

цілеспрямованого управління з використанням процедур координації.

1. Месарович М., Мако Д., Такахара М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
2. Сікора Л.С. Системологія прийняття рішень на управління в складних технологічних структурах. – Львів: Каменяр, 1998. – 453 с.

*Поступила 16.02.2008р.*

УДК 621.311

М.Ю.Зеляновський<sup>1)</sup>, О.В.Тимченко<sup>1) 2)</sup>, д.т.н., професор

## **МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ТА СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ БЕЗДРОТОВОГО ДОСТУПУ**

Розглядаються та порівнюються особливості бездротових спеціалізованих та бездротових сенсорних мереж. Пропонуються для розгляду компоненти математичної моделі бездротових спеціалізованих та бездротових сенсорних мереж, зокрема моделі бездротового каналу, розповсюдження сигналу, комунікаційного графа та інші. Пояснюється необхідність механізмів контролю топології в бездротових спеціалізованих та сенсорних мережах.

In this article the special features of wireless ad-hoc and sensor networks are reviewed and compared. Proposed is also the description of existing wireless ad-hoc and sensor network mathematical model components, in particular the model of wireless channel, signal propagation model, communication graph etc. The relevance of topology control mechanism in wireless ad-hoc and sensor networks is explained.

### **Вступ**

До бездротових спеціалізованих мереж відносять мережі, в яких немає фіксованої інфраструктури, а сама топологія мережі може змінюватись з часом. Бездротові сенсорні мережі є частковим випадком спеціалізованих мереж з тим лише винятком що всі пристрої в такій мережі гомогенні. Багатоланкова передача застосовується в мережах обох типів [1-4]. В наступній таблиці подано особливості двох споріднених типів мереж.

---

<sup>1)</sup> Національний університет „Львівська політехніка”, Інститут телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, каф. Телекомунікацій, вул.С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Бездротові спеціалізовані мережі	Бездротові сенсорні мережі
Гетерогенні пристрої	Гомогенні пристрої
Мобільні вузли	Стаціонарні (квазістаціонарні вузли)
Багатоланкова передача необов'язкова	Багатоланкова передача необхідна в більшості випадків
Географічно роззосереджена мережа	

### Проблематика

Складністю у визначенні моделі бездротової мережі є перш за все те, що така модель повинна бути водночас достатньо спрощеною і достатньо повноцінною. Простота дозволить проводити моделювання і виведення теоретичних результатів, а повноцінність повинна забезпечуватись для того, щоб така модель могла бути застосована на практиці. Розглянемо компоненти математичних моделей для спеціалізованих та сенсорних бездротових мереж [4].

### Бездротовий канал.

Введемо такі позначення:

- $u, v$  – пара бездротових вузлів;
- $P_r$  та  $P_t$  – потужність прийнятого та переданого сигналів відповідно;
- $\beta$  – поріг чутливості;
- $PL(u, v)$  – втрати при передачі (втрати на тракті).

Пряме бездротове з'єднання існує якщо і тільки якщо  $P_r \geq \beta$ . Значення  $\beta$  залежить від багатьох факторів, зокрема від параметрів прийомопередавача а також від швидкості передачі даних. Чим вища швидкість передачі даних, тим вище значення  $\beta$ :

$$P_r = \frac{P_t}{PL(u, v)} > \beta.$$

Наявність бездротового каналу між  $u$  та  $v$  може бути передбачена, якщо відомі  $PL(u, v)$ . Моделювання втрат на тракті є найбільш складним завданням. Механізми регулювання розповсюдження сигналу можуть бути поділені на три категорії: відбиття, дифракція та розсіювання.

### Розповсюдження сигналу та втрати на тракті

Втрати на тракті моделюються відповідно до розповсюдження сигналу. Існує декілька моделей розповсюдження сигналу, причому для кожного часткового випадку можна створити свою модель.

Позначимо:

- $G_t$  та  $G_r$  – коефіцієнти підсилення передаючої та приймальної антен відповідно
- $\lambda$  – довжина хвилі
- $L$  – втрати на тракті

1. Пряма видимість. Ця модель є найпростішою і використовується коли між передавачем та приймачем немає жодних перешкод. Отже:

$$P_r(d) = \frac{P_t \times G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4\pi)^2 \times d^2 \times L},$$

або приймаючи

$$\frac{G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4\pi)^2 \times L} = C_f,$$

маємо:

$$P_r(d) = C_f \times \frac{P_t}{d^2}.$$

З останньої рівності видно, що областю покриття в моделі розповсюдження на прямій видимості є коло радіусу  $d = \sqrt{C_f \times P_t}$ .

