

УДК 621.306.4

Новіков В. І., ст. викладач,
НТУУ «КПІ»**МЕТРИКИ ВАРТОСТІ З'ЄДНАННЯ ТА ПРОГРЕСУ ДЛЯ
ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ
СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ**

Запропоновано нові та модифіковані метрики вартості з'єднання та прогресу. Розроблені метрики більш точно оцінюють накладні витрати, викликані втратами пакетів у реальних радіоканалах.

Предложены новые и модифицированные метрики стоимости соединения и прогресса. Разработанные метрики более точно оценивают накладные расходы, вызванные потерями пакетов в реальных радиоканалах.

Proposed new and modified cost metric connection and progress. Developed metrics to more accurately evaluate the overhead caused by packet loss in real-world radio channels.

Вступ. Задача пошуку оптимальних маршрутів полягає у виявленні шляхів доставки пакетів з мінімальною вартістю, яка визначається як сума вартостей з'єднань, через які цей шлях проходить. Отже, необхідно задати деяку метрику вартості з'єднання для обчислення міри витрат ресурсів вузлів та мережі на передачу пакета по даному з'єднанню між двома сусідніми вузлами.

Аналіз досліджень і публікацій. При маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах (БСС) по віртуальним координатам (при ВК-маршрутизації) вартість маршруту безпосередньо між вузлом-відправником та вузлом - одержувачем в явному вигляді не обчислюється, так як пошук ґрунтується на мінімізації віртуальної відстані, розрахованої за віртуальними координатами вузлів. Однак в випадку, якщо кожен елемент вектора віртуальних координат вузлів дорівнює вартості оптимального шляху між даними вузлом та відповідним опорним вузлом, метрика вартості з'єднання використовується для побудови системи віртуальних координат. У всіх відомих методах ВК-маршрутизації (крім LCR) під відстанню між звичайним і опорним вузлом розуміється мінімальна кількість переходів, за яку пакет може дійти від опорного вузла до того, що розглядається, та навпаки, тобто довжина найкоротшого шляху між ними. Отже, в цьому випадку всім з'єднанням присвоюється однакова вартість.

Постановка завдання. Позначимо зазначену вище метрику постійної вартості зв'язку як $M_{const} = 1$. Безпроводові з'єднання в БСС

можуть значно відрізнятись надійністю, що ніяк не враховується метрикою M_{const} , тому при її використанні можуть бути обрані маршрути з низькою якістю зв'язку, що згодом призведе до зниження точності рішення задач пошуку оптимальних маршрутів.

Таким чином метрика вартості з'єднання повинна використовувати інформацію про поточну якість зв'язку в конкретних умовах експлуатації, в тому числі з урахуванням вкрай ймовірної асиметрії. Пропонується розробити метрики вартості з'єднань, які більш адекватно відображають особливості застосовуваних в БСМ малопотужних радіоканалів, для обчислення віртуальних координат при ненадійних каналах зв'язку. Розробити метрики прогресу для оптимізації витрат ресурсів вузлів як для кожного маршруту окремо, так і з балансуванням мережевого навантаження, застосування яких підвищить ефективність принципу ВК-маршрутизації при збереженні його переваг.

Розробка математичної моделі. Модель передавання пакетів з підтвердженням успішного прийому

Схема передачі пакетів даних з позитивним підтвердженням прийому є відомим способом підвищення надійності пакетної передачі даних і використовується у багатьох алгоритмах множинного доступу до середовища в провідних і безпроводних системах. Відповідно до цієї схеми - вузол-відправник v передає пакет даних сусідньому вузлу-одержувачу w , який у разі успішного прийому пакета без помилок відправляє пакет підтвердження, в іншому випадку прийнятий пакет ігнорується. Якщо після закінчення зумовленого проміжку часу (тайм-ауту) вузол-відправник v не отримує пакет підтвердження, пакет даних передається повторно. Описані операції виконуються доти, поки вузол-відправник не отримає пакет підтвердження без помилок, чи не буде перевищено допустиму кількість спроб доставки пакета.

Для опису якості зв'язку між вузлами v та w використовуємо два параметри:

- $p_{tx,vw}(L)$ - ймовірність безпомилкової передачі від вузла v до вузла w пакета довжиною L байт;
- $p_{rx,vw}(L)$ - ймовірність безпомилкового прийому вузлом v від вузла w пакета довжиною L байт.

Вузол w аналогічним чином характеризує з'єднання з вузлом v . При цьому

$$p_{tx,vw}(L) = p_{rx,vw}(L), \quad (1)$$

але в загальному випадку

$$p_{tx,vw}(L) \neq p_{rx,vw}(L)$$

оскільки можлива асиметрія якості зв'язку.

