  $d$  ( $s \rightarrow HA_d$ ), одержання його координат ( $HA_d \rightarrow s$ ), пересилання пакета адресатові ( $s \rightarrow d$ ) (рис. 3а);
- пересилання пакета домашньому агенту ( $s \rightarrow HA_d$ ) і він далі адресатові ( $HA_d \rightarrow d$ ) (рис. 3б).

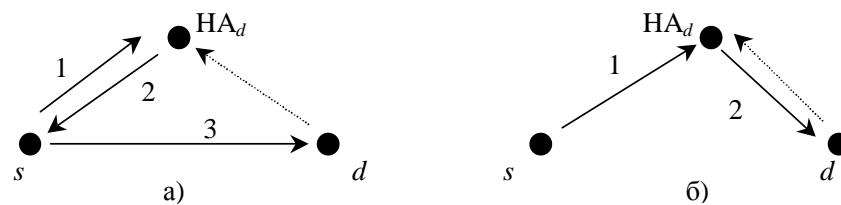


Рис. 3. Передача пакетів з використанням вузлів-НА

Однак у МР вузли-НА також мобільні й кожен з них може виявитися в незв'язній підмережі. Тому кожному вузлу необхідно вибирати кілька вузлів-НА, причому, бажано, у різних ділянках мережі. З цією метою мережа розбивається на фіксовані географічні квадрати (розмір квадрата приблизно дорівнює подвійному радіусу передачі вузла), які відомі всім вузлам мережі. Кожному вузлу присвоюється унікальний ідентифікаційний номер. Інформацію про своє місце розташування кожен вузол зберігає в трьох вузлах-НА, які перебувають у суміжних одно-, двох-, чотирьох- і далі  $2^x$ -кратних квадратах – метод GLS (*Grid Location Service*) [6]. Вибір вузлів-НА для  $i$ -го вузла (наприклад, вузла 17 на рис. 4) здійснюється за наступним правилом: вузол з більшим ідентифікаційним номером, але ближчий до  $i$  у даному  $2^x$ -кратному квадраті стає домашнім агентом. Якщо такого немає (лівий квадрат відносно розглянутого) то 17 хешується і у цьому випадку вибирається вузол 2, а не 7. На рис. 4 відносно вузла 17 домашніми агентами будуть обрані наступні вузли: у суміжних квадратах – 2, 23, 63; у суміжних 2-х кратних квадратах – 26, 31, 43; у суміжних 4-х кратних квадратах – 37, 19, 20. Інтервал розсилання вузлом координатних повідомлень своїм домашнім агентам залежить від його швидкості та взаємної відстані (чим далі HA – тим рідше розсилання).

Кожен вузол підтримує дві таблиці: координатну таблицю – з інформацією про вузли свого однократного квадрата (формується шляхом періодичного обміну координатними повідомленнями із сусідніми вузлами) і таблицю своїх домашніх агентів (містить ідентифікатор HA і його координати). При необхідності передати пакет вузлу 76 для вузла 17 (і відсутності інформації про нього в координатній таблиці), він надішле запит вузлу, що перебуває в суміжних квадратах і який має ідентифікаційний номер найближчий до номера 17, тобто вузол 76 передасть запит вузлу 21 (рис. 4). Далі аналогічно: вузол 21 передасть запит вузлу з найменшим номером у суміжні квадрати вищого рівня ієрархії (тобто 2-х кратні квадрати):  $21 > 20$ . Вузол 20 є домашнім агентом вузла 17 і тому він (згідно рис. 3): безпосередньо перенаправляє пакет вузлу 17 або повідомить координати адресата вузлу 76 для його подальшої передачі.

До переваг методу GLS також можна віднести: розподіленість функціонування, відсутність хвильового розсилання повідомлень і зменшення обсягу службового трафіка (зі збільшенням відстані від вузла кількість домашніх агентів зменшується). До недоліків – зниження ефективності при збільшенні мобільності вузлів.

