

## **АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ БЕЗПРОВОДОВОГО КАНАЛУ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ В УМОВАХ ЗАВМИРАНЬ І ВИПАДКОВОГО РОЗКИДУ ПАРАМЕТРІВ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЧІВ**

**Новіков В.І.**

*Інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна*

*E-mail: novikov1967@ukr.net*

### **Model wireless channel sensor networks in conditions of fading and random variation of parameters transceiver**

An analytical model of the wireless channel sensor network in fading and random scatter parameters transceivers. The new model takes into account the anisotropy of the path loss and obstacles in the signal path.

Безпроводова сенсорна мережа (БСМ) - це розподілена мережа великого числа (до декількох десятків тисяч) автономних сенсорних вузлів, здатних обмінюватися повідомленнями і ретранслювати їх по безпроводовим каналам зв'язку. У більшості робіт робота БСМ розглядається з використанням спрощеної моделі безпроводового каналу зв'язку, згідно якої повідомлення успішно приймається тільки за умови, що відстань між передавачем і приймачем менше деякого фіксованого радіуса радіозв'язку  $\tau$ . В іншому випадку повідомлення ігнорується.

Проте численні експериментальні дослідження характеристик малопотужних безпроводових каналів зв'язку показали, що діапазон прийому умовно розділений на 3 області: область надійного прийому, перехідна область та область відсутності зв'язку. В області надійного прийому з'єднання забезпечують високу та стабільну якість зв'язку, в той час як перехідна область відрізняється значною варіацією та асиметрією показників надійності.

Аналіз досліджень і публікацій [1-3] показує, що перехідна область може мати істотний негативний вплив на характеристики верхніх мережевих рівнів, в першу чергу - на ефективність маршрутизації. Наприклад, в [3] виявлено, що при нерівномірності властивостей каналу в різних напрямках передачі географічна маршрутизація (наприклад, GPSR) демонструє гірші характеристики, ніж традиційна маршрутизація реактивного типу (наприклад, AODV і DSR), яка опирається виключно на топологію мережі і довжину найкоротших шляхів в кількості проміжних сполучень.

В доповіді пропонується аналітична модель радіочастотного каналу зв'язку в умовах завмирань і випадкового розкиду параметрів приймально-передавачів. Для вирішення завдання розроблено модель втрат в канали в умовах впливу завмирань. При цьому враховано вплив анізотропії та вплив перешкод. При створенні моделі приймально-передавача визначено відношення сигнал/ шум та імовірність успішного прийому пакета.

У більшості практичних додатків БСМ використовуються в умовах впливу ефектів затінення (завмирань), тому застосуємо загальноприйнятту модель логарифмічно нормального розподілу втрат в тракті:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\alpha \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma_{ch}} = \overline{PL}(d) + X_{\sigma_{ch}}, \text{ дБ}, \quad (1)$$

де

$d$  - відстань між передавачем і приймачем, м;

$d_0$  - еталонна відстань, м;

$\alpha$  - показник ступеня втрат в тракті;

$\overline{PL}(d)$  - середні втрати в тракті на відстані  $d$ , дБ;

$X_{\sigma_{ch}}$  - випадкова Гауссова змінна з нульовим середнім і дисперсією  $X_{\sigma_{ch}}^2$ , дБ.

Саме модель логарифмічно нормального розподілу втрат в тракті найбільш часто використовується в роботах по БСМ і яка показала свою спроможність в численних експериментальних дослідженнях.

Для обліку анізотропії діаграм спрямованості антен використовуємо модель нерівномірності приймально-передавачів RIM (Radio irregularity model) [3, 4], в якій введено поняття ступеня нерівномірності DOI (Degree of irregularity) як максимальне відносне відхилення величини загасання при одиничній зміні напрямку передачі.

Припускаючи розміщення вузлів на площині і приймаючи як одиницю зміни напрямку передачі 1 кутовий градус, можна задати 360 коефіцієнтів  $\{K_i\}_{i=0}^{359}$ , що відображають відмінності втрат у різних напрямках. Тоді для  $i$ -го напрямку коефіцієнт дорівнює

$$K_i = \begin{cases} 1, & \text{при } i = 0; \\ K_{i-1} \pm R_w \times DOI, & \text{при } 0 < i < 360, \end{cases} \quad (2)$$

де  $R_w$  - випадкова величина, розподілена за законом Вейбулла .