Пакет даних вважається успішно доставленим, якщо він був прийнятий вузлом-одержувачем w без помилок і вузол-відправник v

отримав відповідний пакет підтвердження також без помилок, тому ймовірність втрати пакета даних дорівнює

$$p_{l,vw} = 1 - p_{tx,wv}(L_d)p_{rx,vw}(L_a)$$

де

L_d - довжина пакету даних, байт;

L_a - довжина пакету підтвердження, байт.

Використовуючи тотожність (1) і прибираючи для зручності індекс «vw», отримуємо вираз для ймовірності втрати пакету даних при його передачі від вузла v до вузла w

$$p_l = 1 - p_{tx}(L_d)p_{rx}(L_a),$$

в якому використовуються показники надійності з'єднання з боку вузла v , передаючого пакет даних.

Ймовірність виконання рівна k спроб доставки пакета даних дорівнює

$$P_r(X = k) = \begin{cases} p_l^{k-1}(1 - p_l), & \text{при } 1 \leq k < N \\ p_l^{k-1}, & \text{при } k = N \end{cases}$$

де N - максимально допустима кількість спроб передачі пакета даних.

Тоді математичне сподівання кількості переданих пакетів даних визначається виразом

$$\begin{aligned} \mu_d(N) &= \sum_{k=1}^N k P_r(X = k) = (1 - p_l) \sum_{k=1}^{N-1} k p_l^{k-1} + N p_l^{N-1} = \\ &= (1 - p_l) \frac{d}{dp_l} \left(\sum_{k=1}^{N-1} p_l^k \right) + N p_l^{N-1} = (1 - p_l) \frac{d}{dp_l} \left(\frac{p_l - p_l^N}{1 - p_l} \right) + N p_l^{N-1} = \\ &= \frac{1 + (N-1)p_l^N - N p_l^{N-1}}{1 - p_l} + N p_l^{N-1} = \frac{1 - p_l^N}{1 - p_l}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для спрощення подальших розрахунків будемо розглядати граничний випадок $\mu_d = \lim_{N \rightarrow \infty} \mu_d(N)$. Таким чином, середня кількість пакетів даних, переданих у рамках однієї транзакції, дорівнює

$$\mu_d = \frac{1}{p_{tx}(L_d)p_{rx}(L_a)} = \frac{1}{\psi(\beta_{tx}, L_d)\psi(\beta_{rx}, L_a)} \quad (3)$$

На кожен прийнятий без помилок пакет даних вузол-одержувач відправляє пакет підтвердження. Отже, математичне сподівання кількості переданих пакетів підтвердження дорівнює

$$\mu_a = p_{tx}(L_d)\mu_d = \frac{1}{p_{rx}(L_a)} = \frac{1}{\psi(\beta_{rx}, L_a)} \quad (4)$$

Модифікована метрика «очікувана кількість передач»

Запропонована в роботі [1] метрика «очікувана кількість передач» ETX присвоює в якості вартості з'єднання математичне сподівання кількості переданих пакетів даних, включаючи повторні передачі через втрату пакетів. Метрика обчислюється за виразом (3), але замість істинних ймовірностей $p_{tx}(L_d)$ та $p_{rx}(L_a)$ використовуються їх оцінки \hat{p}_{tx} і \hat{p}_{rx} відповідно, тобто

$$ETX = \frac{1}{\hat{p}_{tx}\hat{p}_{rx}} \quad (5)$$

В [1] показано, що в статичній мережі метрика ETX забезпечує більшу пропускну здатність у порівнянні з традиційною метрикою M_{const} за рахунок використання з'єднань з більшою надійністю і, отже, меншою кількістю втрат пакетів.

У методі ВК-маршрутизації LCR [2] запропоновано використовувати метрику ETX при обчисленні віртуальних координат, але детального дослідження впливу цієї метрики на ефективність ВК-маршрутизації не виконано. При цьому слід зазначити, що LCR є єдиним методом ВК-маршрутизації, в якому застосовується функція відмінна від звичайної метрики постійної вартості з'єднання M_{const} .

Для обчислення оцінок якості вхідного \hat{p}_{rx} та вихідного зв'язків \hat{p}_{tx} вузли періодично передають спеціальні ширококомвні сигнальні пакети фіксованого розміру або використовують пасивну схему вимірювання. Однак недолік даної метрики полягає в тому, що при її розрахунку за формулою (5) не враховується розмір переданого пакета даних і розмір пакету підтвердження, які можуть значно відрізнятися від розміру сигнальних пакетів. У цій роботі пропонується модифікований варіант метрики «Очікувана кількість передач», в якому усувається зазначений недолік.

