

УДК 656.7.085:657.71(045)

В. І. Новіков, ст. викладач,
Національного технічного
університету України «КПІ»

МОДЕЛЬ БЕЗПРОВОДОВОГО КАНАЛУ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ В УМОВАХ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ ЗАВМИРАНЬ І ВИПАДКОВОГО РОЗКИДУ ПАРАМЕТРІВ ПРИЙМАЛЬНО- ПЕРЕДАВАЧІВ

Запропоновано аналітичну модель безпроводового каналу сенсорної мережі в умовах великомасштабного завмирання і випадкового розкиду параметрів приймально-передавачів. Нова модель враховує анізотропію втрат в тракці і перешкоди на шляху проходження сигналу.

Предложена аналитическая модель беспроводного канала сенсорной сети в условиях крупномасштабных замираний и случайного разброса параметров приемо-передатчиков. Новая модель учитывает анизотропию потерь в тракте и препятствия на пути прохождения сигнала.

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

Вступ. Безпроводова сенсорна мережа (БСМ) являє собою розподілену, самоорганізуючу і стійку до відмови мережу великого числа (до декількох десятків тисяч) автономних електронних вузлів, здатних обмінюватися повідомленнями і ретранслювати їх по безпроводовому каналу зв'язку.

У більшості робіт завдання функціонування БСМ розглядаються з використанням спрощеної моделі безпроводового каналу зв'язку, згідно якої пакет успішно приймається тільки за умови, що відстань між передавачем і приймачем менше деякого фіксованого радіуса радіозв'язку r , в іншому випадку пакет 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. При цьому протяжність перехідної області може бути значно більше діапазону надійного прийому, тому у більшості безпроводових з'єднань можливий прояв зазначених ефектів.

Аналіз досліджень і публікацій. В [1-4] показано, що перехідна область може мати істотний негативний вплив на характеристики верхніх мережеских 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.

З іншого боку, використання інформації про якість зв'язку в перехідній області може дати і переваги. Наприклад, в роботі [5] запропоновано метрика «очікувана кількість передач» ETX (Expected transmission count), яка забезпечує більшу пропускну здатність у порівнянні із звичайною метрикою «мінімальна кількість переходів» в стаціонарних бездротових мережах, в яких вузли нерухомі або мобільні в мінімальному ступені [6].

Велика кількість досліджень було проведено з метою створення методів моделювання та інструментів проектування систем стільникового зв'язку та мереж передачі даних. При цьому критерії проектування і умови експлуатації існуючих систем радіозв'язку такі, що ефекти перехідної області не мають на них істотного впливу. Отже, ці моделі, незастосовні для дослідження БСМ.

Постановка завдання. Розробити аналітичну модель радіочастотного цифрового каналу зв'язку в умовах великомасштабного завмирання і випадкового розкиду параметрів приймально-передавачів. Для вирішення завдання розробити модель втрат в тракті в умовах впливу великомасштабного завмирання. При цьому врахувати вплив анізотропії та вплив перешкод. При створенні моделі приймально-передавача визначити відношення сигнал/ шум, імовірність успішного прийому пакета. Провести оцінку меж областей прийому

Розробка математичної моделі.

Вибір моделі втрат в тракті в умовах впливу великомасштабного завмирання

У більшості практичних додатків БСМ використовуються в умовах впливу ефектів затінення (повільного, великомасштабного завмирання), 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;

α - показник ступеня втрат в тракті;

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

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

На рис. 1 показаний приклад залежності втрат в тракці від відстані при наступних параметрах : $d_0 = 1$ м , $PL(d_0) = 55$ дБ , $\alpha = 3$ та $\sigma_{ch} = 3$ дБ.

