

УДК 621.391

DOI: 10.31673/2412-9070.2020.035560

К. О. ДОМРАЧЕВА¹, канд. техн. наук, доцент;А. В. ВОЛОШЕНКО¹, студентка;О. Л. ЗОЛКИН², канд. техн. наук;Р. М. КИРИЧЕНКО¹, ст. викладач,¹ Державний університет телекомунікацій, Київ² Волзький державний університет водного транспорту, Самара

ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З MIMO

Розглянуто актуальне питання збільшення швидкості передавання даних у телекомунікаційних системах із MIMO. Запропоновано використовувати збільшення відношення сигнал/шум за рахунок оброблення та складання сигналів від паралельних антенних каналів для підвищення пропускної здатності системи завдяки застосуванню квадратурної амплітудної маніпуляції. Проведено моделювання системи для MIMO 4×4. Розраховано ймовірність помилки для QAM. Визначено спосіб, який дає можливість збільшити в 4 рази швидкість передавання інформації зі збереженням тривалості сигналу і відповідно смуги пропускання радіоканалу. За розробленою методикою можуть бути створені телекомунікаційні системи з великою кількістю багатопозиційних амплітудно-маніпульованих сигналів, а також у поєднанні з багатопозиційними фазоманіпульованими сигналами. Показано, що збільшення відношення сигнал/шум під час оброблення сигналів від паралельних антенних каналів не може збільшити пропускну здатність системи, а тільки зумовить зменшення помилки приймання сигналу.

Ключові слова: пропускна здатність; MIMO; сигнал/шум; багатопозиційний сигнал.

Вступ

Традиційною системою зв'язку, як відомо, є система з однією передавальною та однією приймальною антенами. Така система в сучасній літературі дістала назву системи SISO (*Single-Input-Single-Output*). Також широко відомі системи зв'язку з однією передавальною антеною та кількома приймальними антенами SIMO (*Single-Input-Multiple-Output*). У цих системах кілька приймальних антен застосовуються для реалізації відомого алгоритму рознесення приймання сигналів у каналах зв'язку із завмираннями. Відносно нещодавно було запропоновано системи зв'язку з кількома передавальними антенами із однією приймальною антеною. Такі системи дістали назву систем MISO (*Multiple-Input-Single-Output*). У цих системах, так само, як і в системах SIMO, реалізується ідея рознесення, але рознесення застосовується на передавальному боці. Таким чином, у системах MISO реалізується алгоритм рознесення передавання.

Узагальненням систем SIMO та MISO є системи зв'язку, в яких використовується кілька передавальних антен і кілька приймальних антен. Такі системи відомі під назвою MIMO (*Multiple-Input-Multiple-Output*). У системах MIMO може бути реалізовано як просторове рознесення на прийманні, так і просторове рознесення на передавання. Окрім того, існують багато користувачів системи MIMO (MU-MIMO — *Multiuser MIMO*), в яких базова станція з кількома приймально-передавальними антенами взаємодіє з кількома абонентськими станціями, кожна з яких може мати одну або кілька приймально-передавальних антен. Можливі конфігурації багатоантенних систем схематично зображено на рис. 1.

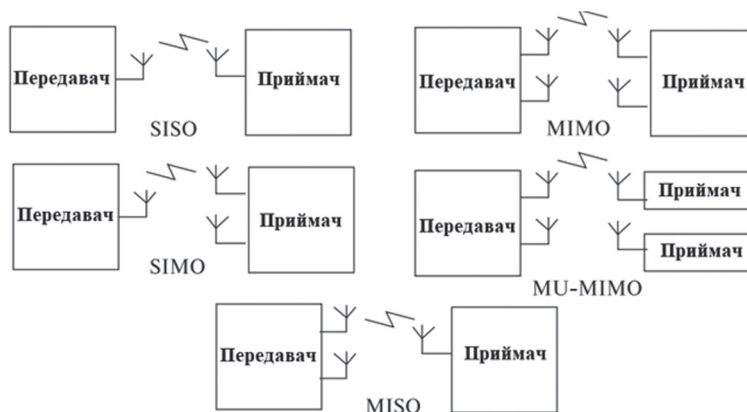


Рис. 1. Можливі антенні конфігурації

© К. О. Домрачева, А. В. Волошенко, О. Л. Золкин, Р. М. Кириченко, 2020

У системах МІМО, очевидно, як і на передавальному боці, так і на приймальному боці використовуються багатоелементні антени або антенні решітки. Багатоелементні антени можуть бути використані так, щоб зосередити енергію в напрямі певного абонента і сформувати відповідну діаграму напрямленості (адаптивне формування променя діаграми напрямленості — *beamforming*). Окрім того, багатоелементні антени можуть бути використані для формування кількох паралельних потоків даних (режим просторового мультиплексування — *spatial multiplexing*).

