

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СЕРЕДОВИЩА НА ЯКІСТЬ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Андреев М.С.

e-mail: mykuta.andreiev@nure.ua

Науковий керівник – к.т.н., доцент Шаповалов С.В.

(Студентський науково-технічний гурток «Радіотехнічні пристрої»)

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МІРЕС

м. Харків, Україна

The quality of radio communication is a determining parameter for the functioning of modern telecommunication systems (mobile networks, IoT, radio relay channels, satellite systems). The propagation of electromagnetic waves is affected by terrain, buildings, atmospheric phenomena, and electromagnetic interference.

1. Фізичні процеси поширення радіохвиль.

Поширення радіосигналу супроводжується відбиттям, дифракцією, розсіюванням та інтерференцією. У міських умовах формується багатопроменеве поширення.

1.1. Модель втрат у вільному просторі.

Потужність прийнятого сигналу визначається рівнянням Фріса:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

Втрати у вільному просторі (FSPL):

$$L_{FSPL}(dB) = 32.4 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d)$$

де f - частота (МГц), d - відстань (км).

Отже, підвищення частоти суттєво збільшує втрати сигналу.

1.2. Багатопроменеве поширення.

Сигнал на приймачі описується сумою N променів:

$$E(t) = \sum_{i=1}^N a_i e^{j(\omega t + \phi_i)}$$

За випадкових фаз формується релеївський розподіл амплітуди:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$$

Це пояснює явище глибоких завмирань (*fading*).

2. Вплив рельєфу та забудови.

Рельєф місцевості суттєво впливає на рівень прийнятого сигналу. Пагорби, ліси та щільна забудова знижують потужність сигналу через екранування і додаткові втрати. Для оцінки втрат застосовують емпіричні моделі, зокрема Okumura–Nata та COST-231 Nata. У щільній міській забудові рівень сигналу може знижуватися на 20–40 дБ порівняно з умовами прямої видимості (LOS), а на частотах понад 24 ГГц сигнал значно слабшає навіть

при часткових перешкодах.

3. Атмосферні впливи.

Атмосферні явища є важливим фактором, особливо для високочастотних систем. Дощ спричиняє додаткове поглинання сигналу, туман і водяна пара впливають на поширення міліметрових хвиль, а температурні інверсії можуть викликати аномальну рефракцію.

Додаткові втрати через дощ:

$$\lambda R = kR^\alpha$$

де R – інтенсивність опадів.

У терагерцовому діапазоні (перспективний для 6G) атмосферне поглинання стає критичним чинником, що обмежує дальність передавання.

4. Електромагнітні завади.

Джерелами завад можуть бути: інші радіосистеми, промислове обладнання, імпульсні блоки живлення та побутова електроніка.

Завади зменшують відношення сигнал/шум (SNR) і збільшують коефіцієнт бітових помилок (BER). За високого рівня шуму система змушена знижувати швидкість передавання або використовувати більш стійку модуляцію.

5. Основні показники якості радіоканалу.

Стан радіозв'язку оцінюють за такими параметрами: RSSI – рівень прийнятого сигналу, SNR – відношення сигнал/шум, BER – коефіцієнт бітових помилок, Throughput – пропускна здатність, Latency – затримка передавання, Packet Loss – втрата пакетів.

Зниження SNR призводить до зростання BER, що безпосередньо впливає на якість сервісів (голосовий зв'язок, відеопотоки, IoT-комунікації).



Рисунок 1 Загальна модель впливу середовища на радіозв'язок

6. Методи підвищення якості зв'язку.

Для компенсації негативного впливу середовища застосовуються сучасні технології:

- Адаптивна модуляція та кодування (AMC) - автоматичний вибір параметрів передавання залежно від умов каналу.

- Технологія MIMO - використання кількох антен для підвищення надійності та пропускної здатності.

Пропускна здатність системи MIMO:

$$C_{MIMO} = (N_t, N_r) \cdot B \log_2(1 + SNR)$$

- *Beamforming* - формування спрямованого радіопроменя для зменшення втрат.

Підсилення антенного масиву:

$$G_{array} \approx N \cdot G_{element}$$

- Завадостійке кодування – корекція помилок на рівні фізичного каналу.

- Ретранслятори та малі базові станції – покращення покриття.

- Інтелектуальне керування ресурсами на основі алгоритмів машинного навчання.

У сучасних мережах *5G-Advanced* та перспективних *6G* впроваджуються *AI-native* підходи, що дозволяють прогнозувати стан каналу та динамічно адаптувати параметри мережі.

Модель оцінювання стану каналу:

$$\hat{H}(t + 1) = f(H(t), SNR(t), v(t))$$

де $f(\cdot)$ - модель машинного навчання.

Математичний аналіз показує, що якість радіозв'язку визначається комплексною залежністю:

$$Q = f(L(d, f), \gamma R, SNR, BER)$$

Зі зростанням частоти (*5G mmWave*, *6G THz*) вплив середовища посилюється, що потребує застосування MIMO, *beamforming*, адаптивного кодування та AI-керування радіоресурсами.

Список використаних джерел:

1. T. S. Rappaport et al., *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Prentice Hall, 2022.

2. 3GPP, NR; *Physical Layer Procedures for Data*, TS 38.214, Release 18, 2023.

3. ITU-R, *Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2030 and Beyond*, Recommendation ITU-R M.2160-0, 2023.