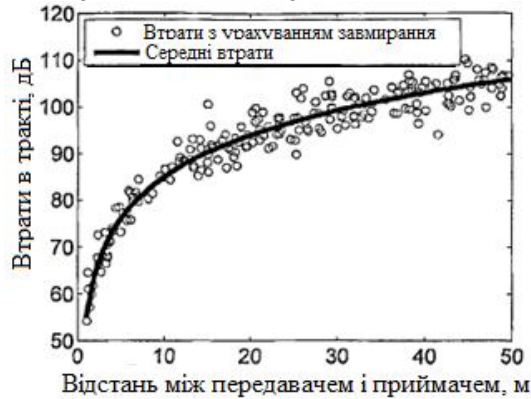


Рис.1. Втрати в тракці в залежності від відстані між передавачем і приймачем

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

Врахування впливу анізотропії

Для обліку анізотропії діаграм спрямованості антен використовуємо модель нерівномірності приймально-передавачів RIM (Radio irregularity model) [3, 7], 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 $|K_{i-1} - K_{359}| \leq DOI$

Приклади наборів коефіцієнтів $\{K_i\}_{i=0}^{359}$ отриманих за допомогою виразу (2) для різних значень ступеня нерівномірності DOI , наведені на рис. 2.

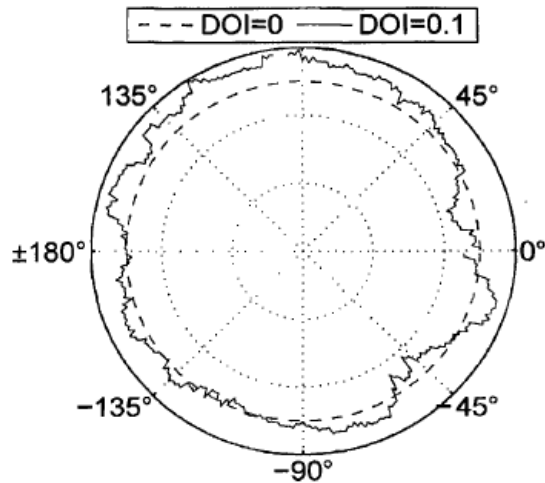


Рис.2. Модель нерівномірності загасання в різних напрямках

Врахування впливу перешкод

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

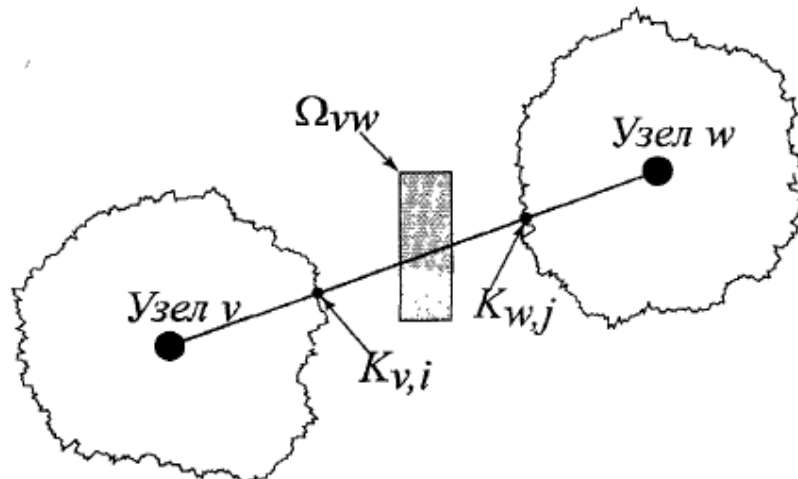


Рис.3. Умовний шлях проходження сигналу між вузлами

Таким чином, загальна формула втрат в тракці 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), ілюстрація до якого представлена на рис. 3, враховує ефекти затінення, анізотропію втрат і перешкоди між вузлами.

Відзначимо, що згідно (3) для двох вузлів v і w втрати в тракці 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:

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

Модель приймально-передавача. Визначення відношення сигнал/шум.

Параметри реальних приймально-передавачів мають випадкові відхилення від номінальних значень, що викликано як технологічним процесом виробництва інтегральних мікросхем і електрорадіоелементів, 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;

Σ_{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 $\gamma_{vw}(d) \neq \gamma_{wv}(d)$.