Спільне використання ефектів просторового рознесення, просторового мультиплексування і формування променя діаграми напрямленості дає змогу [1]:

- підвищити стійкість системи (зменшити ймовірність помилки);
- підвищити швидкість передавання інформації в системі;
- збільшити зону покриття;
- зменшити необхідну потужність передавача.

Ці чотири позитивні властивості систем МІМО, на жаль, не можуть бути реалізовані одночасно. Наприклад, збільшення швидкості передавання інформації призводить до збільшення ймовірності помилки або до збільшення випромінюваної потужності передавача. Тому у процесі розроблення конкретної системи зв'язку необхідно знаходити компроміс.

Основна частина

Однією з головних проблем створення та розвитку безпроводових систем стільникового (мобільного) зв'язку є збільшення пропускної здатності при високій якості обслуговування користувачів (мала ймовірність бітової помилки) у складних умовах багатопробеневого просторового каналу з глибокими завмираннями (федінг) сигналів. Найбільш перспективним напрямком їх вирішення є використання антенних решіток як на приймальному, так і на передавальному кінці лінії зв'язку (так звані МІМО-системи).

Швидкість передавання інформації за такої ширини смуги пропускання радіоканалу Δf має вигляд [2]

$$C = \Delta f \log M, \quad (1)$$

де M — кількість позицій багатопозиційного сигналу.

Окрім пропускної здатності важливою характеристикою системи є ймовірність бітової помилки. Відношення сигнал/шум у власних підканалах визначається сингулярними числами матриці H . У найбільш характерному для міських умов багатопробеневого каналі з релієвськими завмираннями сигналів ці числа є випадковими і можуть значно відрізнятися одне від одного. Тому ймовірність бітової помилки буде також різною для різних підканалів, а енергетично більш слабкі підканали відчутно впливають на ймовірність бітової помилки всієї МІМО-системи.

У телекомунікаційних системах із МІМО у процесі оброблення сигналів від паралельних каналів досягається основний позитивний ефект — збільшення відношення сигнал/шум γ . Саме цим багато авторів обґрунтовують підвищення швидкості передавання даних під час використання технології МІМО, посиляючись при цьому на формулу Шеннона [3; 4]:

$$C = 0,5 \cdot \Delta f \cdot \log(1 + \gamma), \quad (2)$$

$$\gamma = P_c / P_{\text{ш}}, \quad (3)$$

де P_c , $P_{\text{ш}}$ — потужність відповідно сигналу та шуму.

У [3] стверджується, що «усі різновиди технології МІМО спрямовані на досягнення однієї мети — збільшення пікової швидкості передавання даних у мережах зв'язку за рахунок поліпшення завадостійкості. Фізичний сенс можливості збільшення швидкості передавання даних можна пояснити за допомогою формули Шеннона».

Нехай завдяки обробленню сигналів від паралельних антенних каналів вдалося дістати $\gamma = 7$, що згідно з формулою (2) буквально має привести до збільшення в три рази швидкості передавання даних (тривалість елементарного імпульсу має зменшитися в три рази), для чого буде потрібна в три рази більша смуга пропускання радіоканалу, що неможливо. Цей приклад доводить хибність твердження, що підвищення відношення сигнал/шум зумовлює до збільшення швидкості передавання даних: при цьому тільки буде зменшуватися помилка приймання даних.

Ймовірність помилки у разі когерентного приймання з виходу n статистично неоднорідних незалежних релієвських каналів під час будь-якого виду маніпуляції, за довільної структури двійкових сигналів у кожному каналі, визначається за формулою

$$p_{i\emptyset} = \frac{1}{2} \left[1 - \sum_{k=1}^n \frac{\lambda_k^{n-1}}{\prod_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^n (\lambda_k - \lambda_p)} \sqrt{\frac{\lambda_k}{1 + \lambda_k}} \right], \quad (4)$$

де λ_k — власні числа матриці відношення енергії сигналу до спектральної густини потужності шуму $K_{MISO} Q_{MISO}$, яка обчислюється за загальною матрицею KQ , але враховує просторову кореляцію (матриця K).