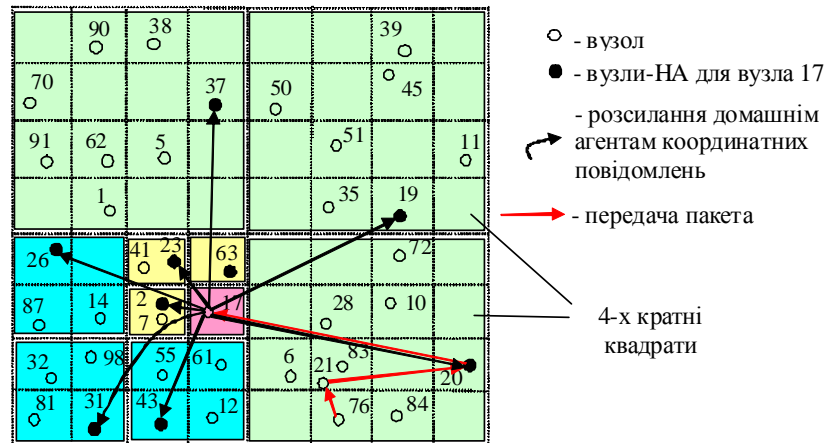


Рис. 4. Приклад реалізації методу GLS

### 3. Вибір ретранслятора (обчислення маршрутів).

Вибір ретранслятора при координатній маршрутизації полягає у визначенні напрямку пошуку адресата і розмірів області його передбачуваного розташування. Розглянемо запропоновані правила вибору ретрансляторів (або одного ретранслятора) [61, 62], які можна розбити на дві групи: *випадковий* вибір ретранслятора („спрямована хвиля” або „спрямоване зондування”) і *фіксований* вибір (рис. 3 – 5). Будемо використовувати наступні допущення й позначення: вузли знають координати сусідів на відстані  $1 \dots R$  ретрансляційних ділянок, кожен вузол може змінювати потужність передачі, вузол  $s$  – відправник, вузол  $d$  – адресат,  $N_i$  – множина вузлів-сусідів вузла  $i$ . У заголовку переданого пакета міститься інформація про координати вузлів відправника, адресата й унікальний номер, що дозволяє розрізнити дублікати пакета.

3.1. *Випадковий вибір ретрансляторів.* На етапі побудови маршруту при координатній маршрутизації використовується координатна інформація для обмеження зони розсилання зонда-запиту (ЗЗ). Зона розсилання зонда-запиту задається в його поле й може визначатися у вигляді півкола, прямокутника або сектора.

а) *Випадковий вибір ретрансляторів, які знаходяться ближче до адресата.* Формат ЗЗ містить координати передавального вузла, координати адресата й час одержання даної інформації. Передача ЗЗ від відправника  $s$  адресатові  $d$  відбувається за наступним алгоритмом. Кожен вузол  $i$  (спочатку  $s$ ) передає ЗЗ своїм сусіднім вузлам  $j \in N_i$ . Якщо  $r_j < r_i - \delta$ , де  $r$  – відстань до адресата  $d$  і  $\delta = \text{const}$  (визначається похибкою системи позиціонування), тоді  $j$  ретранслює пакет, інакше він його стирає. Вузол  $s$  передає пакет всім своїм сусіднім вузлам  $N_s$ . Кожен вузол на шляху до адресата виконує аналогічні дії (рис. 5).

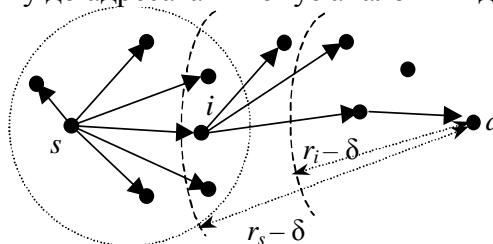


Рис. 5. Випадковий вибір ретранслятора ближчого до адресата

Для скорочення кількості передач можна запропонувати наступні правила:

– введення затримки передачі пакета  $t_{зп}$ , яка визначається відстанню до адресата:  $t_{зпi} < t_{зпj}$ , якщо  $r_j < r_i$  (вузол, отримавши передачу сусіда, який знаходиться ближче до адресата, не передає даний пакет);

– введення параметра  $\delta$ , що обмежує кількість ретрансляторів. Якщо значення  $\delta$  визначається при кожній ретрансляції пакета, то говорять про динамічну зміну розмірів області пошуку адресата;

б) *Випадковий вибір ретрансляторів у прямокутній області*, визначеній відправником. У переданому ЗЗ відправник  $s$  задає область пошуку адресата  $d$  у вигляді кола із центром у точці  $(x_d, y_d)$  і радіусом  $R = v_d(t_1 - t_0)$ , де  $v_d$  – максимальна швидкість переміщення адресата,  $t_0$  – час одержання останнього корегування його координат,  $t_1$  – поточний час. Зона розсилання (множина ретрансляторів ЗЗ) визначається у вигляді прямокутника  $sabc$  (рис. 6а) при розташуванні  $s$  за межами передбачуваного місця розташування  $d$  або  $abcf$  (рис. 6б), коли  $s$  перебуває усередині даної області з координатами  $(x_s, y_s)$  в одному куті й координатами кола, визначеного  $d$ , в іншому.

