

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАВМИРАНЬ СИГНАЛІВ  
У КАНАЛАХ СИСТЕМ БЕЗПРОВОДОВОГО ДОСТУПУСТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМИРАНИЙ СИГНАЛОВ  
В КАНАЛАХ СИСТЕМ БЕЗПРОВОДНОГО ДОСТУПАTHE STATISTICAL FADING CHARACTERISTICS OF SIGNALS  
IN WIRELESS ACCESS SYSTEMS

**Анотація.** В огляді дана класифікація типів завмирань радіосигналів у каналах систем безпроводового доступу. Описано підтверджені експериментально математичні моделі завмирань. Дано рекомендації з використання моделей каналів для іспитів нових методів просторово-часового кодування.

**Анотация.** В обзоре дана классификация типов замираний радиосигналов в каналах систем беспроводного доступа. Описаны подтвержденные экспериментально математические модели замираний. Даны рекомендации по использованию моделей каналов для испытаний новых методов пространственно-временного кодирования.

**Summary.** The review deals with classification of fading types in the radiochannels of wireless access systems. The experimentally confirmed mathematical models of fading channels are described. The recommendations for the tests of new space-time methods are given.

Останнє десятиліття характеризується інтенсивним розвитком систем безпроводового зв'язку (мобільний радіозв'язок, системи безпроводового доступу до мережі загального користування й мережі Інтернет). У першу чергу в таких системах необхідно вирішити проблему впливу багато-проміневої, причиною якої є наявність відбиття на трасі поширення радіохвиль. Сильні завмирання сигналу в каналі ускладнюють оцінку переданих повідомлень і приводять до спотворень переданої інформації. Світова наукова спільнота відгукнулася на появу нових завдань щодо розробки методів *просторово-часового кодування* (ПЧК) для передавання інформації у каналах безпроводового зв'язку, докладні огляди яких опубліковані в статтях [1,2]. На основі цих методів фірми-виробники обладнання безпроводового доступу стимулювали розробку стандартів *IEEE 802.11*, *IEEE 802.16* і тепер випускають обладнання під торговельними марками Wi-Fi і WiMAX [3,4], що сертифіковано для експлуатації по усьому світі. Розвиток подій у цій сфері показує [2], що можливості методів ПЧК далеко не вичерпані. Зокрема, у монографії [5] наведені відомості про нові просторово-часові коди. Досвід роботи в цьому напрямку показує, що для розробки нових ефективних методів передачі по каналах із завмираннями конче потрібне знання *математичної моделі каналу*. У той самий час, як зазначалося в огляді [1], багато статей з тематики ПЧК [2] починаються із припущень про модель квазістаціонарних релеевських завмирань. Разом з тим, дослідницька група розробників стандартів серії *IEEE* почала розробку моделей каналів, на які є посилання в огляді [2], а дані досліджень представлені у вигляді стандарту *IEEE* [5]. Одночасно із цією роботою більша група датських учених під керівництвом К.І.Педерсена провела експериментальні дослідження статистичних характеристик безпроводових каналів [7,8]. Проте досвід роботи в цьому напрямку показує, що для розробки нових ефективних методів передавання по каналах із завмираннями не розглядалися статистичні характеристики завмирань сигналів у каналах систем безпроводового доступу для вироблення рекомендацій з вибору математичних моделей для проведення комп'ютерного моделювання. *Мета* – надати статистичні моделі завмирань сигналів у каналах систем безпроводового доступу для вироблення рекомендацій з вибору математичних моделей для проведення комп'ютерного моделювання.

**1. Класифікація завмирань сигналу у системах радіозв'язку.** Як відомо, в ідеалізованій моделі поширення радіосигналу у вільному просторі послаблення потужності переданого сигналу визначається величиною втрат у вільному просторі [1]

$$L_s(d) = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2, \quad (1)$$

де  $d$  – відстань між передавачем і приймачем;  $\lambda$  – довжина хвилі радіосигналу. Ця формула досить точно описує поведінку ідеалізованої системи радіозв'язку, але не придатна для опису реальних систем. Розрізняють три основних механізми, що впливають на поширення сигналу в реальних системах радіозв'язку.