Матриця K коефіцієнтів передавання каналу записується в загальному вигляді так:

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\mu_1^2}{2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\mu_2^2}{2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\mu_{N_{tx}}^2}{2} \end{bmatrix}; \tag{5}$$

а матриця Q відношення сигнал/шум має такий загальний вигляд:

$$Q = \begin{bmatrix} q_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q_1^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & q_{N_{tx}}^2 \end{bmatrix}, \tag{6}$$

де μ_k — коефіцієнт передавання каналу $k, k = 1, 2, \dots, N_{tx}$; N_{tx} — кількість передавальних антен у системі MISO.

У разі, якщо середні потужності сигналів, які передаються з кожної антени рівні, то значення q_k^2 розраховується у такий спосіб:

$$q_k^2 = \frac{P_c T}{v^2}, \tag{7}$$

а добуток матриць $K \cdot Q$ набирає вигляду

$$K \cdot Q = \begin{bmatrix} \frac{\mu_1^2 P_c T}{2v_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\mu_1^2 P_c T}{2v_2^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\mu_{N_{tx}}^2 P_c T}{2v_{tx}^2} \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Відомо, що відношення енергії сигналу до спектральної густини потужності шуму h_k визначається за виразом

$$h_k^2 = \frac{\mu_k^2 P_c T}{v_k^2}, \tag{9}$$

де P_c — середня потужність сигналу, випромінюваного з однієї антени;

T — часовий інтервал передавання сигналу;

v_k^2 — спектральна густина потужності шуму.

Тоді

$$K \cdot Q = \begin{bmatrix} \frac{h_1^2}{2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{h_2^2}{2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{h_{N_{tx}}^2}{2} \end{bmatrix} = H, \tag{10}$$

де H — матриця відношення енергії сигналу до спектральної густини потужності шуму.

Єдиними способами підвищення швидкості передавання даних у телекомунікаційній системі з MIMO за даної смуги пропускання радіоканалу є поляризаційне розв'язування каналів (удвічі в разі одночасного використання вертикальної та горизонтальної поляризації сигналу в одній смузі частот) та просторове мультиплексування [5], тобто передавання різних потоків даних у різних антенних каналах з однаковою пропускнуою здатністю і підсумовування потоків у загальний потік із високою швидкістю в приймачі.

У даній роботі пропонується ще один спосіб побудови телекомунікаційної системи, в якій у разі використання квадратурної амплітудної маніпуляції (англ. QAM) сигналу для підвищення пропускної здатності телекомунікаційної системи з MIMO за даної смуги пропускання радіоканалу вдається досягти збільшення швидкості передавання даних завдяки підвищенню відношення сигнал/шум у результаті оброблення сигналів від паралельних антенних каналів. Причому цей амплітудно-маніпульований сигнал із кількістю позицій $M_1 = 2^{k_1}$ доцільно ефективно використовувати в комбінації з багатопозиційним фазоманіпульованим сигналом із кількістю позицій $M_2 = 2^{k_2}$, тобто створювати багатопозиційний амплітудно-фазоманіпульований сигнал із кількістю позицій $M = M_1 \times M_2$, який за даної смуги пропускання радіоканалу дасть можливість збільшити швидкість передавання даних у K раз: $K = k_1 \times k_2$ (k_1, k_2 — розряди двійкових сигналів).

Відомо, що мінімальна зміна сигналу, що є вимірювальним пристроєм, може бути практично порівняна до рівня гауссівського шуму [6].

Отже, у разі ефективного значення завади σ (нормальний випадковий процес) і ефективного значення сигналу $u_{c.еф}$ кількість помітних рівнів суміші сигнал + шум може бути подано співвідношенням

$$L = \frac{\left(\sqrt{u_{c.еф}^2 + \sigma^2}\right)}{\sigma} = \sqrt{(1 + P_c / P_{ш})}, \quad (11)$$

де P_c — середня потужність сигналу,

$$P_c = u_{c.еф}^2; \quad (12)$$

$P_{ш}$ — середня потужність шуму,

$$P_{ш} = \sigma^2 \quad (13)$$

при опорі кола 1 Ом.