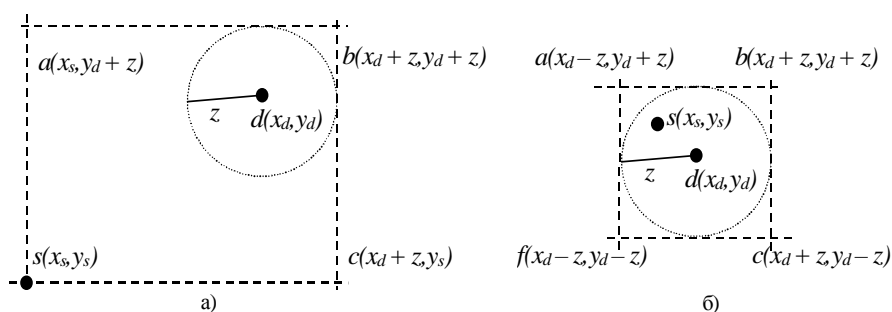


Рис. 6. Область вибору ретранслятора задається у вигляді прямокутника

в). *Випадковий вибір ретрансляторів, які знаходяться в секторі в напрямку до адресата* (рис. 7).

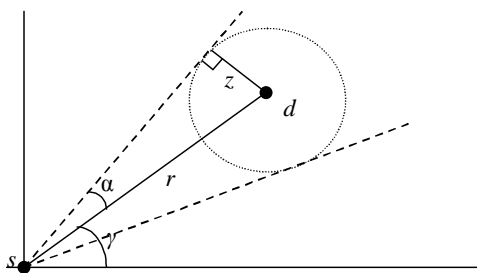


Рис. 7. Ретранслятор вибирається в секторі  $[\gamma - \alpha, \gamma + \alpha]$

Напрямок (сектор) передачі визначається в такий спосіб. Якщо вузлу  $s$  відома відстань  $r_d$  до адресата  $d$  і максимальна швидкість його переміщення  $v_d$ , те він може обчислити можливу область його розташування. Напрямок пошуку задається кутом  $\alpha = \arcsin(v_d(t_1 - t_0)/r_d)$ , де  $t_1, t_0$  – поточний час і час одержання координатної інформації. Якщо величина  $z = v_d(t_1 - t_0) > r_d$ , тоді вузол може перебувати в будь-якому напрямку й величина  $\alpha = \pi$ . Якщо відомо функцію щільності розподілу швидкості переміщення вузла, то можна обчислити задану ймовірність  $P_n$  знаходження адресата  $d$  у напрямку  $[\gamma - \alpha, \gamma + \alpha]$

$$P_n \leq P(z \leq v(t_1 - t_0)) = P(r \sin \alpha \leq v(t_1 - t_0)) = P(v \geq r \sin \alpha / (t_1 - t_0)) = \int_{r \sin \alpha / (t_1 - t_0)}^{\infty} f(v) dv.$$

У переданому пакеті (крім координат відправника й адресата) міститься передбачуваний напрямок знаходження адресата. Якщо при передачі пакета від вузла  $s$  до вузла  $d$  ретранслятор  $N_s \in$  сектору  $[\gamma - \alpha, \gamma + \alpha]$ , тоді пакет ретрансляється далі, інакше він стирається. Кожен вузол на шляху до адресата визначає новий напрямок його знаходження ( $\alpha$  та  $\gamma$ ) і виконує аналогічні дії.

3.2. *Фіксований вибір ретранслятора.* Розглянемо різні правила вибору  $RT$  ретранслятора(ів) вузлом  $s$ ,  $RT \in N_s$  (рис. 8а) [6]:

а) ближній до адресата (GEDIR, *GE*ographical *D*istance *R*outing);

$$RT = \min (|N_s, d|) = h;$$

б) у напрямку адресата з максимальним просуванням до нього (MFR, *M*ost *F*orward *w*ithin *R*adius)

$$RT = \min (|N_s', d|) = |a', d| = a, \text{ де } a' - \text{проекція вузла } a;$$

в) ближній до передавального вузла з просуванням до адресата (NFR, *N*earest *F*orward *w*ithin *R*adius)

$$RT = \min (|s, N_s|) \text{ and } (|s, d| > |N_s, d|) = c;$$

г) з мінімальним кутом у напрямку адресата (*C*ompass)

$$RT = \min \angle N_s, s, d = \angle f, s, d = f.$$

д) вибір двох ретрансляторів, розташованих по зовнішньому боці направленої сектору та ближніх до адресата (V-GEDIR) та ін.

