

УДК 621.396.67

Нагорна Н.М.¹, Чирва С.Г.²

¹старш. викл. ЗНТУ

²студент гр. РТ-314м ЗНТУ

АНАЛІЗ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛІВ МІМО-СИСТЕМ

Підвищення якості роботи бездротових систем зв'язку відбувається при збільшенні швидкості передачі даних і зменшенні ймовірності появи помилок при декодуванні сигналів. Підвищити якість можна за рахунок збільшення смуги пропускання каналів і збільшення потужності переданих сигналів. Однак такий напрямок нашо́вхується на обмеження частотних діапазонів стандартів і обмеження потужності з метою захисту людини і навколишнього середовища. Тому сучасні системи зв'язку розвиваються в напрямку формування паралельних даних по каналах методами просторової і просторово-часової обробки сигналів. При цьому використовується

багатоантенне передавання і приймання даних в МІМО-системах (Multiple-Input Multiple-Output).

У МІМО-каналах сигнали піддаються змінам двох типів:

1) при передаванні вузькосмугового сигналу по широкосмуговому каналу амплітуда сигналу при прийомі залежить від усіх копій, які надходять до приймача; в результаті виникають глибокі завмирання при зміні параметрів каналу (плоский канал), проте міжсимвольні спотворення не виникають;

2) при поширенні широкосмугового сигналу в вузькосмуговому каналі амплітуда сигналу також дорівнює сумі копій і слабо змінюється при змінах параметрів каналу. У прийнятих сигналах присутні міжсимвольні спотворення (частотно-селективний канал).

3 метою визначення потенційних можливостей каналів доцільно розглянути пропускані здатності каналів в залежності від відношення сигнал/шум.

В даному дослідженні розглядалася модель МІМО-системи з М передавальними і N приймальними антенами. Модель сигналів на вході приймача:

$$y = Hx + n,$$

де y - вектор сигналів розміру $[N \times 1]$ на виходах каналу, що надходять на входи просторово-часового декодера-приймача; H - комплексна матриця каналу розміру $[N \times M]$; x - вектор комплексних входних інформаційних символів розміру $[N \times 1]$, які формуються на виходах просторово-часового кодера-передавача; n - шумовий комплексний гаусівський випадковий вектор розміру $[N \times 1]$ з нульовим середнім і кореляційною матрицею $\sigma_n^2 \mathbf{I}$, де $\mathbf{I}$ - одинична матриця розміру $[N \times M]$; σ_n^2 - сумарна дисперсія дійсної і уявної частин шуму в одній приймальній антені.

Кожний елемент h_{ij} матриці H каналу зв'язку МІМО є комплексним коефіцієнтом передачі від j -тої передавальної антени до i -тої приймальної антени. Повна потужність, яку випромінює передавач всіма передавальними антенами, дорівнює $P = M\sigma_s^2$, де σ_s^2 - дисперсія випромінюваного сигналу однією антеною.

Пропусканна здатність каналу за Шенноном визначається найбільшою швидкістю передачі інформації по каналу при всіх можливих реалізаціях матриці H . Однак в каналах з завмираннями для будь-якої як завгодно малої швидкості передачі існує ненульова ймовірність того, що система не зможе

підтримати зазначену швидкість, тобто пропускна здатність каналу із завмираннями за Шенноном буде нульовою. Тому для оцінки каналу із завмираннями використовується ергодична (усереднена) пропускна здатність.

Питома пропускна здатність МІМО-системи:

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{\rho}{M} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right),$$

де $\mathbf{I}$ - одинична матриця розміру $[N \times N]$; $\det$ - визначник матриці; $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$ транспонована і комплексно-сполучена матриця $\mathbf{H}$; $\rho = P / \sigma_n^2$ - відношення сигнал/шум.

Згідно з теоремою розкладання за сингулярними числами будь-яку матрицю $\mathbf{H}$ можна уявити, як

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{V} \mathbf{D}^H,$$

де $\mathbf{U}$ та $\mathbf{V}$ - унітарні матриці розміру $[N \times N]$ та $[M \times M]$ відповідно з наступними властивостями: $\mathbf{U} \mathbf{U}^H = \mathbf{I}$ розміром $[N \times N]$ та $\mathbf{V} \mathbf{V}^H = \mathbf{I}$ розміром $[M \times M]$; $\mathbf{D}$ - невід'ємна діагональна матриця, елементи якої є квадратними коріннями власних значень від $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$.

Виконавши сингулярне розкладання, можна отримати вектор власних значень λ матриці $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$ та розрахувати пропускну здатність каналу за формулою:

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{M} \lambda_i \right), \quad (1)$$

де r - ранг матриці $\mathbf{H}$ ($r \leq \min(M, N)$), який визначається кількістю ненульових власних значень матриці $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$.

