

УДК 621.396.96:004.78

І.В. Свид, О.С. Мальцев

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

У статті отримані вирази для оцінки пропускної здатності мобільних систем телекомунікацій при використанні технологій просторово-множинного доступу. Показано, що пропускна здатність мобільних систем телекомунікацій при використанні технологій просторово-множинного доступу значно збільшена за рахунок як одночасного обслуговування декількох користувачів, так і з вибором їх оптимальної кількості.

Ключові слова: пропускна здатність, технології просторового доступу.

Вступ

Постановка проблеми та аналіз літератури.

Необхідність підвищення швидкості передавання інформації у системах зв'язку існувала завжди. Однак, незважаючи на зростаючий попит на високошвидкісне обслуговування, зробити це, особливо в мобільних системах телекомунікацій (МСТ), дуже складно. Зараз ці системи забезпечують швидкості передачі до 10 Мбіт/с. Але навіть збільшення швидкості передачі до 50 Мбіт/с виявляється недостатнім. Мова може йти про декілька сотень мегабітів у секунду. При використанні традиційних технологій передавання та приймання сигналів таке збільшення швидкості передачі даних вимагає надмірно високою випромінюваної потужності або занадто великої смуги частот, що не завжди здійснимо. Тому для досягнення високих швидкостей передачі необхідно розвиток нових телекомунікаційних технологій. Теоретичні дослідження і отримані практичні результати останніх років показали дуже високу ефективність використання в мобільних системах телекомунікацій багатоантенних приймальних і передавальних структур, коли між приймачем і передавачем встановлюється канал з багатьма входами і багатьма виходами (multiple-input multiple-output (MIMO) channel). MIMO-канали дозволяють значно розширити можливості систем мобільного зв'язку. Поліпшення характеристик систем зв'язку досягається завдяки тому, що MIMO-канали можуть забезпечити істотний енергетичний вигравш, пов'язаний з рознесенням на прийомі та/або на передачі.

У сучасному суспільстві мобільні системи телекомунікацій відіграють роль прискорювача розвитку інформаційних технологій [1]. Однією з вимог розвитку МСТ є забезпечення значного збільшення швидкості передачі даних при зростанні кількості користувачів [2]. Рішення цього актуального завдання можливе лише при широкому використанні адаптивної й просторово-часової обробки сигналів, а також реалізації комбінованих (адаптивних) методів множинного доступу (МД) в основу яких покла-

дено МД з просторовим розділенням каналів (SDMA – Space Division Multiple Access) [3].

Специфікою МСТ є те, що абоненти можуть мати тільки одну антену, що, як правило, визначено габаритами мобільної станції, що значно звуужує можливість просторової технології, при якій тільки базова станція може мати багатоелементну антену або AAS (Adaptive Antenna System).

Мета роботи. Оцінка пропускної здатності (ПЗ) каналу обміну інформацією в МСТ при реалізації просторових технологій множинного доступу.

Основна частина

Одним з найважливіших параметрів MIMO систем є пропускна здатність каналу, під якою розуміється максимальна швидкість передачі інформації, досяжна в даному каналі зв'язку на 1 Гц його смуги пропускання. Пропускна здатність детермінованого каналу SISO при впливі адитивного білого шуму визначається теоремою Шеннона-Хартлі:

$$C = \log_2[1 + q | h_{11} |^2] \quad [\text{біт/с/Гц}], \quad (1)$$

де $q = P_c/P_{\text{ш}}$ – середнє значення відношення сигнал-шум на вході приймача; h_{11} – коефіцієнт передачі по SISO-каналі.

Пропускна здатність детермінованого каналу MIMO можна записати як:

$$C = \log_2 \left[\bar{I}_r + \left(\frac{P_c/P_{\text{ш}}}{T} \right) \bar{H} \bar{H}^{*T} \right] \quad [\text{біт/с/Гц}], \quad (2)$$

де \bar{I}_r – одинична матриця розмірності $N_r \times N_r$; $P_c/P_{\text{ш}}$ – середнє значення відношення сигнал-шум на виході кожної прийомної антени; \bar{H}^{*T} – ермітово-сполучена матриця \bar{H} .

Можна помітити, що вираз (2) є окремим випадком виразу (1) при використанні одиночних антен у передавачі та приймачі.

Для випадкових MIMO-каналів (2) узагальнюється, при цьому відбувається перехід до так званої середньої пропускної здатності:

$$C = m_{11} \left\{ \Delta F \log_2 \left[\bar{I}_r + \left(\frac{P_c/P_{ш}}{T} \right) \bar{H}\bar{H}^*T \right] \right\} [\text{біт}/\text{с}/\text{Гц}], \quad (3)$$

де $m_{11} \{ \}$ – математичне сподівання значень функції від випадкової величини \bar{H} .