Модель приймально-передавача. Визначення ймовірності успішного прийому пакета

Залежність ймовірності бітової помилки (Biterrorrate (BER) від значення ВСШ γ визначається типом маніпуляції. Як приклад розглянемо фізичний рівень стандарту IEEE 802.15.4 та у використовуємо функцію із специфікації стандарту [8]:

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

де

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

γ - 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.

Для зручності надалі позначення ψ також буде використовуватися для ймовірності успішного прийому пакета залежно безпосередньо від відносини сигнал/шум, тобто функції $\psi(\gamma, L)$ та $\psi(\beta(\gamma), L)$ еквівалентні і з контексту викладу буде ясно який саме аргумент (γ або β) мається на увазі.

На рис. 4 наведено приклад залежності ймовірності успішного прийому пакета від відстані між передавачем і приймачем для бінарної моделі каналу і моделі, прийнятої в даній роботі.

Таким чином, вирази (3) - (8) являють собою модель бездротового каналу зв'язку, яка дозволяє розрахувати ймовірність успішного прийому пакетів в умовах великомасштабного завмирання 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).



Рис.4. Ймовірність успішного прийому пакета для моделей бездротових каналів

Оцінка меж областей прийому

За розподілом ймовірностей успішного прийому пакетів на рис. 4 видно, що можна умовно виділити 3 області діапазону прийому: область надійного зв'язку, перехідна область та область відсутності зв'язку. Визначимо межу між ними таким чином.

Початком перехідної області (закінченням області надійного прийому) є максимальне значення відстані між передавачем і приймачем d_b , при якому з імовірністю p_b ймовірність успішного прийому пакета більше заданої величини ψ_b при деякому фіксованому розмірі пакета L , тобто

$$P_r(\Psi > \psi_b) = p_b$$

З (7) і (8) випливає, що значення $d_{vw,b}$ для з'єднання між вузлами v і w визначається формулою

$$P_r(\Psi > \psi_b) = P_r(\gamma_{vw}(d_{vw,b}) > \gamma_b) = p_b$$

де $\gamma_b = \Psi^{-1}(\psi_b, L)$ - порогове значення ЗСШ, відповідне рівню ймовірності успішного прийому пакета ψ_b .

Об'єднуючи вирази (3) і (6), а також фіксуючи значення коефіцієнтів $K_{v,i}$, $K_{w,j}$ і Ω_{vw} , отримуємо, що випадкова величина $\gamma_{vw}(d)$ підпорядковується нормальному закону розподілу $\mathcal{N}(\mu_{\gamma_{vw}}(d), \sigma_\gamma^2)$ з параметрами

$$\mu_{\gamma_{vw}}(d) = \bar{P}_t - K_{v,i}K_{w,j}[\bar{P}L(d) + \Omega_{v,w}] - \bar{P}_n \text{дБ}, \quad (9)$$

і

$$\sigma_\gamma^2 = \sigma_{ch}^2 + \sigma_{hw}^2 \quad (10)$$

Отже, має місце рівність

$$p_b = 1 - \Phi\left(\frac{\gamma_b - \mu_{\gamma_{vw}}(d_{vw,b})}{\sigma_\gamma}\right)$$

де $\Phi(x)$ - функція розподілу стандартної нормальної випадкової величини.

З попереднього рівняння отримуємо шукане значення

$$d_{vw,b} = d_0 10^{D_{vw,b}/10\alpha}, \text{м}, \quad (11)$$

де

$$D_{vw,b} = \frac{\bar{P}_t - \bar{P}_n - \gamma_b + \sigma_\gamma u_{1-p_b}}{K_{v,i}K_{w,j}} - PL(d_0) - \Omega_{vw};$$

u_p - квантиль порядку p стандартного нормального розподілу.