При цьому для набору коефіцієнтів  $\{K_i\}_{i=0}^{359}$  повинна виконуватися гранична умова  $|K_{i-1} - K_{359}| \leq DOI$

Вплив задалегідь відомих перешкод (наприклад, стін) між заданими вузлами  $v$  та  $w$  може бути врахований введенням у вираз (1) додаткового доданка  $\Omega_{vw}$ , що характеризує сумарне загасання (в дБ), яке вносять перешкоди на шляху проходження сигналу між вузлами  $v$  та  $w$ .

Таким чином, загальна формула втрат в тракті між вузлами  $v$  та  $w$  має вигляд

$$PL_{vw}(d) = K_{v,i} K_{w,j} [\overline{PL}(d) + \Omega_{vw}] + X_{\sigma_{ch}}, \text{ дБ}, \quad (3)$$

Вираз (3) враховує ефекти затінення, анізотропію втрат і перешкоди між вузлами.

Відзначимо, що згідно (3) для двох вузлів  $v$  і  $w$  втрати в тракті однакові в обох напрямках передачі, але можуть відрізнятися для іншої пари вузлів, що знаходиться на тій же відстані відносно один одного, тобто в загальному випадку для  $\forall v, w, u \in V$  мають місце вирази:

$$\begin{aligned} PL_{vw}(d) &= PL_{wv}(d), \\ PL_{vw}(d) &\neq PL_{vu}(d). \end{aligned}$$

Параметри реальних приймально-передавачів мають випадкові відхилення від номінальних значень, що викликано як технологічним процесом виробництва інтегральних мікросхем та інших компонент радіопристроїв, так і особливостями апаратної реалізації вузлів. Розкид значень вихідної потужності  $P_t$  і рівня шуму  $P_n$  приймально-передавачів підпорядковуються нормальному закону розподілу, при цьому в загальному випадку  $P_t$  і  $P_n$  є залежними випадковими величинами для конкретного екземпляра приймально-передавача інтегрального виконання. Тоді розподіл пар значень  $P_t$  і  $P_n$  описується наступним законом:

$$\begin{bmatrix} P_t \\ P_n \end{bmatrix} \sim \mathcal{N} \left( \begin{bmatrix} \bar{P}_t \\ \bar{P}_n \end{bmatrix}, \Sigma_{hw} \right), \quad (4)$$

де

$\bar{P}_t$  - середнє (номінальне) значення вихідної потужності передавача, дБм;

$\bar{P}_n$  - середнє (номінальне) значення рівня шуму приймача, дБм;

$\Sigma_{hw}$  - коваріаційна матриця вектора  $[P_t, P_n]^T$  виду

$$\Sigma_{hw} = \begin{bmatrix} \sigma_t^2 & cov(P_t, P_n) \\ cov(P_n, P_t) & \sigma_n^2 \end{bmatrix}.$$

При передачі даних від вузла  $v$  до вузла  $w$  на відстань  $d$  відношення сигнал/шум (ВСШ) на вході приймача вузла  $w$  дорівнює:

$$\gamma_{vw}(d) = P_{v,t} - PL_{vw}(d) - P_{w,n}, \text{ дБ}, \quad (5)$$

де

$P_{v,t}$  - вихідна потужність передавача вузла  $v$ , дБм;

$P_{w,n}$  - рівень шуму приймача вузла  $w$ , дБм.

У формулі (5) використовуються значення вихідної потужності та рівня шуму для різних вузлів, тому вони є незалежними щодо один одного випадковими величинами з розподілами  $\mathcal{N}(\bar{P}_t, \sigma_t^2)$  та  $\mathcal{N}(\bar{P}_n, \sigma_n^2)$  відповідно. Отже, попередній вираз можна звести до наступного вигляду:

$$\gamma_{vw}(d) = \bar{P}_t - PL_{vw}(d) - \bar{P}_n + \mathcal{N}(0, \sigma_{hw}^2), \text{ дБ}, \quad (6)$$

де  $\sigma_{hw}^2 = \sigma_t^2 + \sigma_n^2$ .