**Відбиття** (*reflection*) відбувається тоді, коли поширена електромагнітна хвиля стикається з гладкою поверхнею, розмір якої набагато більше довжини хвилі радіочастотного сигналу  $\lambda$ . **Дифракція** (*diffraction*) зустрічається тоді, коли шлях поширення між передавачем і приймачем перешкоджає щільним тілом, розміри якого невеликі порівняно з  $\lambda$ , що викликає появу вторинних хвиль, які утворюються позаду перешкоджаючого тіла. Дифракція є причиною того, що поширення радіочастотної енергії відбувається в обхід шляху прямої видимості між передавачем і приймачем. Таке явище в літературі часто називають затіненням (*shadowing*), оскільки дифраговане поле може досягти приймача, навіть якщо воно затінено непроникною перешкодою. **Розсіювання** (*scattering*) зустрічається тоді, коли радіохвиля стикається з будь-якою нерівною поверхнею або з поверхнею, розміри якої порядку  $\lambda$ , що приводить до розсіювання енергії в усіх напрямках. Всі ці механізми поширення радіосигналу призводять, в остаточному підсумку, до появи на вході приймача безлічі інтерферуючих сигналів (променів). У такому випадку говорять про *багатопроміневе* поширення *радіосигналу* [4]. Неоднорідна й випадкова структура підходящих променів породжує явище, що у літературі в цілому йменується, як *завмирання* (*fading*). Розрізняють *дискретну* багатопроміневість, коли на прийомі одночасно приходять небагато явно виражених променів (кожний зі своїм запізненням) і *дисперсне* поширення, коли на прийом впливає цілий спектр неявно виражених променів. Крім того, виділяють випадки *статичної* й *динамічної* багатопроміневості. Статична багатопроміневість має місце, коли передавальні й приймальні антени так само, як і всі елементи траси, нерухомі. При цьому картина поля з'являється, начебто застиглою. Якщо перераховані вище елементи рухаються, то картина поля зазнає певну динаміку. Динамічні властивості багатопроміневості слід враховувати при аналізі систем мобільного зв'язку. Багатопроміневі канали можуть бути класифіковані за характером спотворень сигналів, переданих по цих каналах. Тут важливими є такі характеристики сигналів: тривалість елементарної послідовності сигналів  $T_s$  і ширина основної смуги частот спектра сигналу  $\Delta F_s$ . Звичайно ці характеристики співвідносяться із частотно-часовими параметрами випадкових завмирань у каналі. Якщо величина  $\Delta F_s$  порівнянна з інтервалом кореляції за частотою  $\Delta F_k$ , то багатопроміневість приводить до зміни коефіцієнта передачі каналу, приблизно однакового для всіх частотних складових сигналу. Для динамічного каналу цей коефіцієнт передачі змінюється в часі випадковим чином, а для статичного – залишається постійним у часі, але приймає випадкові значення від сеансу до сеансу. Завмирання такого типу йменуються *дружніми* [4]. У західній літературі прийнято використовувати термін *flat fading* [2], що звичайно перекладається, як *плоскі завмирання*. У статичному випадку плоскі завмирання не спотворюють форму сигналу, але в динамічному випадку за час тривалості послідовності сигналів коефіцієнт передачі каналу може суттєво змінитися, що приводить до спотворення форми сигналу. Це відбувається тоді, коли тривалість послідовності  $T_s$  перевершує інтервал кореляції випадкових завмирань у каналі  $\Delta T_k$ . Тоді завмирання називають *швидкими* [4] (*speed fading* [2]). Якщо ж ( $T_s \ll \Delta T_k$ ), то використовують термін *повільні завмирання* (*slow fading*). При повільних завмираннях форма послідовностей не спотворюється. Для високошвидкісного зв'язку типова ситуація, коли ( $\Delta F_s > \Delta F_k$ ). При цьому окремі спектральні компоненти сигналу завмирають по-різному, так що форма послідовностей суттєво спотворюється. Такі завмирання називають *селективними* (*selective fading*). Різноманіття причин появи завмирань у комбінації з параметрами сигналу породжує набори різних комбінацій: дружні завмирання можуть бути повільними й швидкими, селективні завмирання також бувають повільними й швидкими [4].