Закінченням перехідної області (початком області відсутності зв'язку) є мінімальне значення відстані між передавачем і приймачем d_e , при якому з імовірністю p_e ймовірність успішного прийому пакета менше заданої величини ψ_e , тобто

$$P_r(\Psi < \psi_e) = p_e.$$

Виконавши аналогічні дії, отримуємо формулу для обчислення значення $d_{vw,e}$

$$d_{vw,e} = d_0 10^{D_{vw,e}/10\alpha}, \text{м}, \quad (12)$$

де

$$D_{vw,e} = \frac{\bar{P}_t - \bar{P}_n - \gamma_e + \sigma_\gamma u_{1-p_e}}{K_{v,i} K_{w,j}} - PL(d_0) - \Omega_{vw};$$

$\gamma_e = \Psi^{-1}(\psi_e, L)$ - порогове значення ВСШ, відповідне рівню ймовірності успішного прийому пакета ψ_e .

В [9, 10] введено також поняття коефіцієнта перехідної області Γ як відношення розміру перехідної області до розміру області надійного прийому. Згідно з прийнятим визначенням коефіцієнт перехідної області для з'єднання між деякими вузлами v та w дорівнює

$$\Gamma_{vw} = \frac{d_{vw,e} - d_{vw,b}}{d_{vw,b}} = 10^{\frac{\gamma_b - \gamma_e + \sigma_\gamma (u_{p_e} - u_{1-p_b})}{10\alpha K_{v,i} K_{w,j}}} - 1. \quad (13)$$

Вирази (11), (12) і (13) використовуються для оцінки параметрів перехідної області для кожного конкретного з'єднання між заданими вузлами v і w . Для отримання середніх оцінок для всієї мережі припустимо $K_{v,i} K_{w,j} = 1$ і $\Omega_{v,w} = 0$. Тоді

$$d_b = d_0 10^{\frac{\bar{P}_t - PL(d_0) - \bar{P}_n - \gamma_b + \sigma_\gamma u_{1-p_b}}{10\alpha}}, \quad (14)$$

$$d_e = d_0 10^{\frac{\bar{P}_t - PL(d_0) - \bar{P}_n - \gamma_e + \sigma_\gamma u_{p_e}}{10\alpha}}, \quad (15)$$

$$\Gamma = 10^{\frac{\gamma_b - \gamma_e + \sigma_\gamma (u_{p_e} - u_{1-p_b})}{10\alpha}} - 1. \quad (16)$$

Отримані вирази показують, що кордони початку і закінчення областей прийому залежать як від параметрів приймачів, так і від умов середовища поширення. Але коефіцієнт перехідної області Γ не залежить від номінальної вихідної потужності передавача і рівня шуму приймача, а залежить, зокрема, від показника ступеня втрат в тракці α і загального середньоквадратичного відхилення ВСШ σ_γ . Наприклад, це означає, що при інших рівних умовах збільшення вихідної потужності передавача призведе до збільшення як області надійного зв'язку, так і перехідної області, при цьому співвідношення їх розмірів залишиться колишнім. Посилення ефектів великомасштабного завмирання і збільшення відхилення параметрів приймально-передавачів від номінальних значень призводить до відносного розширення перехідної області, в той час як великі значення α зменшують Γ , тому що сигнал загасає швидше.

Відзначимо, що обрані значення p_e і p_b можна розглядати як довірчі ймовірності оцінювання меж областей прийому. Чим вище значення p_e і p_b , тим вище точність оцінки, але при цьому перехідна область розширюється, що продемонстровано на рис. 4.5.



Рис.5. Межі областей прийому при різних довірчих ймовірностях оцінювання

Висновки. Запропоновано аналітичну модель радіочастотного цифрового каналу зв'язку в умовах великомасштабного завмирання і випадкового розкиду параметрів приймально-передавачів. Модель дозволяє врахувати ці ефекти при розробці та дослідженні алгоритмів для 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 [9, 10] нова модель враховує анізотропію втрат в тракті і перешкоди на шляху проходження сигналу.

Використані джерела інформації;

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. Stepanov I., Rothermel K. On the impact of a more realistic physical layer on MANET simulations results // Ad hoc networks. 2008. Vol. 6, no. 1. P. 61-78.
5. 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.

6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.