Нехай для оцінки якості зв'язку використовуються ширококомвні сигнальні пакети довжиною L_p байт, тобто отримані величини \hat{p}_{tx} і \hat{p}_{rx} є оцінками ймовірностей успішної передачі і прийому пакетів довжиною L_p . Тоді за допомогою функції зворотної до $\psi(\beta, L)$ можна обчислити оцінки ймовірностей бітової помилки при передачі та прийомі:

$$\hat{\beta}_{tx} = \psi^{-1}(\hat{p}_{tx}, L_p)$$

зворотна функція має вигляд

$$\hat{\beta}_{rx} = \psi^{-1}(\hat{p}_{rx}, L_p)$$

Зокрема, для виразу

$$\psi(\beta, L) = (1 - \beta)^{8L} \quad (6)$$

$$\beta = \psi^{-1}(p, L) = 1 - \sqrt[8L]{p} \quad (7)$$

В результаті, використовуючи (3), отримуємо формулу модифікованої метрики «очікувана кількість передач» (Modified expected transmission count):

$$M_{METX} = \frac{1}{\psi(\hat{\beta}_{tx}, L_d) \psi(\hat{\beta}_{rx}, L_a)} \quad (8)$$

Зауважимо, що на відміну від (5) запропонована метрика (8) відображає вплив асиметрії якості зв'язку на вартість з'єднання. Дійсно, згідно (8) «ціна» передачі пакету даних від вузла v до вузла w дорівнює

$$M_{METX}(vw) = \frac{1}{\psi(\hat{\beta}_{tx, vw}, L_d) \psi(\hat{\beta}_{rx, vw}, L_a)}$$

а витрати на передачу у зворотному напрямку (від w до v)

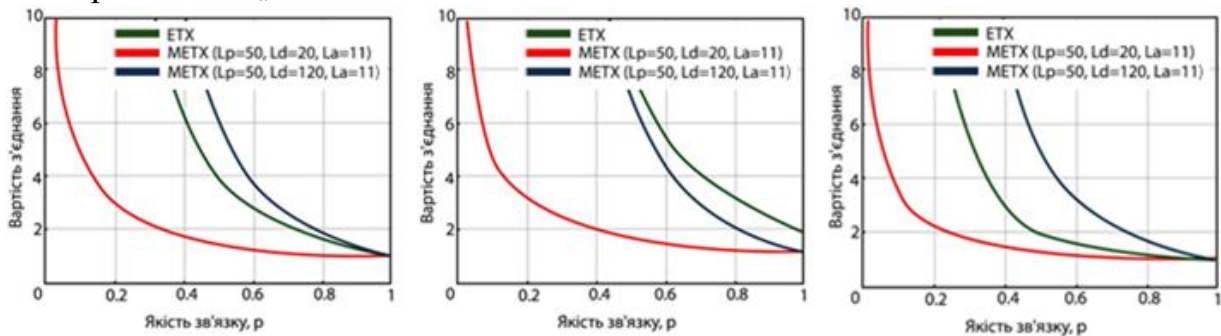
$$M_{METX}(wv) = \frac{1}{\psi(\hat{\beta}_{tx,wv}, L_d) \psi(\hat{\beta}_{rx,wv}, L_a)}$$

Використовуючи (6) і (7) і враховуючи, що за визначенням мають місце рівності $\hat{\beta}_{tx,vw} = \hat{\beta}_{rx,wv}$ та $\hat{\beta}_{rx,vw} = \hat{\beta}_{tx,wv}$ можна записати вираз для відношення цих величин:

$$\frac{M_{METX}(vw)}{M_{METX}(wv)} = \left(\frac{1 - \hat{\beta}_{rx,vw}}{1 - \hat{\beta}_{tx,vw}} \right)^{8(L_d - L_a)} = \left(\frac{1 - \hat{\beta}_{tx,wv}}{1 - \hat{\beta}_{rx,wv}} \right)^{8(L_d - L_a)}$$

Звичайна метрика ETX (6) еквівалентна випадку $L_p = L_d = L_a$, тому співвідношення (9) приймає значення 1 при будь-яких показниках якості безпроводових з'єднань. Але, як правило, $L_d > L_a$, тому з (9) випливає, що якщо для вузла v надійність вихідного з'єднання вище надійності вхідного ($\hat{\beta}_{tx,vw} < \hat{\beta}_{rx,vw}$), то витрати на передачу пакету даних від нього до вузла w будуть нижчі, ніж при доставці в зворотному напрямку. При цьому різниця вартості буде сильніше проявлятися із збільшенням різниці довжин пакетів даних і підтвердження, так як ймовірність втрати пакета експоненціально залежить від його розміру.