**2. Характеристики завмирань, важливі для аналізу систем фіксованого безпроводового доступу.** На перших етапах розвитку радіозв'язку єдиним методом підвищення завадостійкості передачі в каналах із завмираннями вважалося просторове рознесення приймальних антен. Комбінація рознесення й оптимального оброблення сигналів на прийомі виявилася ефективною й швидко стала звичною. Новий етап у теорії методів передачі інформації по каналах із завмиранням настав з появою робіт, в яких пропонувалися ідеї ПЧК. З'явився новий термін *MIMO* (*Multiple Input-Multiple Output* – множинний вхід, множинний вихід). Основна ідея технології *MIMO* [1, 2] ілюструється структурою на рис. 1. Передавальна частина системи містить  $M$  передавачів ( $T_1 \dots T_M$ ) з передавальними антенами, тоді, як приймальна частина містить  $N$  приймачів і приймальних антен ( $R_1 \dots R_N$ ). Вважається, що завмирання породжуються середовищем, що розсіює поширення *радіосигналу*  $H$ . Стрілками показано, що сигнал кожного з передавачів  $T_i$  може досягати входу кожного із приймачів ( $R_1 \dots R_N$ ), зазнаючи завмирання. Робота системи забезпечується мультиплексором/демультиплексором і приймачем максимальної правдоподібності на приймальній стороні. Таким чином, уводиться просторова надмірність, завдяки якій вдається багаторазово «пронизати» турбулентне середовище поширення радіосигналу й уникнути впливу завмирань при відповідному обробленні прийнятої сукупності сигналів. Аналіз систем *MIMO* у значній частині публікацій з огляду [2], заснований на апіорному припущенні, що такий канал є *квазістаціонарним* (*Pseudostatic*

MIMO Channel), тобто має місце статична багатопроміневість на деякому, досить протяжному часовому інтервалі.