2. Двопроменева модель

Приймаємо  $h_t$  і  $h_r$  висоти від поверхні землі антен приймача та передавача (рис. 1).

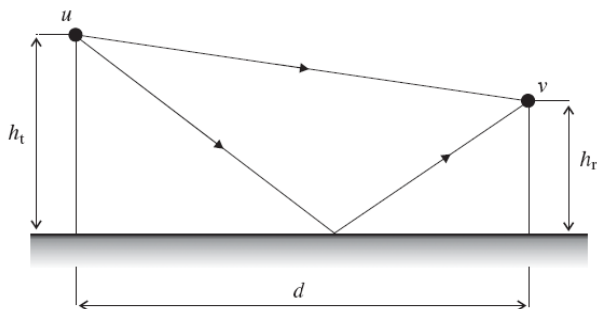


Рис.1. У двопроменевої моделі сигнал розповсюджується двома шляхами – прямим та відбитим від землі променем

Тоді, припускаючи, що  $d = \sqrt{h_t \times h_r}$ , маємо:  $P_r(d) = C_f \times \frac{P_t}{d^4}$ .

3. Модель з логарифмічною залежністю від відстані (модель для неоднорідного або анізотропного середовища).

Розглянемо модель для неоднорідного середовища. З наведеного вище можна побачити, що радіус області покриття  $r \propto \sqrt[4]{P_t}$ . Значення  $\alpha$  визначене експериментально для середовищ різного типу, деякі часткові випадки наведені в наступній таблиці.

Така модель передбачає лише середнє значення прийнятої потужності, що може досить істотно відрізнитись від пікових значень. Тому для передбачення мінливості бездротового каналу застосовуються так звані імовірнісні моделі розповсюдження. Їх ділять на 2 класи: крупномасштабні

(велика дальність) та маломасштабні (мала дальність). Останні також називають моделями багатопроменевого завмирання сигналу або просто завмирання.

Табл.2

Середовище	Значення $\alpha$
Відкритий простір	2
Місто	2,7 – 3,5
Всередині приміщення, пряма видимість	1,6 – 1,8
Всередині приміщення, пряма видимість відсутня	4 – 6

Важливою серед крупномасштабних є модель з логарифмічно-нормальним затіненням, де втрати на тракті моделюються змінною з випадковим значенням, що має логарифмічно-нормальний розподіл в околі  $\frac{P_r}{d^\alpha}$ . Найбільш важливою моделлю завмирання сигналу є модель Релея.

Існують також моделі для ультраширокопосмугового зв'язку, вузькопосмугового зв'язку, також у неліцензованому діапазоні частот для виробництва, науки та медицини (ISM, Industrial, Scientific and Medical band), де для втрат на тракті часто застосовують модель контрольних точок:

$$L(d) = \begin{cases} 40.2 + 20 \times \log(d) & d \leq 8m \\ 58.3 + 33 \times \log(d/8) & d > 8m \end{cases}$$

Для мереж, що призначені для використання всередині приміщення існує модель втрат на тракті з урахуванням стін та перекриттів, для мереж, що працюють на відкритій території, а також в лісі, досліджений ефект втрат у листі.

### Комунікаційний граф

Комунікаційний граф визначає топологію мережі, а саме, множину бездротових зв'язків, які вузли можуть використовувати для комунікації.

Введемо позначення у графі топології:

- $N$  – множина бездротових вузлів;
- $d$  – кількість вимірів, для яких розглядаємо регіон, у нашому випадку  $d = 1, 2, 3$ ;
- $l$  – сторона квадратного регіону;
- $R$  – зв'язаний регіон, в якому розміщені вузли,  $R = [0, l^d]$ ;
- $L(u)$  – відображення  $u$  в  $R$ , подане у  $d$ -вимірних координатах;
- $T$  – інтервал часу реалізації (множина моментів моделювання);
- $t$  – біжучий час.

Функція  $L: N \rightarrow R$  зв'язує кожен вузол з місцем його розташування всередині  $R$ . У випадку мобільності бездротових вузлів маємо, що функція  $L: N \times T \rightarrow R$  визначає для  $\forall u \in N$  та  $\forall t \in T$  множину  $d$ -вимірних координат, подаючи місце розташування  $\forall u \in N$  в  $\forall t \in T$ . Таким чином,

$d$ -вимірною бездротова спеціалізована мобільна мережа представляється парою  $M_d = (N, L)$ .