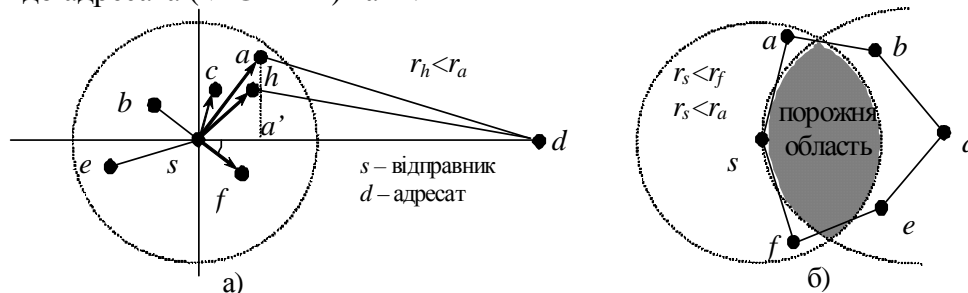


Рис. 8. Ілюстрація правил вибору ретранслятора

Залежно від обсягу збору інформації про стан мережі правила вибору ретранслятора будуть аналогічні для вузлів, що перебувають на відстані 2-х, 3-х і  $R$  ретрансляційних ділянок. Доведено, що правила вибору ретрансляторів, які базуються на зменшенні відстані до адресата, не викликають зациклення маршрутів передачі інформації.

Однак можлива низка структур мережі, що не дозволяє розглянутим правилам гарантувати доставку пакета адресатові. На рис. 8б вузол-відправник  $s$  розташований ближче до адресата  $d$ , ніж вузли  $a$  і  $f$ . У цьому випадку застосування будь-якого правила, яке базується на зменшенні відстані до адресата, не дозволить знайти маршрут навіть при його наявності:  $s-a-b-d$  і  $s-f-e-d$ . Тому для даної ситуації використовується правило обходу області без вузлів по її периметрі: *при відсутності ретранслятора, який скорочує відстань до адресата, вибрати вузол  $f$  (а), що перебуває праворуч (ліворуч) за (проти) годинниковою стрілкою і знаходиться на відстані більшій, ніж відправник. Відзначити в переданому пакеті даний режим передачі (передача по периметрі, установивши прапор  $P = 1$ ) і передати вузлу  $f$  (а) пакет.* Відповідно до даного правила вузол  $s$  передасть пакет вузлу  $f$ , який потім установить прапор  $P = 0$  і передасть пакет далі, використовуючи раніше розглянуті правила вибору ретранслятора.

Застосування того або іншого правила вибору ретранслятора повинне визначатися цільовою функцією управління даного вузла (мінімізація часу доставки пакета – стратегія GEDIR, мінімізація потужності передач вузлів – NFR і т.д.) і реальною ситуацією в мережі (динаміка топології, рівень навантаження та ін.) [10].

3.3. *Багатопараметрична маршрутизація.* Крім параметрів, що визначають місце розташування вузлів мережі, може знадобитися й ряд інших (пропускна здатність, час затримки передачі, витрата енергії на передачу та ін.), які визначають побудову маршруту за заданими вимогами до якості передачі (QoS).

У низці робіт [7 – 9] пропонується використовувати багатопараметричну маршрутизацію з використанням наступних метрик  $c_i$ ,  $i = 1 \dots I$  вибору маршрутів:



- $c_1$  – потужність передачі вузла;
- $c_2$  – наявність синхронізації між вузлами;
- $c_3$  – рівень взаємних завад (MUI);
- $c_4$  – надійність доставки інформації;
- $c_5$  – рівень трафіка;
- $c_6$  – затримка передачі та ін.

Вартість маршруту представляється адитивною згортокою з даних метрик.

Однак необхідно відзначити, що обчислення найкоротшого маршруту табличними методами маршрутизації при використанні вже 2-х метрик відноситься до класу NP-повних задач. Тому використання множини метрик при табличній маршрутизації буде вимагати значної обчислювальної продуктивності процесора вузла, тому множину метрик доцільно використовувати при зондовій маршрутизації. При цьому для мінімізації обсягу інформації, яка збирається і, відповідно, обсягу службового трафіка необхідно враховувати стан мережі, зовнішнього середовища і самого вузла. У цій ситуації доцільно використовувати інтелект - знання про правила вибору метрик і способів збору інформації про стан мережі та використовувати новий інтелектуальний метод маршрутизації, запропонований в [10].