З формули (1) видно, що канал МІМО можна уявити сукупністю r незв'язаних паралельних каналів з однією передавальною і однією приймальною антенами з коефіцієнтом передачі λ_i .

Завмирання в каналах, що виникають в результаті інтерференції досить великого числа розсіяних сигналів і призводять до сильного ослаблення прямого сигналу, є найбільш глибокими, тому виникають значні помилки при передаванні інформації. Визначити вплив зазначених завмирань на надійність зв'язку дозволяє модель релєвського каналу.

У каналі Релея густина розподілу ймовірностей амплітуди сигналу залежить від параметра σ (при $A > 0$):

$$p(A) = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right).$$

На рис. 1 показаний релеєвський розподіл амплітуди сигналу при $\sigma = \sqrt{2}$. Максимальному значенню розподілу відповідає амплітуда $A = \sigma = \sqrt{2}$.

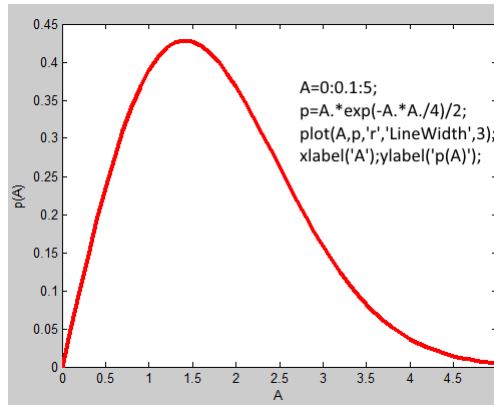


Рисунок 1 – Густина розподілу ймовірностей амплітуди сигналу і програма в Матлаб

Тому нормований комплексний елемент матриці **H** у системі Матлаб визначається за допомогою оператора (randn – генератор випадкових чисел за нормальним законом):

$$h = (\text{randn}(M,N) + j * \text{randn}(M,N)) / \text{sqrt}(2);$$

Розподіл повної потужності, що передається, по паралельних каналах залежить від наявності або відсутності петлі зворотного зв'язку. У MIMO-системах без зворотного зв'язку повна потужність по паралельних каналах розподіляється порівну, тому що передавач не має інформації щодо параметрів каналу. Але приймачу відомі оцінки каналу (канальна матриця **H**), тому він має змогу коригувати канальні спотворення. У MIMO-системах зі зворотним зв'язком передавач отримує інформацію щодо каналу від приймача і адаптивно розподіляє повну потужність між паралельними каналами.

Питома пропускна здатність некорельованого каналу Релея без зворотного зв'язку, усереднена за статистичним ансамблем реалізацій матриці **H**, в залежності від кількості антен при незмінному відношенні сигнал/шум $\rho = 10$ дБ показана на рис.2.

З аналізу приведеної на рис.2 поверхні можна зробити висновки:

- 1) найбільше значення питомої пропускної здатності спостерігається при однаковій кількості антен, що передають (M) і приймають (N);
- 2) при $M < N$ питома пропускна здатність вища, ніж при $M > N$.

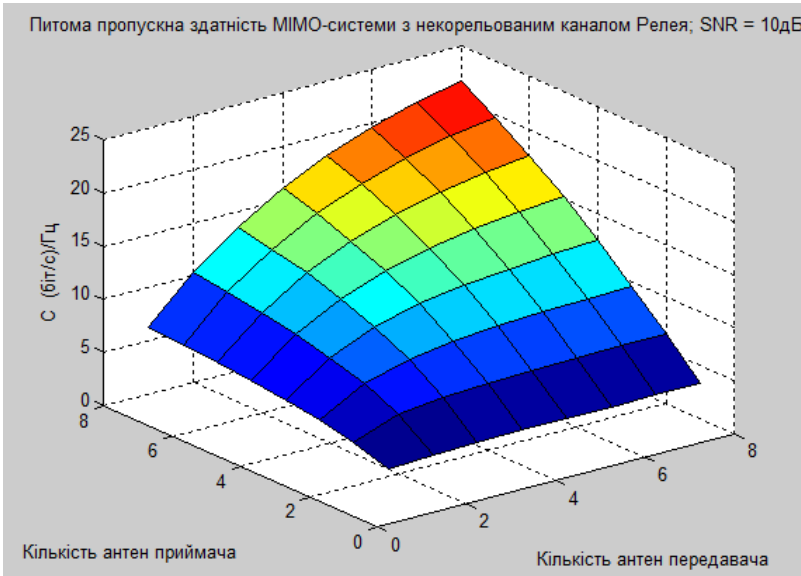


Рисунок 2 - Питома пропускна здатність некорельованого каналу Релея без зворотного зв'язку в залежності від кількості антен при відношенні сигнал/шум $\rho=10$ дБ.