На рис. 1 показані приклади залежності M_{METX} від розмірів пакетів при каналі з симетричною якістю зв'язку та за наявності асиметрії. Видно, що вартості з'єднання, розраховані за модифікованою матрицею (8) і за звичайною (6), значно відрізняються. Величина різниці визначається співвідношенням розмірів сигнальних пакетів L_p , пакетів даних L_d і пакетів підтвердження L_a .



(а) $\hat{p}_{tx} = \hat{p}_{rx} = p$ (б) $\hat{p}_{tx} = \hat{p}_{rx} = 0.5 p$ (в) $\hat{p}_{tx} = p \hat{p}_{rx} = \min(2p, 1)$

Рис. 1. Порівняння звичайної та модифікованої метрик «очікувана кількість передач»

Модифікована метрика «очікувана тривалість передачі»

У загальному випадку в безпроводовій мережі можуть використовуватися приймачі з різною пропускною здатністю, але для метрик ETX і M_{METX} вони всі еквівалентні. Для усунення цього недоліку в [4] була запропонована метрика « очікувана тривалість передачі» ETT (Expected transmission time):

$$ETT = ETX \frac{L_d}{B}$$

де B - пропускна здатність з'єднання (технічна швидкість передачі даних), байт/с.

Таким чином, метрика ETT враховує як можливі втрати пакетів, так і пропускну здатність каналу зв'язку, але при цьому як і раніше використовуються оцінки якості зв'язку без урахування розміру пакетів, тому аналогічно попередньому варіанту доцільно модифікувати метрику «очікувана тривалість передачі» до наступного вигляду:

$$M_{METT} = \frac{L_d}{B\psi(\hat{\beta}_{tx,L_d})\psi(\hat{\beta}_{rx,L_d})} \quad (11)$$

Метрика M_{METT} (Modified expected transmission time) відрізнятиметься від її звичайного варіанта (10) тільки за рахунок першого множника, тобто характер відмінностей буде аналогічний, показаному на рис. 1.

Метрика «очікувана загальна кількість передач»

У розглянутих метриках «очікувана кількість передач» і «очікувана тривалість передачі» враховуються тільки витрати на передачу пакетів даних. Однак у БСМ, як правило, пакети мають відносно малий розмір (порядку декількох десятків байт), тому довжина пакету даних може бути порівнянна з розміром пакета підтвердження. Крім того, іноді пакети підтвердження можуть використовуватися не тільки для повідомлення про успішний прийом пакету даних, але і нести корисне інформаційне навантаження, що збільшує їх розмір. Тому накладні витрати через їх втрату теж слід враховувати при розрахунку вартості з'єднання.

Метрику «очікувана загальна кількість передач» (Expected total transmission count) пропонується задати як сумарну очікувану кількість пакетів даних і пакетів підтвердження, переданих у рамках однієї транзакції доставки даних. Тоді з виразів (3) і (4) випливає, що метрика повинна мати вигляд

$$M_{ETT\bar{X}} = \mu_d + \mu_a = \frac{1}{\psi(\hat{\beta}_{tx,L_d})\psi(\hat{\beta}_{rx,L_d})} + \frac{1}{\psi(\hat{\beta}_{rx,L_d})} = \frac{1+\psi(\hat{\beta}_{tx,L_d})}{\psi(\hat{\beta}_{tx,L_d})\psi(\hat{\beta}_{rx,L_d})} \quad (12)$$

Запишемо аналогічне (4.36) вираз для метрики $M_{ETT\bar{X}}$:

$$\frac{M_{ETT\bar{X}}(vw)}{M_{ETT\bar{X}}(wv)} = \frac{1+(1-\hat{\beta}_{tx,vw})^{8L_d} (1-\hat{\beta}_{rx,vw})^{8(L_d-L_a)}}{1+(1-\hat{\beta}_{rx,vw})^{8L_d} (1-\hat{\beta}_{tx,vw})^{8(L_d-L_a)}} \quad (13)$$

Наведене співвідношення показує, що формула (12) відображає асиметрію якості зв'язку при будь-яких розмірах пакетів. У граничному випадку отримуємо

$$\lim_{L_d \rightarrow L_a} \frac{M_{ETT\bar{X}}(v)}{M_{ETT\bar{X}}(w)} = \frac{1 + (1 - \hat{\beta}_{tx,v})^{8L_a}}{1 + (1 - \hat{\beta}_{rx,v})^{8L_a}}$$

на відміну від тотожної одиниці для модифікованої метрики «очікувана кількість передач» M_{METX} (9).