При збільшенні кількості антен у передавачі і (або) у приймачі, значення виразів (2) і (3) також буде зростати. Таким чином, пропускна здатність MIMO-каналу завжди більше пропускної здатності SISO-каналу. Збільшуючи кількість антен передавача і (або) приймача, можна значно підвищити швидкість передачі інформації в системах з MIMO, наслідком чого є підвищення їх пропускної здатності в порівнянні з SISO.

Фундаментальною проблемою систем з MIMO є розробка алгоритмів розподілу інформаційних бітів між передавальними антенами; формування, випромінювання та прийому сигналів. Інженери і дослідники, що працюють в даній області, концентрують увагу на вирішенні трьох завдань: забезпечення високої швидкості передавання інформації, низької ймовірності помилки на біт і/або відносній простоті пристрою, що реалізує конкретний алгоритм.

На практиці використовують три схеми передавання за MIMO-каналами:

- просторово-часове кодування (Space-Time Coding, STC);
- просторове мультиплексування (Spatial Multiplexing, SM);
- метод формування діаграми спрямованості антен (Beamforming).

Мобільну систему телекомунікацій будемо розглядати як мережу радіодоступу в складі базової станції, що має антенну решітку (АР) з кількістю елементів рівним M і K абонентських станцій (АС). На БС є просторово-часовий кодер, який перетворює вхідний потік даних в послідовність просторових символів, кожен з яких випромінюється одночасно всіма передавальними антенами. На кожній АС є просторово-часовий декодер, який забезпечує просторово-часову обробку прийнятих сигналів, зворотну по відношенню до обробки, виконаної на передавальній стороні [4, 5].

Так як ПЗ каналу зв'язку з адитивним гаусовим білим шумом є функцією потужностей сигналу і шуму, ширини смуги пропускання, то (1) можна записати як

$$C = \log_2 \left[1 + \frac{P_c}{\Delta F N_0} \right] [\text{біт}/\text{с}/\text{Гц}], \quad (4)$$

де P_c – визначається повною потужністю, випромінюваної БС P_0 ; ΔF – частотний ресурс каналу; N_0 – спектральна щільність шуму.

Якщо вважати, що сигнали на виході блоку просторової обробки незалежними (ортогональни-

ми), то (4) можна записати у вигляді:

$$C = \sum_{i=1}^M \log_2 \left[1 + \frac{P_i}{\sigma_0^2} \right]. \quad (5)$$

Як випливає з виразу (5), ПЗ системи залежить від способу розподілу повної потужності передавача P_0 між антенними елементами БС.

Якщо розглядати рівномірний розподіл потужності між антенними елементами, то $p_i = P_0/M$, і тоді ПЗ системи визначається виразом

$$C = \sum_{i=1}^M \log_2 \left[1 + \frac{P_0}{M\sigma_0^2} \right]. \quad (6)$$

Припустимо, що МСТ повинна забезпечити незалежне обслуговування K користувачів. Повну потужність P_0 , випромінювану БС, будемо вважати обмеженою і не залежною від числа користувачів. Це означає, що при наявності K користувачів потужність, призначена кожному з них, зменшується в K раз і, отже, дорівнює P_0/K . Для забезпечення просторового розділення K користувачів також застосовується ортогоналізації вагових векторів просторової обробки сигналів на БС. Ця процедура являє собою додаткове перетворення сигналів і може бути виконана за допомогою матриць-проекторів на підпростір, ортогональне всім ваговим векторам крім вектора самого користувача.

Матриця-проектор проектує m -мірний ваговий вектор користувача на $(M-1)$ -мірний підпростір. Ваговий вектор розглянутого користувача є випадковим вектором, рівноймовірно розподіленим в m -мірному просторі, і при його проектуванні в підпростір меншої розмірності втрати відношення сигнал-шум визначаються ступенем зменшення розмірності цього підпростору.

Так як число користувачів дорівнює K , то матриця-проектор проектує m -мірний ваговий вектор користувача на підпростір розмірності $(M-K)$. Отже, енергетичні втрати за рахунок розділення K користувачів збільшуються і становлять величину $1-(K-1)M^{-1}$. У цьому випадку середнє значення відношення сигнал-шум на виході антени

$$q_m^q = \frac{q_0}{K} M \left(1 - \frac{K-1}{M} \right), \quad (7)$$

звідки повна середня ПЗ системи

$$C \approx K \log_2 \left[1 + \frac{q_0}{K} [M - (K-1)] \right]. \quad (8)$$

Отримано аналітичні вирази для ПЗ системи в умовах Релеївських замирань сигналів, справедливий при довільних значеннях як елементів антенної решітки на БС, так і кількості користувачів.

Результати розрахунку середньої ПЗ МСТ представлені на рис. 1.