#### 4. Ретрансляція пакетів за маршрутом.

Ретрансляція пакетів за маршрутом може здійснюватися такими способами: послідовно (кожен вузол має право змінювати маршрут за своїм розсудом), відправником (маршрут жорстко визначається й фіксується відправником), за декількома маршрутами і спрямованою хвилею (при побудові маршрутів або для підвищення надійності доставки пакетів). Рішення про вибір способу ретрансляції повинне прийматися відповідною системою управління кожного вузла мережі залежно від ситуації в мережі й вимог до передачі трафіка [10].

#### 5. Додаткові функції.

Дослідження МР великої розмірності показали, що навіть незначне підвищення динаміки топології мережі приводить до значного росту службового трафіка. Інтенсивність потоку службової інформації зростає квадратично (добуток кількості вузлів на величину топологічних змін). Очевидно, що для вирішення цієї задачі необхідно ввести ієрархічне управління МР – провести розбивку мережі на окремі зони (кластери) з виділенням головних вузлів зони, вузлів-шлюзів і внутрішніх вузлів [4]. Множина головних вузлів і виділені вузли-шлюзи утворюють віртуальну магістраль у мережі, яка може використовуватися як для поширення маршрутної інформації, так і для передачі корисної інформації.

У методі GRID [6] передбачається введення ієрархії управління в мережі, логічно розділеної на квадрати, кожен з яких пронумерований (рис. 9). Координати вузла відповідають координатам квадрата. У кожному квадраті один з вузлів стає головним. На нього покладають функції збору координатної інформації мережі, поширення її у квадраті й функції ретрансляції пакета. Кожен вхід координатної таблиці вузла містить номер наступного квадрата до адресата, тобто маршрут являє собою послідовність квадратів, а не вузлів. Даний спосіб дозволяє зменшити обсяги службового трафіка, але вимагає реалізації алгоритму знаходження й підтримання головних вузлів квадратів мережі. На рис. 9а зображений вихідний стан мережі, на рис. 9б переміщення вузлів  $a$  і  $s$  в інші квадрати, вибір нових головних вузлів  $i$ , відповідно, зміна маршруту передачі пакета.

Ефективність методів координатної маршрутизації може бути оцінена за двома групами показників [4]:

- а) *локальні показники*, що визначають витрати часу, ресурсів мережі для передачі службової інформації, а також ресурсів зберігання й обчислення маршрутів.
  - час, необхідний для побудови маршруту (часова складність методу);
  - кількість (обсяг) службових повідомлень, які використовуються для побудови маршруту (зв'язна складність методу);

– розміри маршрутних таблиць і алгоритм обчислення маршрутів (обчислювальна складність методу).

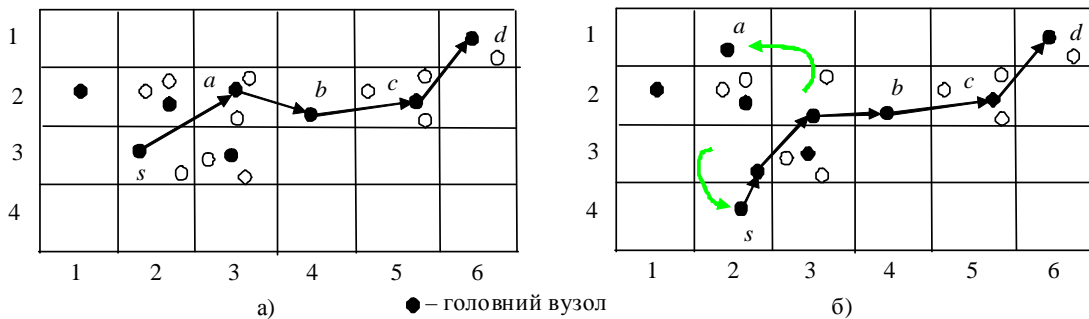


Рис. 9. Передача пакету методом GRID

б) *глобальні показники*. Маршрутизація виступає в ролі підсистеми системи управління мережею й тому необхідно оцінювати її ефективність за показниками функціонування самої мережі:

- пропускна здатність;
- середній час затримки передачі повідомлень;
- середня потужність, яка витрачається на передачу;
- ефективність використання службових повідомлень (співвідношення обсягів або кількості службових та інформаційних повідомлень).