Функція визначення області покриття для  $M_d$  є деяка функція  $RA$ , що призначає кожному елементу  $u$  з  $N$  значення дальності передачі  $RA(u) \in (0, r_{\max}]$ , де  $r_{\max}$  – максимальна дальність передачі вузла  $u$ . Визначення частини  $R$ , в якій дані можуть бути коректно прийняті, можливе на основі даних про  $r \in (0, r_{\max}]$  та кількість вимірів мережі  $d$ . Для одновимірної мережі це сегмент довжиною  $2 \times r$  з центром в  $u$ , для двовимірної мережі це круг радіуса  $r$  з центром  $u$  та у випадку тривимірної мережі (приклад: мережа підводних сенсорів, розташованих на різній глибині) – куля радіуса  $r$  з центром в точці  $u$  (рис.2).

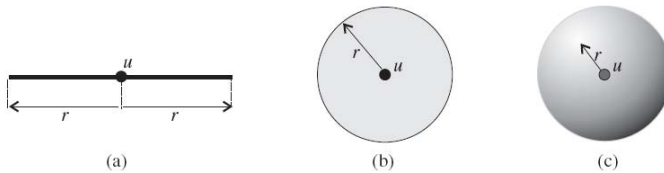


Рис.2. Виміри для бездротової мережі, в яких проводиться моделювання:  
 (а) – одновимірна область, (б) – двовимірна і (с) – тривимірна області відповідно

Маючи мережу  $M_d = (N, L)$  та функцію  $RA$  введемо поняття комунікаційного графа, виведеного функцією  $RA$  на  $M_d$  в момент часу  $t$ . Це орієнтований граф  $G_t = (N, E(t))$ , де напрямлене ребро  $[u, v]$ , що належить множині ребер  $E(t)$ , існує тоді і тільки тоді коли  $RA(u) \geq \delta(L(u, t), L(v, t))$ , де  $\delta(L(u, t), L(v, t))$  – Евклідова відстань між  $u$  та  $v$  в час  $t$ . Іншими словами зв'язок між  $u$  та  $v$  можливий тоді і тільки тоді, коли відстань між вузлами щонайбільше  $RA(u)$  в момент часу  $t$ . У випадку існування ребра  $[u, v]$ ,  $v$  є сусідом першої ланки для  $u$ . Бездротове з'єднання вважається симетричним, якщо  $(u, v) \in E_t$  та  $(v, u) \in E_t$ . В цьому випадку  $u$  та  $v$  є симетричними сусідами.

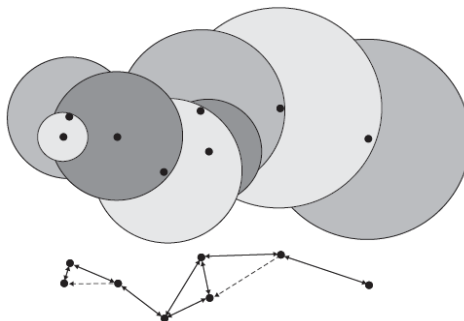


Рис.1. Приклад комунікаційного графа бездротової мережі

Визначення області покриття за максимальної потужності випромінювання, такої, що  $RA(u) = r_{max}$  для  $\forall u \in N$  означає, що кожен вузол передає на максимальній потужності. Результуючий комунікаційний граф називаємо графом максимальної потужності. Такий граф представляє всі можливі зв'язки між вузлами у мережі.

Визначення області покриття є зв'язаним в час  $t$ , якщо комунікаційний граф є зв'язним в час  $t$ , тобто якщо існує як мінімум один орієнтований маршрут між будь-якими двома вузлами.

Визначення області покриття, при якому всі вузли мають однаковий радіус передачі  $r$ ,  $r \in (0, r_{max}]$  називають  $r$ -гомогенним або просто гомогенним, якщо значення  $r$  не є важливим. Зауважимо, що комунікаційний граф, згенерований гомогенним визначенням області покриття для кожного вузла є неорієнтованим, оскільки  $(u, v) \in E_t \Leftrightarrow (v, u) \in E_t$ .

### Модель енергоспоживання

Нехай  $\alpha$  – ступінь втрат на тракті. Маючи деяке визначення області покриття  $RA$  для мережі  $M_a = (N, L)$ , можемо сказати, що затрати енергії  $c$  на забезпечення  $RA$  визначаються як:

$$c(RA) = \sum_{u \in N} RA(u)^\alpha .$$

### Моделі мобільності спеціалізованих безпроводних мереж

Більшість моделей мобільності передбачають рух без перешкод, оскільки це значно спрощує моделювання.