Для QAM із використанням коду Грея застосовують таку формулу (результат точний при $M = 2^k$, коли k — парне) (рис. 2):

$$P_{QAM} \leq 1 - \left[1 - 2Q \left(\sqrt{\left(\frac{3E_{сеп}}{(M-1)N_0} \right)} \right) \right]^2 \leq 4Q \left(\sqrt{\left(\frac{3kE_{бсеп}}{(M-1)N_0} \right)} \right), \quad (14)$$

де $E_{сеп} = \frac{1}{6}(M^2 - 1)d^2 E_b$ — середня енергія сигналу; $\frac{E_{бсеп}}{N_0}$ — середнє відношення сигнал/шум на біт.

Залежність BER від спектральної ефективності та складності декодування відповідно MIMO з 2 Tx та 2 Rx антенами наведено на рис. 3.

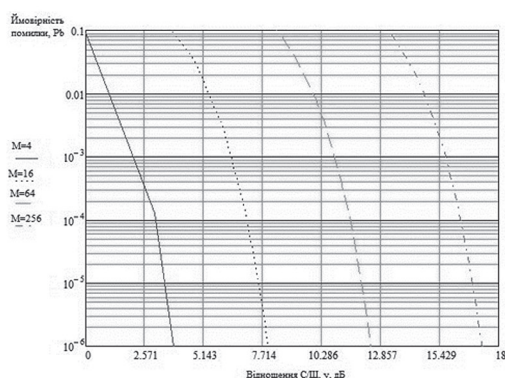


Рис. 2. Ймовірність помилки на символ для QAM

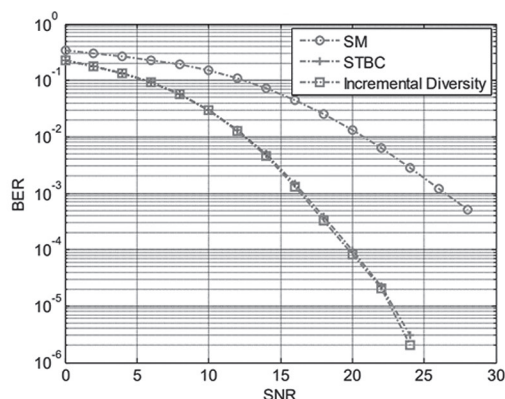


Рис. 3. Ймовірність помилки для MIMO 2x2 QAM-16

Моделювання для системи MIMO 4x4 зображено на рис. 4. Розмір пакета встановлений в 16 модульованих символів. Це відповідає каналу завмирання, який залишається незмінним протягом тривалості восьми символних періодів.

Як приклад розглянемо спосіб створення багатопозиційної телекомунікаційної системи, в якій буде реалізовано приймання чотирипозиційного амплітудно-маніпульованого сигналу, отриманого після оброблення і підсумовування сигналів від паралельних чотириантенних каналів (рис. 5, де П — передавач, $A_{п}$ — антена передавача, Пр — приймач кола зворотного зв'язку, $A_{пп}$ — антена приймача кола зворотного зв'язку, A1, A2, A3, A4 — антени приймачів, Пр1, Пр2, Пр3, Пр4 — приймачі, С — суматор, ОП — обчислювальний пристрій, П₁ — передавач кола зворотного зв'язку, $A_{п1}$ — антена передавача кола зворотного зв'язку, ВП — вирішальний пристрій [7]).