Таким чином, запропонована метрика «очікувана загальна кількість передач» є більш універсальним варіантом оцінки вартості з'єднання на основі надійності зв'язку в порівнянні як із звичайною, так і з модифікованою метрикою «очікувана кількість передач».

Метрика «очікувана загальна тривалість передачі»

Метрику «очікувана загальна тривалість передачі» (Expected total transmission time) задамо як сумарні очікувані витрати часу на передачу всіх пакетів даних і пакетів підтвердження, тобто

$$M_{ETTT} = \mu_d \frac{L_d}{B} + \mu_a \frac{L_a}{B} = \frac{L_d + L_a \psi(\hat{\beta}_{tx}, L_d)}{B \psi(\hat{\beta}_{tx}, L_d) \psi(\hat{\beta}_{rx}, L_a)} \quad (14)$$

Таким чином, метрика M_{ETTT} є аналогом метрики M_{METT} , але з урахуванням як пакетів даних, так і пакетів підтвердження.

Метрики віртуальної відстані

Для виконання геометричної маршрутизації необхідно мати координати вузлів і функцію визначення відстані між ними – метрику відстані. При маршрутизації за реальними географічними координатами вузлів використовується звичайна Евклідова норма, так як вона дійсно відображає відстань між вузлами в фізичному просторі. Однак через неортогональність системи координат для ВК-маршрутизації обґрунтованим може бути застосування найрізноманітніших метрик відстані.

Функцію, за допомогою якої обчислюється відстань між вузлами по їх віртуальним координатам, будемо називати метрикою віртуальної відстані. В існуючих методах ВК-маршрутизації в якості метрик віртуальної відстані використовуються норми різного порядку в поєднанні з ваговими функціями. У загальному випадку функція обчислення віртуальної відстані має вигляд

$$\delta(\vec{v}, \vec{t}) = \left\{ \sum_{i=1}^{n_L} [W(v_i, t_i) |v_i - t_i|]^p \right\}^{1/p} \quad (15)$$

де

\vec{v}, \vec{t} - віртуальні координати вузлів v та t відповідно;

v_i, t_i - i -ті компоненти векторів віртуальних координат v і t відповідно;

p - порядок (ступінь) норми ($1 \leq p < \infty$);

$W(v_i, t_i)$ - вагова функція ($W(v_i, t_i) > 0$).

За допомогою виразу (15) визначається віртуальна відстань між деяким вузлом v і вузлом - призначенням t . При цьому порядок запису аргументів функції $\delta(\vec{v}, \vec{t})$ має значення.

У більшості робіт не використовуються ваги при обчисленні відстані між вузлами, тобто в простому випадку маємо

$$W_1(v_i, t_i) = 1.$$

У методі BVR пропонується вагова функція виду

$$W_2(v_i, t_i) = \begin{cases} C, & \text{при } v_i > t_i \\ 1, & \text{при } v_i \leq t_i \end{cases}$$

де C - деяка константа ($C > 1$).

Вагова функція $W_2(v_i, t_i)$ необхідна для того, щоб в (15) збільшувати внесок доданків, в яких вузол t знаходиться ближче до відповідного опорного вузла, ніж вузол v , так як вважається, що рух у бік опорного вузла завжди краще руху від нього. В роботі [5] рекомендується значення $C = 10$.

Таблиця 1. Параметри метрик віртуальної відстані у відомих методах ВК-маршрутизації

Порядок норми	Вагова функція	Метод
2	W_1	LCR, VCap, HGR
10	W_1	Hop ID
1	W_2	BVR
1	W_3	Fault-tolerant BVR

В [6] запропоновано ряд модифікацій первісної версії алгоритму BVR, в тому числі нова вагова функція

$$W_3(v_i, t_i) = \frac{1}{t_i + 1},$$

яка зменшує коливання значень відстані по міру руху до вузла призначення.

Для порівняння в таблиці 1 наведені варіанти метрик відстані, які зустрічаються в роботах з ВК-маршрутизації.

Зауважимо, що при використанні вагів δ не є метрикою в строгому сенсі через появу асиметрії, так як в загальному випадку $\delta(\vec{v}, \vec{t}) \neq \delta(\vec{t}, \vec{v})$. Однак практика показує, що порушення властивості симетрії, так само як невиконання нерівності трикутника, не має істотного впливу на працездатність алгоритму ВК-маршрутизації.