1. Модель випадкових координат (*RWP – Random Waypoint model*) – вузол обирає випадковим чином деяку точку і рухається до неї по прямій. Коли мобільний вузол досягає точки призначення, він витримує деяку паузу, потім обирає координати нової точки призначення і продовжує рух.
2. Модель випадкового напрямку (*RDM – Random direction model*) – вузол випадковим чином обирає напрям та швидкість руху. Після того як вузол досягає границь області розповсюдження  $R$  є декілька варіантів подальших дій:
  - обрати новий напрям і швидкість і продовжити рух до границі  $R$ ;
  - «відбитись» від границі  $R$  і продовжити рух;
  - модифікація: вузол рухається в обраному напрямку деякий випадковий час  $t$ , а потім змінює напрям та швидкість руху.
3. Модель з Броунівським рухом – в такому варіанті застосовується рух по кроках, що обираються випадковим чином, причому параметри кожного наступного кроку залежать від попереднього. Прикладом моделі Броунівського руху є модель з використанням трьох параметрів:
  - $P_{stat}$  – імовірність того, що рух відсутній на протязі всього часу;
  - $P_{move}$  – імовірність того, що вузол рухатиметься протягом поточного часового інтервалу;
  - $m$  – моделює швидкість вузла в даний інтервал часу.

Якщо вузол рухається під час деякого інтервалу часу  $i$ , то його позиція в момент часу  $i+1$  визначається випадковим чином у квадраті зі стороною  $2 \times t$  з центром в поточній позиції вузла.

4. Модель з урахуванням географії – в цьому випадку вузли рухаються вздовж раніше визначених шляхів. Попередньо випадковим чином вузли розміщуються на таких шляхах і розпочинають рух за визначеною схемою. На перехрестях шляхів (якщо такі присутні) вузли випадковим чином обирають напрям і швидкість подальшого руху.
5. Модель з мобільністю груп. З усієї множини вузлів  $N$  обирається деяка підмножина лідерів  $N_l \subset N$ , причому  $|N_l| \ll |N|$ . Всі інші вузли випадковим чином обирають собі лідера і рухаються за ним. Лідер може використовувати одну з вищенаведених моделей.

### **Контроль топології бездротових мереж**

Контроль топології має на меті керування множиною зв'язків між парами вузлів мережі для спрощення та взагалі забезпечення можливості одно- або двостороннього обміну повідомленнями між всіма вузлами мережі [5].

Теорія контролю топології тісно пов'язана з теорією зв'язності комунікаційного графа мережі. Основною задачею рівня контролю топології в протокольному стеку є пошук оптимальної області покриття для кожного з вузлів мережі з метою забезпечення необхідних властивостей всієї мережі (енергоспоживання, загальна область покриття, час життя мережі). Оптимальність може полягати, наприклад, у повній зв'язності вузлів мережі при мінімальній випромінюваній потужності вузлів мережі. Якщо всі вузли мають однакові параметри потужності випромінювання (випадок гомогенної мережі – сенсорні мережі), то можемо говорити зокрема про критичний радіус області покриття (*CTR*).

### **Критична область покриття**

Критична область покриття  $r_c$  для забезпечення зв'язності комунікаційного графа – мінімальне значення радіусу області покриття  $r$ ,  $r \in (0, r_{\max}]$  таке, що при  $r$ -гомогенному визначенні області покриття комунікаційний граф є зв'язним. П.Санті в [2] довів, що  $r_c$  в деякій мережі  $M_d = (N, L)$  відповідає найдовшому ребру Евклідового каркасу комунікаційного графа  $G$  (*EMST – Euclidean Minimum Spanning Tree*). Складність полягає в тому, що для розподіленої системи (якою є спеціалізована чи сенсорна бездротова мережа) передача глобального (з точки зору всієї мережі) знання про координати кожного вузла кожному з вузлів є надлишковим і вимагає великої кількості повідомлень, що, в свою чергу, веде за собою втрати по живленню. Останнє відбивається на такому параметрі як час життя мережі.

Контроль топології полягає у визначенні та видаленні з комунікаційного графа вузлів мережі які є неефективними з точки зору енергоспоживання.

На рис.3 зображені двовимірні комунікаційні графи мережі ( $d=2$ ). Зліва

показано всі можливі значення  $r_c$ . Справа бачимо дійсне значення  $r_c$ , яке забезпечує зв'язність графа.