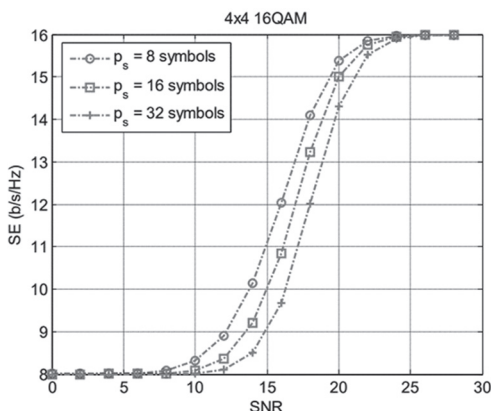


Рис. 4. Спектральна ефективність для МІМО 4x4 QAM-16

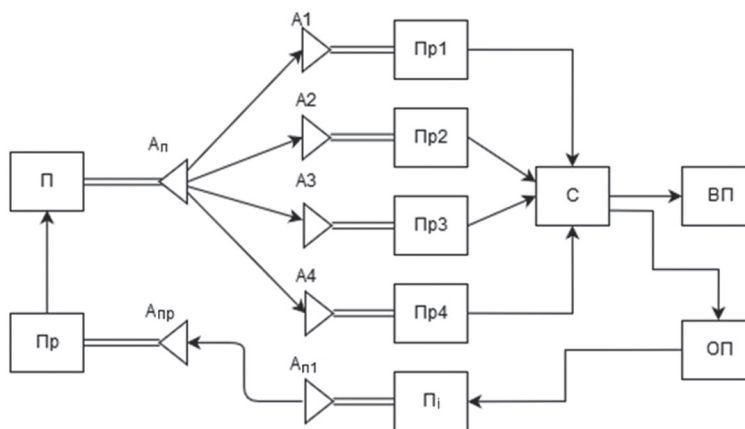


Рис. 5. Функціональна схема ТКС з чотирма паралельними антенними каналами

Матриця відношення енергії сигналу до спектральної густини потужності шуму для даного випадку визначається за виразом

$$K_{MISO} Q_{MISO} = \frac{h_S^2}{8} \begin{bmatrix} 1 & r_{TX} & 0 & r_{STBC} \\ r_{TX} & 1 & \sqrt{\frac{r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 - r_{TX}^2 r_{STBC}^2}{1 - r_{TX}^2 r_{STBC}^2}} & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 - r_{TX}^2 r_{STBC}^2}{1 - r_{TX}^2 r_{STBC}^2}} & 1 & r_{TX} \\ r_{STBC} & 0 & r_{TX} & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Потужність власного шуму приймача обчислюється за його параметрами

$$P_{ш.в} = kT\Delta f = \sigma^2, \quad (16)$$

де k — постійна Больцмана, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Вт/Град · Гц;

T — наведена до входу ефективна шумова температура, К;

Δf — смуга пропускання приймача, Гц.

Окрім того на вході приймачів буде додатково діяти зовнішній шум, припустимо з природою гауссівського шуму, $P_{ш.з}$.

Тоді сумарна потужність шумів на вході приймача буде такою:

$$P_{ш\Sigma} = P_{ш.в} + P_{ш.з}. \quad (17)$$

Для вимірювання сумарної потужності шуму в складі сигналу передбачено біт без сигналу, коли будуть прийматися тільки шуми.

Важливо, щоб відношення сигнал/шум під час приймання першого мінімального рівня сигналу відповідало прийнятним вимогам: наприклад, для забезпечення ймовірності бітової помилки $P_{пом} = 10^{-3}$ відношення сигнал/шум має дорівнювати 10 дБ [8]. Тоді мінімальний рівень сигналу визначається за вимірюваним сумарним шумом і має становити

$$L_1 \geq \sqrt{11 \cdot P_{ш\Sigma}}. \quad (18)$$

Тут враховано 10-відсотковий запас.

Пропонується в структурі сигналу, що передається, також виокремити біт, коли буде передаватися мінімальний рівень сигналу з шумом, який повинен становити 1/4 діапазону напруг у приймачі.

Для визначення рівня сигналу виконується операція обчислення: із суми суміші сигнал + шум віднімається виміряне значення сумарного шуму. Якщо виміряний рівень сигналу буде недостатнім, за допомогою обчислювального пристрою ОП виробляється сигнал керування передавачем, який передається по колу зворотного зв'язку і забезпечує необхідну потужність передавача (див. рис. 5).

Необхідний рівень сигналу буде визначатися з урахуванням реального значення зовнішнього шуму, тобто система буде працювати як адаптивна до рівня зовнішнього шуму. Решта три рівні сигналу будуть забезпечуватися автоматично і помилка їх приймання буде відповідно меншою.

У процесі побудови системи з MIMO з чотирма каналами в кожному каналі амплітуда сигналу буде мати один із чотирьох рівнів, що дасть можливість у приймачі ідентифікувати канали та здійснити роздільне приймання сигналів від каналів, після чого скласти їх рівні, а також об'єднати потоки, доставши в чотири рази більшу швидкість прийнятого сигналу порівняно зі швидкістю в кожному каналі, отриманої зі зменшенням учетверо швидкості вихідного сигналу в передавачі.