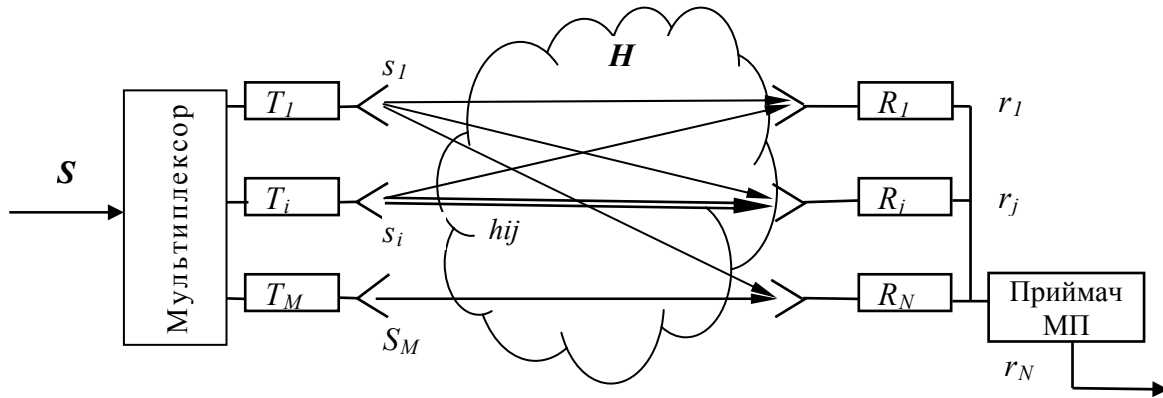


Рисунок 1 – Загальна структура системи MIMO

Аналізу статистичних характеристик багатопроміневих каналів мобільного зв'язку присвячений спеціальний розділ монографії [9, розд.15.2, рис. 15.1], де стверджується, що зниження відносин сигнал/шум у службах стільникового й персонального зв'язку в діапазоні ( 1-2) ГГц обумовлене завмираннями, описується моделлю Релея. Тривалий час динамічні властивості («швидка» динамічна нестационарність) завмирань для мобільних абонентів «гіпнотизували» дослідників систем MIMO. Досить незабаром прийшло усвідомлення того, що є всі підстави для фіксованих служб каналу типу MIMO вважати *квазістационарним*, в якому передавальна й приймальна сторони нерухливі й умови поширення радіохвиль з часом залишаються приблизно постійними або не змінюються взагалі. Автори цієї статті задалися метою з'ясувати *обґрунтованість гіпотез* про *квазістационарність* моделей завмирань у каналах фіксованого безпроводового доступу. Поглиблене вивчення огляду [2], енциклопедії [3], монографії [4], стандарту [6] і спеціалізованих статей [7,8] дозволяють зробити наступні висновки:

1. Ніяких експериментальних досліджень про поведінку процесу завмирань у часі не проводилося. Всі міркування й міркування про динаміку завмирань [4, розд.10] запозичені з досвіду дальнього короткохвильового радіозв'язку й мобільного зв'язку. У літературі відсутні кількісні дані про поведінку в часі сигналів у системах фіксованого безпроводового доступу.

2. Для моделей каналів фіксованого безпроводового доступу у стандарті IEEE 802.16a [6] вважаються важливими наступні характеристики:

- втрати поширення (*Path loss*), включаючи втрати за рахунок затінення;
- характеристики завмирань (*Fading characteristics*).

3. **Стандартизовані характеристики моделей завмирань.** У цьому розділі наводяться відомості про характеристики математичних моделей завмирань, які включені в стандарт [6] і спираються на проведені експериментальні дослідження [7,8].

**Модель втрат поширення сигналу** спирається на загально визнані результати статей Y. Okumura [10] і M. Hata [11]. Ця емпірична модель дозволяє визначити розрахунковим шляхом середнє зниження напруженості поля *PL* (*Path Loss*– втрати напруженості поля) за спрощеною формулою:

$$PL(dB) = A + 10\gamma \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + S. \quad (2)$$

де коефіцієнти  $\alpha = 20 \lg\left(\frac{4\pi d}{d_0}\right)$ ,  $\gamma = \left(\alpha - b h_b + \frac{c}{h_b}\right)$ ;  $h_b$ – висота підвішування базової станції (10...80) м;  $d$  – відстань, подолана радіосигналом, опорна відстань  $d_0=100$  м. Значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$  і  $c$  для різних типів місцевості наведені в табл. 1.

У формулі (2):  $S$  – послаблення сигналу за рахунок затінення. У монографії [4, с.193] наведені подібні розрахунки, але формула (10.19 з [4]) виявляється більше громіздкою.

**Статистичні характеристики завмирань** описуються у вигляді моделі, що враховує наявність у точці прийому регулярної складової з амплітудою  $A$  і випадкової складової з дисперсією  $\sigma^2$ . Щільність ймовірності результуючого сигналу  $r$  рекомендовано описувати *райсовською* функцією щільності ймовірності, яка визначається формулою:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{(r^2 + A^2)}{2\sigma^2}\right] I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) \text{ для } r > 0, A > 0, \quad (3)$$

$$p(r) = 0 \quad \text{для інших } r, A.$$

Таблиця 1 – Параметри моделі (2)

Параметр моделі	Пагорбна місцевість з деревами середньої висоти	Плоска місцевість з невисокою рослинністю
<i>a</i>	4,6	3,6
<i>b</i>	0,075	0,005
<i>c</i>	12,6	20