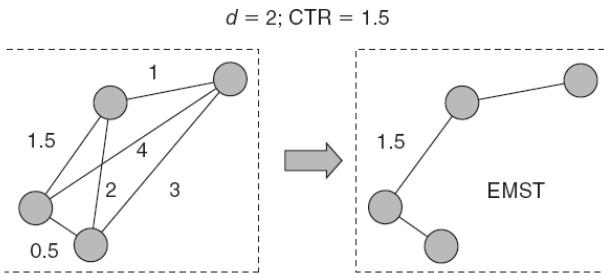


Рис. 3. Комунікаційний граф та критична область покриття

В [2] показано, що з точки зору енергоспоживання доцільніше використовувати багатоланкову передачу повідомлень на короткі відстані, ніж намагатись передати повідомлення без його ретрансляції. Багатоланкова передача інформації дозволяє також збільшити ємність мережі, тобто кількість одночасно працюючих в ній пристроїв, оскільки передача повідомлень на велику відстань створює завади для вузлів, що знаходяться в зоні покриття, що веде за собою повторну передачу повідомлень або ж взагалі унеможлиблює роботу в зоні такого сильного випромінювача.

### Висновки

Останнім часом наукові ресурси були зосереджені на моделюванні розповсюдження сигналу у системах стільникового чи широкомовного зв'язку [3]. Але моделі для стільникового зв'язку не можуть бути застосовані для випадку сенсорних мереж, оскільки для перших характерне обов'язкове розміщення одного з пари вузлів (базова станція, щогла-антена) на високій відстані від поверхні землі, в той час як у випадку сенсорної мережі всі вузли можуть знаходитись на поверхні землі (наприклад, прямо в траві) чи бути прикріпленими до стін приміщення. Саме тому напрямок моделювання спеціалізованих та сенсорних бездротових мереж, як і мереж персонального радіусу дії активно розвивається і лише починають з'являтися повноцінні моделі для мереж такого класу. Розглянуті компоненти моделей постійно вдосконалюються, з'являються все нові уточнення до них. Саме коректне створення моделі та її верифікація забезпечує вдале функціонування мережі, зменшує часові затрати на проектування та відлагодження і дозволяє підвищити ефективність роботи існуючої мережі [6].

1. Тимченко О.В., Зеленовський М.Ю. Методи і протоколи обміну даними сенсорних мереж // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.46. – К.: 2008. – С. 176-183.
2. Santi, Paolo. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks 2006/ Paolo Santi. p. cm. Includes bibliographical references and index.1. Wireless communication systems. 2. Wireless LANs. 3. Sensor networks.



3. *Rappaport , T. S.* (1996). *Wireless Communications*, 1st edn. Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall .
4. *Roberto Verdone, Davide Dardari, Gianluca Mazzini, Andrea Conti.* *Wireless Sensor and Actuator Networks: Technologies, Analysis and Design* 2008
5. *М.Ю.Зеляновський, О.В.Тимченко.* Інтелектуальна система для бездротових спеціалізованих сенсорних та мереж персонального радіусу дії: програмно-апаратна платформа вузла бездротової мережі // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.49. – К.: 2008. – С. 185-193.
6. *Зеляновський М.Ю., Тимченко О.В.* Програмно-апаратна платформа вузла бездротової мережі // Науково-практична конференція „Сучасні проблеми телекомунікацій – 2008”. Матеріали конференції. 29-30 жовтня 2008 р. – Львів: 2008. – С.3-5.

*Поступила 15.01.2009р.*

УДК 621.395.54

О.В. Тимченко<sup>1)2)</sup>, д.т.н., професор  
 М.І.Кирик<sup>2)</sup>, ст.викл., Б.М.Верхола<sup>3)</sup>, аспірант, Самі Аскар<sup>2)</sup>, аспірант

### **АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПЕРЕДАЧІ МУЛЬТИМЕДІЙНОГО ТРАФІКУ**

Стрімке зростання мультимедійного трафіку (IPTV, відеоконференції, дистанційне навчання, мережеві ігри та ін.) потребує значного збільшення смуги пропускання. Існують два принципи потокової передачі звуку й зображення: одноадресна передача даних (unicast) і багатоадресна передача (multicast).

У режимі одноадресної передачі даних сервер-відправник інформації формує для кожного клієнта окремий потік даних, а комп'ютер користувача періодично відправляє на сервер підтвердження про доставку інформаційних пакетів. При цьому необхідна потужність сервера та смуга пропускання каналу зв'язку  $C$  прямо пропорційні кількості клієнтів  $K$ :

$$C = \sum_{k \in K} C_k \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> Akademia Humanistyczno - Ekonomiczna, Zakład Metod Przetwarzania Informacji, Łódź, Poland

<sup>2</sup> Національний університет „Львівська політехніка”, Інститут телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, каф. Телекомунікацій, вул.С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

<sup>3</sup>Українська академія друкарства, каф. Автоматизації та комп'ютерних технологій, вул.Підголюско, 19, 79020, Львів, Україна