Метрики прогресу

Процедура пошуку маршруту полягає в послідовній мінімізації віртуальної відстані до вузла - призначення t , в ході якої використовується метрика прогресу. Під метрикою прогресу $R(v, w, t)$ будемо розуміти деяку функцію, яка показує наскільки для поточного вузла v доцільно використовувати сусідній вузол w в якості наступної ланки в ланцюжку передачі пакета кінцевому вузлу – призначення t . Тоді можна записати умову вибору наступної ланки на шляху доставки пакета

$$u = \operatorname{argmax}_{w \in \mathcal{N}_\delta(v)} R(v, w, t), \quad (16)$$

тобто наступним ретранслятором призначається вузол з максимальним значенням метрики прогресу. При цьому для виключення вічних циклів вибір (16) проводиться серед сусідів, що знаходяться на меншій віртуальній відстані до вузла - призначенням, ніж поточний вузол, тобто

$$\mathcal{N}_\delta(v) = \{w: w \in \mathcal{N}(v), \delta(\vec{w}, \vec{t}) < \delta(\vec{v}, \vec{t})\}$$

що докладно описано раніше в параграфі 2.3.

Пропонується використовувати наступний загальний вид метрики прогресу:

$$R(v, w, t) = \frac{1}{\bar{c}(v, w)} \bar{\Delta}\delta(v, w, t), \quad (17)$$

де

$\bar{C}(v, w)$ - нормована вартість переходу від вузла v до вузла w ;

$\bar{\Delta}\delta(v, w, t)$ - нормована величина скорочення віртуального відстані до вузла- призначення t .

Нормовані значення метрики вартості переходу і величини подоланої відстані відповідно рівні

$$\bar{C}(v, w) = \frac{C(v, w)}{\sum_{x \in \mathcal{N}_\delta(v)} C(v, x)}$$

$$\bar{\Delta}\delta(v, w, t) = \frac{[\delta(\vec{v}, \vec{t}) - \delta(\vec{w}, \vec{t})]}{\sum_{x \in \mathcal{N}_\delta(v)} [\delta(\vec{v}, \vec{t}) - \delta(\vec{x}, \vec{t})]}$$

Залежно від розв'язуваної задачі маршрутизації метрики прогресу можна розділити на два типи:

- метрики прогресу для жадібної маршрутизації;
- метрики прогресу з балансуванням навантаження.

Розглянемо кожен з цих типів окремо.

Метрики прогресу для жадібної маршрутизації

Мета застосування метрик жадібного прогресу у формулі (16) полягає у вирішенні завдання пошуку оптимальних маршрутів. У більшості алгоритмів геометричній маршрутизації на кожному кроці процесу жадібної маршрутизації поточний вузол вибирає серед своїх сусідів вузол, який найбільш близько розташований до вузла - призначенням, і передає йому пакет даних, тобто розглядається тільки величина подоланої відстані. Отже, для традиційної метрики прогресу вартість переходу дорівнює

$$C_{const}(v, w) = 1, \forall w \in \mathcal{N}_\delta(v)$$

Якщо використовується метрика постійної вартості з'єднання M_{const} , то при C_{const} оптимальним вважається маршрут, що складається з мінімальної кількості переходів або, іншими словами, проходить через мінімальне число проміжних ретрансляторів.

Проте в роботі [7] виявлено, що ухвалення рішення тільки на основі географічної відстані неефективне в умовах низької надійності

безпроводових з'єднань між вузлами. Проведене порівняння декількох варіантів метрик показало, що для маршрутизації за реальними координатами найкращою є метрика прогресу, яка враховує не тільки величину просування в бік вузла - призначення, а й якість зв'язків між сусідніми вузлами. Грунтуючись на цій же ідеї, автори роботи [2] запропонували аналогічну метрику прогресу, але призначену для ВК-маршрутизації, а саме:

$$R(v, w, t) = \hat{p}_{tx,vw} \hat{p}_{rx,vw} [\delta(\vec{v}, \vec{t}) - \delta(\vec{w}, \vec{t})] \quad (18)$$

Суть метрики (18) полягає в пошуку найкращого балансу між надійністю з'єднання і величиною подоланої відстані в напрямку вузла - призначення t .

Однак для більш точного обліку показників надійності з'єднань при виборі наступного ретранслятора в цій роботі пропонується використовувати метрики вартості з'єднань «очікувана кількість передач» і «очікувана загальна кількість передач». Тоді згідно (8) і (12) маємо

$$C_{METX}(v, w) = \frac{1}{\psi(\hat{\beta}_{tx,vw}, L_d) \psi(\hat{\beta}_{rx,vw}, L_a)}$$

та

$$C_{ETTX}(v, w) = \frac{1 + \psi(\hat{\beta}_{tx,vw}, L_d)}{\psi(\hat{\beta}_{tx,vw}, L_d) \psi(\hat{\beta}_{rx,vw}, L_a)}$$

Зауважимо, що якщо при розрахунку $C_{METX}(v, w)$ замість модифікованої формули (8) використовувався вихідний варіант (6) з [1], то ми фактично отримаємо метрику прогресу (18), запропоновану раніше в методі LCR [2].