З отриманих результатів видно, що повна ПЗ системи збільшується із зростанням кількості K користувачів за рахунок одночасного використання одного і того ж частотного каналу різними користувачами. Однак середнє відношення сигнал-шум на виході з антенних елементів зменшується при збільшенні K . Це можна пояснити також тим, що M -елементна АР має $M-1$ ступенів свободи. Подавлення соканальної інтерференції для кожного користувача відповідає зменшенню числа ступенів свободи на одиницю. Коли присутні K користувачів, то $K-1$ ступенів свободи виділяється для подавлення соканальної інтерференції, а решта $M-K$ ступенів використовуються для рознесення.

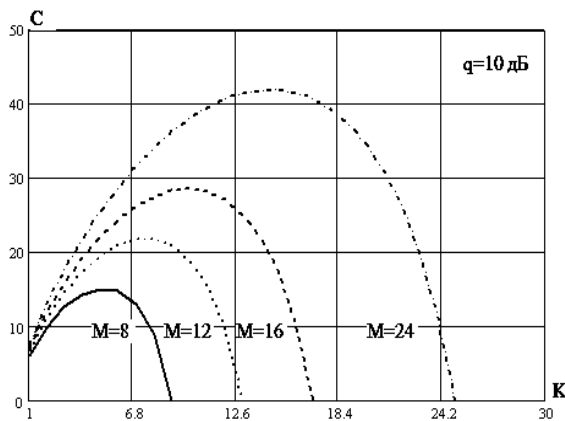


Рис. 1. Пропускна здатність системи

Тому, рівень рознесення зменшується із збільшенням користувачів, що, призводить до збільшення ймовірності бітової помилки. Це означає, що ефективна ПЗ системи зменшується із збільшенням числа користувачів.

Однак слід зазначити, що існує оптимальна кількість K_{opt} користувачів для їх просторового розділення, яке залежить від потужності P_0 передавача (або від відношення сигнал-шум q_0). Оптимальна кількість абонентів, як видно з рис. 1, визначається енергетикою радіолінії і наближається до максимально можливого числа користувачів $K = M$.

Таким чином, пропускна здатність системи з технологією просторового доступу може бути збільшена:

- за рахунок можливості одночасного незалежного обслуговування декількох користувачів;
- вибором оптимальної кількості обслуговуваних користувачів, за рахунок збільшення повної ПЗ системи при незмінній потужності передавача БС.

Висновки

Використання технології множинного доступу з просторовим розподілом абонентів не вимагають оцінки напрямків приходу сигналів.

Показано, що збільшення кількості просторово розділених абонентів збільшує пропускну здатність мобільних систем телекомунікацій.

Встановлено, що існує оптимальна кількість абонентів, для яких слід застосовувати просторове розділення абонентів. При такій оптимізації максимізується повна середня пропускна здатність системи, а оптимальна кількість абонентів залежить від енергетики радіолінії.

Список літератури

1. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / В.А. Григорьев, О.И. Лагузенко, Ю.А. Раснаев. – М.: ЭкоТрендз, 2005. – 384 с.
2. Alazemi H.M.K. Stochastic modeling and analysis of 802.11 DCF with heterogeneous non-saturated nodes / H.M.K. Alazemi, A. Margolis, J. Choi, R. Vijaykumar, S. Roy // Computer Communications. – 2007. – Vol. 30, no. 18. – P. 3652-3661.
3. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи; изд. второе, исправленное и дополненное / И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
4. Пат. на корисну модель № 70174 Україна, МПК G01S13/00. Спосіб передачі інформації / Обод І.І., Нікітіна Л.О., Нікітін С.О., Свид І.В. від 12.12.2011.
5. Пат. на корисну модель № 70955 Україна, МПК G01S13/00. Спосіб передачі інформації / Обод І.І., Нікітіна Л.О., Нікітін С.О., Свид І.В. від 03.01.2012.

Надійшла до редколегії 19.01.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.І. Обод, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЙ

И.В. Свид, А.С. Мальцев

В статье получены выражения для оценки пропускной способности мобильных систем телекоммуникаций при использовании технологий пространственного множественного доступа. Показано, что информационная эффективность систем и сетей с использованием технологии пространственного доступа значительно увеличена за счет как одновременного обслуживания нескольких пользователей, так и с выбором оптимального их числа.

Ключевые слова: пропускная способность систем, технологии пространственного доступа.

THE CAPACITY OF MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS

I.V. Svyd, O.S. Maltsev

In this paper the expression to evaluate the capacity of mobile telecommunication systems using spatial multiple access technologies. It is shown that the effectiveness of information systems and networks using the technology of space access considerably increased due to simultaneously serve multiple users, and by selecting the best of them.

Keywords: capacity systems, technology spatial access.