Випадкова складова  $\mathcal{N}(0, \sigma_{hw}^2)$  у виразі (6) вносить асиметрію в якість зв'язку між вузлами, тобто в загальному випадку  $\gamma_{vw}(d) \neq \gamma_{wv}(d)$ .

Залежність ймовірності бітової помилки (Bit error rate (BER) від значення ВСШ  $\gamma$  визначається типом маніпуляції. Як приклад, розглянемо фізичний рівень стандарту IEEE 802.15.4 та використаємо функцію із специфікації стандарту [5]:

$$\beta(\gamma) = \frac{8}{15} \times \frac{1}{16} \times \sum_{k=2}^{16} (-1)^k C_{16}^k \exp \left[ 20 \left( \frac{1}{k} - 1 \right) 10^{\gamma/10} \right], \quad (7)$$

де

$C_{16}^k = \frac{16!}{k!(16-k)!}$  - біноміальний коефіцієнт;

$\gamma$  - відношення сигнал/шум, дБ.

Ймовірність успішного прийому пакета (коефіцієнт прийнятих пакетів - Packet reception rate (PRR)) довжиною  $L$  байт дорівнює

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

Вираз (8) записано у припущенні про незалежність і рівномірність бітових помилок, а також про відсутність спеціального кодування двійкових символів, що вірно для приймально-передавачів стандарту IEEE 802.15.4. Якщо ж використовується яка-небудь схема кодування, то залежність пакетної помилки від ймовірності бітової помилки може мати інший вигляд, але при цьому нижче наведені міркування залишаються в силі.

Таким чином, запропоновані вирази (3) - (8) являють собою модель безпроводового каналу зв'язку БСМ, що дозволяє розрахувати ймовірність успішного прийому пакетів в умовах завмирань і за наявності випадкових відхилень параметрів приймально-передавачів від номінальних значень. При типах маніпуляції і схемах кодування, відмінних від IEEE 802.15.4, змінюється тільки вид виразів (7) і (8).

Таким чином, запропоновано аналітичну модель безпроводового каналу БСМ в умовах завмирань і випадкового розкиду параметрів приймально-передавачів. Модель дозволяє врахувати ці ефекти при розробці та дослідженні алгоритмів функціонування БСМ з метою створення більш ефективних у реальних умовах експлуатації рішень, а також для отримання при імітаційному моделюванні більш адекватних оцінок. На відміну від моделі з робіт [6, 7] нова модель враховує анізотропію втрат в тракті і перешкоди на шляху проходження сигналу.

### Література

1. Complex behavior at scale: an experimental study of low-power wireless sensor networks: Technical report 02-0013 / University of California (Los Angeles); D. Ganesan [et al.]. 2002. 11 p.
2. The mistaken axioms of wireless-network research: Technical report 2003-467 / Dartmouth College; Kotz D., Newport C, Elliott C 2003. 14 p.
3. Impact of radio irregularity on wireless sensor networks / G. Zhou [et al.] // Proceedings of the 2nd international conference on mobile systems, applications, and services. Boston (USA), 2004. P. 125-138.
4. Models and solutions for radio irregularity in wireless sensor network / G. Zhou [et al.] // ACM transactions on sensor networks. 2006. Vol. 2, no. 2. P. 221-262.
5. IEEE Std 802.15.4-2006. IEEE standard for local and metropolitan area networks. Part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low rate wireless personal area networks (LR-WPANs). New York (USA): IEEE Computer Society, 2006. 323 p.
6. Zuniga M., Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links // Proceedings of the 1st annual IEEE communications society conference on sensor and ad hoc communications and networks. Santa Clara (USA), 2004. P. 517-526.
7. Zuniga M., Krishnamachari B. An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links // ACM transactions on sensor networks. 2007. Vol. 3, no. 2. P. 7.1-7.34.