Дотепер розглядалося, що топологія мережі незмінна й маршрути будуються на наявній топології. Однак управління топологією часто дає більший вигравш, у порівнянні з маршрутизацією. В [12] зроблений висновок, що для МР доцільно ввести спеціальний підрівень управління топологією на мережному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем, який працює разом з підрівнем маршрутизації.

### **Висновки**

1. Застосування надширокосмугових сигналів дозволяє вузлам одержувати координати місця розташування з точністю до сантиметрів і, відповідно, здійснювати координатну маршрутизацію. Однак необхідна підтримка мережею і методів некоординатної маршрутизації через *особливості системи позиціонування в надширокосмугових радіомережах*: наявність затримки пов'язаної з побудовою вузлами „карти мережі”; можливість помилок в інформації позиціонування; відсутність інформації про абсолютну швидкість переміщення абонентів.

2. Синтез основних функцій маршрутизації (збір інформації про стан мережі, зберігання маршрутів, обчислення маршруту передачі пакета) необхідно робити залежно від розмірності мережі, вимог до неї, умов її функціонування й типу трафіка, який передається.

3. Застосування координатної маршрутизації дозволяє значно зменшити обсяг службового трафіка в порівнянні з некоординатними методами й відповідно збільшити пропускну здатність мережі, а також зменшити затримку передачі пакетів при значній динаміці зміни топології мережі.

4. Застосування правил вибору ретранслятора („найближчий до адресата”, „максимальне просування до адресата”, „найближчий до передавального вузла із просуванням до адресата”, „мінімальний кут у напрямку адресата” та ін.), використання конкретних метрик вибору маршруту (потужність передачі, відстань та ін.) буде визначатися цільовою функцією управління даного вузла, вимогами до передачі на основі інтелектуальної маршрутизації.

5. Для виконання вимог до інформаційного обміну в мережах радіозв'язку з можливістю самоорганізації та зменшення обсягу службового трафіка доцільно ввести

координацію взаємодії та інтелектуалізацію за рівнями моделі OSI і функціями управління.

Напрямок подальших досліджень є одержання значень показників ефективності функціонування різних методів координатної маршрутизації в конкретних радіомережах.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Романюк В.А. Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий // Сети и телекоммуникации, 2003. – № 12. – С. 62 – 68.
2. Шахнович И. Сверхширокополосная связь. Второе рождение? // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 4/2001.
3. Hüseyin Arslan, Zhi Ning Chen, Maria-Gabriella Di Benedetto. UltraWide Band Wireless Communication // WILEY-INTERSCIENCE A JOHN WILEY & SONS, INC.
4. Миночкин А.И., Романюк В.А. Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути решения // Зв'язок. – 2006. – № 7. – С. 49 – 55. [http://viti.kpi.ua/Articles/rva/rva\\_2006\\_07\\_67.pdf](http://viti.kpi.ua/Articles/rva/rva_2006_07_67.pdf).
5. Романюк В.А. Геомаршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2001. – № 5. – С. 37 – 39.
6. Mauve M., Widmer J., Hartenstein H. A Survey on Position-Based Routing in Mobile Ad Hoc Networks // IEEE Networks, November/December, 2001.
7. Abdrabou A., Zhuang W. A Position-Based QoS Routing Scheme for Ad Hoc Networks // In Proceeding ICC, 2006.
8. Baldi P., Nadris L., Benedetto M. Modeling and Optimization of UWB Communication Networks Trough a Flexible Cost Function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 20, no. 9, Dezember, 2002.
9. Benedetto M., Nadris L. Cognitive routing in UWB networks // In Proceeding of IEEE International Conference on UWB (ICUMB), September 2006.
10. Міночкін А.І., Романюк В.А., Сова О.Я. Інтелектуальний метод маршрутизації в мобільних радіомережах // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2009. – № 2. – С. 88 – 97. [http://viti.kpi.ua/Articles/rva/rva\\_2009\\_01.pdf](http://viti.kpi.ua/Articles/rva/rva_2009_01.pdf).
11. Sapkun G., Hamdi M., Hubaux J.P. GPS-free position in mobile ad-hoc networks // In Proceedings of HICSS, 2001, pp. 3481 – 3490.
12. Миночкин А.И., Романюк В.А. Управление топологией мобильной радиосети // Зв'язок. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33. [http://viti.kpi.ua/Articles/rva/rva\\_2003\\_02\\_40.pdf](http://viti.kpi.ua/Articles/rva/rva_2003_02_40.pdf).