Відношення потужностей регулярної й випадкової складових прийнято описувати коефіцієнтом  $K = A^2 / (2\sigma^2)$ . При  $K=0$  (регулярна складова сигналу відсутня) і щільність ймовірності (3) перетвориться в розподіл Релея. У стандарті [6] рекомендується ряд значень коефіцієнта  $K=(0..16)$  залежно від висот підвісу антен, погодних умов (сезону), місцевості і т.д. **Послаблення сигналу за рахунок затінення** експериментально вивчено в роботі [8]. Установлено, що розподіл випадкових завмирань коефіцієнта передачі сигналу між будь-якою парою передавальна / приймальна антена у структурі системи *MIMO* (рис. 1) описується щільністю ймовірності логнормального розподілу (*log-normal distribution*), а значення коефіцієнта передачі можна виразити за наступною формулою:

$$h_s(Z) = 10^{Z/10} / \sigma_s, \quad (4)$$

де дисперсія  $\sigma_s^2 = (6..10) \text{ dB}$ ;  $Z$  – випадкова величина з гауссівським розподілом, нульовим середнім і одиничною дисперсією. Відзначається, що формула (4) добре узгоджується з експериментальними даними.

Таким чином, у роботі надані статистичні моделі завмирань сигналів у каналах систем безпроводового доступу для вироблення рекомендацій з вибору математичних моделей для проведення комп'ютерного моделювання. Статистичні характеристики завмирань описуються у вигляді моделі, що враховує наявність у точці прийому регулярної й випадкової складової. Щільність імовірності результуючого сигналу описується райсівською функцією щільності імовірності. Моделі каналів рекомендуються для моделювання при випробуваннях знов розроблених методів модуляції/кодування для систем *MIMO*.

### Література

1. Банкет В.Л. Методы пространственно-временного кодирования для систем радиосвязи / В.Л. Банкет, Н.В. Незгазинская, М.С. Токарь // Цифрові технології. – 2009. – № 6. – С. 5–16.
2. Gesbert D. From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems / Gesbert D. //IEEE Journal on Selected Areas in Communications.– 2008.–Vol.SAC-21.– № 3. – P.281–302.
3. Вишнеvский В.М. Энциклопедия Wi MAX: Путь к 4G/ Вишнеvский В.М., Портной С. Л., Шахнович И.В. – М.: Техносфера, 2010. – 472 с.
4. Немировский М.С. Беспроводные технологии от последней мили до последнего дюйма / [Немировский М.С., Шорин О.И., Бабин А.И., Сартаков А.Л.]; под ред. М.С. Немировского. – М.: Эко-Трендз, 2009.– 400 с.
5. Банкет В.Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах / Банкет В.Л. – Одесса: Феникс, 2009. –180 с.
6. Channel models for Fixed Wireless Applications. Dokument IEEE 802.16a-03/01. Adopted 06-27-3003.
7. Kermoal J.P.A Stochastic NIMO Radio Channel Model With Experimental Validation / J.P. Kermoal, L. Schumacher, K.I. Pedersen, P.E. Mogensen, F. Frederiksen // IEEE Journal on Selected Areas in Communications./ – 2008. – Vol.20. – № 6. – P.1211 – 1226.
8. A.Algans,K.I. Experimental Analysis of Joint Statistical Properties of Azimuth Spread, Delay Spread, and Shadow Fading/ A.Algans, K.I. Pedersen, P.E. Mogensen // IEEE Journal on Selected Areas in Communications.– 2008. – Vol.20. — № 3. – P.523–531.
9. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Б. —[2-е изд., испр.]; пер. с англ.—М: Изд. дом «Вильямс», 2008. – 1004 с.
10. Okumura Y. Field strength and its variability in UHF and VHF land-mobile radio service / Y. Okumura, E. Ohmory, T. Kawano, K. Fukua // Rev.Elec. Commun. Lab. – 2009. – Vol.16. – № 9. – P.132–136.
11. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services/ Hata M./ IEEE Trans. Veh. Technol. – 2008. – Vol. 29. – P.317–325.