При використанні функцій вартості переходу C_{METX} та C_{ETTX} в формулі (17) ставиться мета знайти маршрут, при доставці пакета за яким потрібний мінімальний загальний обсяг трафіку, в якому враховуються тільки пакети даних (для C_{METX}) або пакети даних разом з пакетами підтвердження (для C_{ETTX}).

Аналогічним чином можна задати вартість переходу на основі очікуваної загальної тривалості транзакції (див. вираз (14)):

$$C_{ETTT}(v, w) = \frac{L_d + L_a \psi(\hat{\beta}_{tx,vw}, L_d)}{V \psi(\hat{\beta}_{tx,vw}, L_d) \psi(\hat{\beta}_{rx,vw}, L_a)} \quad (19)$$

Отже, завдання C_{ETTT} полягає у зменшенні сумарного часу, який вузли проведуть в режимі передачі і прийому. Також можна розглядати C_{ETTT} як функцію вартості, що мінімізувала час зайнятості каналу і, отже, підвищує ефективність використання пропускної здатності каналу зв'язку.

Метрики прогресу з балансуванням мережного навантаження

Завдання пошуку маршрутів з метою максимізації загального часу життя мережі є одним із основних завдань маршрутизації для БСС. У цій роботі пропонується евристичний підхід до її вирішення за допомогою

методу ВК-маршрутизації з метрикою прогресу, що виконує балансування мережного навантаження в режимі реального часу. Як вже було неодноразово сказано, такі алгоритми мають властивість масштабованості і дозволяють ефективно реалізувати маршрутизацію в однорангових мережах, але у відомих реалізаціях принципу ВК-маршрутизації завдання рівномірного розподілу трафіку не розглядається, а виконується тільки жадібна оптимізація при пошуці шляхів.

Припустимо, що для прийому одного пакету даних потрібна енергія $e_{rx,d}$ Дж, а для передачі пакета підтвердження - $e_{tx,a}$ Дж. Тоді при доставці пакета даних від вузла v до сусіднього вузла w очікувані загальні витрати енергії приймаючого вузла w складуть

$$e(v, w) = \frac{e_{rx,d}}{\psi(\hat{\beta}_{tx,vw}, L_d) \psi(\hat{\beta}_{rx,vw}, L_a)} + \frac{e_{tx,a}}{\psi(\hat{\beta}_{rx,vw}, L_a)} = \frac{e_{rx,d} + e_{tx,a} \psi(\hat{\beta}_{tx,vw}, L_d)}{\psi(\hat{\beta}_{tx,vw}, L_d) \psi(\hat{\beta}_{rx,vw}, L_a)} \quad (20)$$

Для реалізації метрики прогресу з балансуванням навантаження пропонується використовувати функцію вартості переходу наступного вигляду:

$$C(v, w) = \frac{e(v, w)}{E(w)}, \quad (21)$$

де $E(w)$ - поточний запас енергії вузла w , Дж.

Фізичний зміст формули (21) полягає в тому, що відношення $E(w)/e(v, w)$ можна розглядати як нормовану до величини $e(v, w)$ залишкову ємність джерела живлення вузла w , або як кількість транзакцій з витратами $e(v, w)$, які можуть бути виконані при наявності кількості енергії $E(w)$. Вартість переходу визначена як зворотна величина до $E(w)/e(v, w)$, тобто чим більше у вузла w залишилося енергетичних ресурсів, тим менше вартість переходу.

Якщо в початковий момент часу всі вузли мають однакову ємність джерела енергії, то вартість переходу буде визначається тільки величиною $e(v, w)$, тобто перевага буде віддаватися вузлам, з якими якість зв'язку вище. У цьому випадку ми фактично отримуємо еквівалент функції $C_{ETTT}(19)$ за умови, що витрати енергії на передачу і прийом пакетів пропорційні тривалості цих операцій. Якщо потоки трафіку будуть проходити через одні й ті ж сусідні вузли, то їх запас енергії буде знижуватися швидше, ніж у інших. Тоді з деякого моменту часу трафік перенаправлятиметься на інші сусідні вузли, для яких витрати енергії на транзакцію вище, але вони мають більший запас енергії.

Таким чином, при використанні даної функції вартості переходу у формулі (17) перевага віддається сусідньому вузлу, що має серед інших найбільші ресурси енергії на поточний момент. Отже, метрика (21) забезпечує динамічне балансування мережного навантаження,

використовуючи тільки локально доступну інформацію про поточний стан сусідніх вузлів.