Також розраховані питомі пропускні здатності каналу в залежності від відношення сигнал/шум при $M=N$, усереднені за статистичними ансамблями 10000 реалізацій матриці $\mathbf{H}$ (рис. 3). Канал Релея некорельований, без зворотного зв'язку.

Аналіз результатів моделювання питомої пропускної здатності від відношення сигнал/шум (SNR):

- системи MIMO дозволяють отримати питому пропускну здатність каналів зв'язку вищу за межу Шеннона;
- при збільшенні кількості передавачів і приймачів пропускна здатність каналів суттєво збільшується;
- прирощення питомої пропускної здатності при збільшенні N та M на одиницю збільшується зі зростанням SNR;

- при фіксованому значенні відношення сигнал/шум, що дорівнює 20 дБ, питома пропускна здатність систем з кількістю передавачів і приймачів 2×2, 3×3 та 4×4 приблизно змінюється у відношенні: 12:16,5:23 (біт/с)/Гц.

Просторова кореляція між радіохвилями, яка є функцією від кутового спектра потужності, діаграми спрямованості і рознесення антен, знижує пропускну здатність каналу.

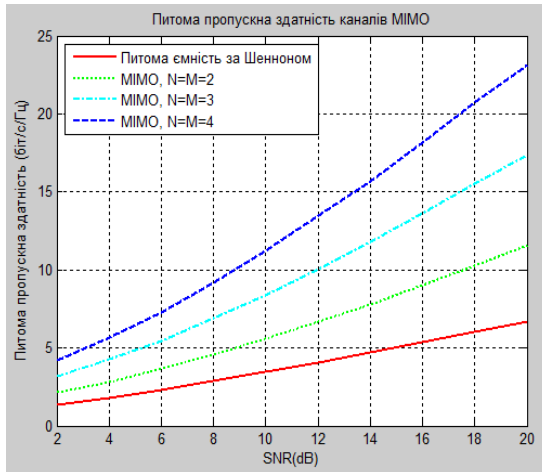


Рисунок 3 - Питомі пропускні здатності каналів MIMO в залежності від відношення сигнал/шум при рівній кількості антен.

Кореляційні властивості MIMO каналу відображає аналітична модель Кронекера [2]

$$\mathbf{H}_{\text{кор}} = \mathbf{R}_{\text{пр}}^{1/2} \mathbf{H} \mathbf{R}_{\text{пер}}^{1/2},$$

де $\mathbf{R}_{\text{пр}}$, $\mathbf{R}_{\text{пер}}$ – кореляційні матриці між приймальними та передавальними антенами відповідно; верхній індекс відповідає обчисленню квадратного кореня.

Кореляційна матриця каналу

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{\text{пер}} \otimes \mathbf{R}_{\text{пр}},$$

де $\otimes$ – добуток Кронекера.

На рисунку 4 відображені залежності питомих пропускних здатностей каналів MIMO від відношення сигнал/шум при рівній кількості антен з урахуванням кореляції між антенами та без урахування.

Аналіз результатів розрахунків (рис. 4): в каналах, де присутня просторова кореляція, пропускна здатність зменшується. При фіксованому значенні відношення сигнал/шум, що дорівнює 20 дБ, питома пропускна здатність систем з кількістю передавачів і приймачів 3×3 та 4×4 змінюється у відношенні: 2,5:4,4 (біт/с)/Гц, тобто, чим більша кількість передавачів і приймачів, тим більша різниця в результатах моделювання каналів без кореляції та каналів з кореляцією.

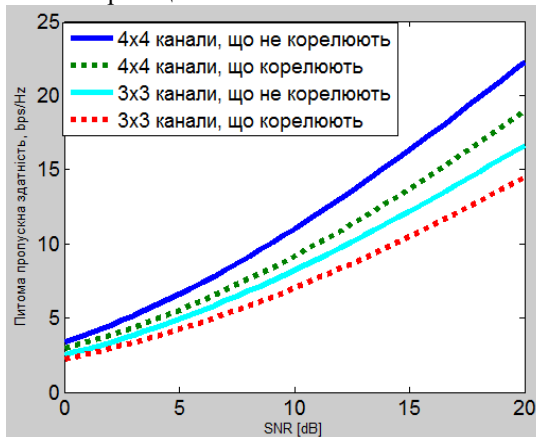


Рисунок 4 - Питомі пропускі здатності каналів MIMO в залежності від відношення сигнал/шум при рівній кількості антен з урахуванням кореляції між антенами та без урахування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ермолаев, В.Т. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи: Монография [Текст] / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. – 368 с.
2. Балута, М.Ю. Анализ коэффициентов пространственной корреляции в зависимости от условий работы MIMO канала [Текст] / М.Ю. Балута, П.В. Иващенко // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2013. – № 1. – С.124-129.