Значення $e_{rx,d}$ і $e_{tx,a}$ можуть бути визначені з моделі енергоспоживання вузла, складеної відповідно до алгоритму множинного доступу до середовища і параметрами апаратної реалізації вузлів. Однак функція (21) має недолік з точки зору практичної реалізації, який полягає в тому, що необхідно оцінювати поточний запас енергії вузла в абсолютних величинах (Дж), тому потрібний облік властивостей джерела живлення (наприклад, характеристика розряду автономного елемента живлення), що в багатьох випадках є нетривіальним завданням. Тому пропонується перейти в (21) до відносних величин і задати вартість «очікувана залишкова ємність» (Expected residual capacity) переходу у вигляді наступного виразу:

$$C_{ERC}(v, w) = \frac{e(v, w)}{\sum_{x \in \mathcal{N}_\delta(v)} e(v, x)} \times \frac{\frac{1}{\bar{E}(w)}}{\sum_{x \in \mathcal{N}_\delta(v)} \frac{1}{\bar{E}(x)}}$$

Нормована міра залишкового запасу енергії $\bar{E}(w)$ є безрозмірною величиною в діапазоні від 0 до 1, яка може бути визначена різними способами. Наприклад, якщо припустити, що напруга на елементі живлення падає монотонно у міру його розряду, то оцінити $\bar{E}(w)$ можна шляхом простого вимірювання поточної напруги живлення вузла U (В) і подальшого використання формули

$$\bar{E} = \frac{U - U_{min}}{U_{max} - U_{min}}$$

де U_{min} і U_{max} - мінімальне і максимальне допустимі напруги живлення вузла, В.

Відзначимо, що метрика C_{ERC} дозволяє в явному вигляді врахувати відмінність вузлів за енергетичними ресурсами. Наприклад, частина вузлів може мати стаціонарні джерела живлення, а інші - автономні.

Висновки. Розглянута схема передачі пакетів з підтвердженням успішного прийому і отримані вирази для математичного сподівання, кількості переданих пакетів даних і підтвердження в залежності від надійності безпроводового з'єднання. На основі цих виразів запропоновано чотири метрики вартості з'єднання, дві з яких є модифікованими варіантами відомих раніше метрик, а інші отримані вперше. Розроблені метрики вартості з'єднання більш точно оцінюють накладні витрати, викликані втратами пакетів у реальних радіоканалах.

Запропоновано два види метрик прогресу в залежності від розв'язуваної задачі маршрутизації в БСМ. У задачі пошуку оптимальних маршрутів в метриці прогресу застосовуються функції вартості переходу, в яких враховується тільки інформація про якість зв'язку, у той час як для евристичного вирішення завдання максимізації часу життя мережі

запропонована функція вартості переходу, яка додатково враховує залишкові запаси енергії вузлів для динамічного балансування мережевого навантаження між ними.

При цьому розроблені метрики вартості з'єднання і прогресу можуть бути успішно використані не тільки для ВК-маршрутизації в БСМ, але й в географічній маршрутизації, реактивній маршрутизації та інших методах пошуку маршрутів в безпроводових мережах передачі інформації різного типу.

Використані джерела інформації:

1. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing / D. De Couto [et al.] // Proceedings of the 9th ACM international conference on mobile computing and networking. San Diego (USA), 2003. P. 134-146.
2. Cao Q., Abdelzaher T. Scalable logical coordinates framework for routing in wireless sensor networks // ACM transactions on sensor networks. 2006. Vol. 2, no. 4. P. 557-593.
3. Evaluation of efficient link reliability estimators for low-power wireless networks: Technical report 03-1270 / University of California (Berkeley); Woo A., Culler D. 2003. 20 p.
4. Draves R., Padhye J., Zill B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks // Proceedings of the 10th annual international conference on mobile computing and networking. Philadelphia (USA), 2004. P. 114-128.
5. Beacon vector routing: scalable point-to-point routing in wireless sensor networks / R. Fonseca [et al.] // Proceedings of the 2nd symposium on networked systems design and implementation. Boston (USA), 2005. P. 329-342.
6. Demoracski L. Fault-tolerant beacon vector routing for mobile ad hoc networks // Proceedings of the 19th IEEE international parallel and distributed processing symposium. Denver (USA), 2005. P. 279.2-279.9.
7. Energy-efficient forwarding strategies for geographic routing in lossy wireless sensor networks / K. Seada [et al.] // Proceedings of the 2nd international conference on embedded networked sensor systems. Baltimore (USA), 2004. P. 108-121.