Кодування сигналів передавача в даній системі з QAM сигналом наведено в таблиці.

Кодування сигналів в системі з QAM16

Зсув фази	90°				180°				270°				360°			
Кодування сигналу за кодом Грея	00				01				11				10			
Кодування QAM16	0001	0100	0011	0000	0101	0110	0111	0100	1101	1110	1111	1100	1001	1010	1011	1000

Запропонований спосіб уможливорює збільшення в чотири рази швидкість передавання інформації зі збереженням тривалості сигналу і відповідно смуги пропускання радіоканалу.

За запропонованою методикою можуть бути створені телекомунікаційні системи з великою кількістю багатопозиційних АМ-сигналів, а також у поєднанні з багатопозиційними ФМ-сигналами.

Висновки

1. Збільшення відношення сигнал/шум під час оброблення сигналів від паралельних антенних каналів не може збільшити пропускну здатність системи, а тільки призведе до зменшення помилки приймання сигналу.

2. Збільшення пропускну здатності системи завдяки підвищенню відношення сигнал/шум може бути досягнуто шляхом застосування амплітудно-маніпульованого сигналу і запропонованої схеми побудови системи.

Список використаної літератури

1. Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделін В. Б. *Технологія MIMO. Принципи и алгоритми*. Москва: Горячая линия-Телеком, 2014. 245 с.
2. Bernard Sklar. *Digital Communications*. Prentice Hall PTR, New Jersey. 2001. 1100 p.
3. Tikhvinsky I., Terentyev S., Yurchuk A. *Mobile network LTE: technology and architecture*. Moscow: Eco-Trendz, 2010. 281 p.
4. Goldsmith: *Wireless Communications*. Cambridge University Press, August 2005. 904 p.
5. Jorswieck E., Sezgin A. *A Capacity achieving high rate space-time block codes*, *Communications Letters // IEEE, Heinrich-Hertz-Inst., Berlin, Germany; May, 2005*.
6. Gonorovsky I. *Radio Circuits and Signals*. Moscow: Radio and Communications, 1994. 480 p.
7. Semenko A., Domracheva C., Zaika V. *Using of Amplitude Manipulated signal to increase capacity of MIMO telecommunication system // XIIIth 2016 International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science» (TCSET'2016) – February 23-26 2016. Львів-Славське, 2016. P. 882–884*.
8. Stallings W. *Wireless Communications and Networking*. Prentice Hall, Inc. Upper Staddle River, New Jersey 07458. 2002. 636 p.

К. О. Домрачева, А. В. Волошенко, А. Л. Золкин, Р. М. Кириченко

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С МИМО

Рассматривается актуальный вопрос увеличения скорости передачи данных в телекоммуникационных системах с МИМО. Предлагается использовать увеличение отношения сигнал/шум за счет обработки и сборки сигналов от параллельных антенных каналов для повышения пропускной способности системы путем применения квадратурной амплитудной манипуляции. Проведено моделирование системы для МИМО 4x4. Рассчитана вероятность ошибки для QAM. Предложен способ, который позволяет увеличить в четыре раза скорость передачи информации при сохранении длительности сигнала и соответственно полосы пропускания радиоканала. По предложенной методике могут быть созданы телекоммуникационные системы с большим количеством многопозиционных амплитудно-манипулированных сигналов, а также в сочетании с многопозиционными фазоманипулированными сигналами. Показано, что увеличение отношения сигнал/шум при обработке сигналов от параллельных антенных каналов не может увеличить пропускную способность системы, а только приведет к уменьшению ошибки приема сигнала.

Ключевые слова: пропускная способность; мимом; сигнал/шум; многопозиционный сигнал.

K. O. Domracheva, A. V. Voloshenko, A. L. Zolkyn, R. M. Kyrychenko

INCREASES OF CAPACITY OF TELECOMMUNICATION SYSTEM WITH MIMO

The actual issue of increasing the data transfer rate in telecommunication systems with MIMO is considered. It is proposed to use an increase in the signal-to-noise ratio due to the processing and addition of signals from parallel antenna channels to increase the throughput of the system by applying quadrature amplitude manipulation. System simulation for MIMO 4x4. The error probability for QAM is calculated. A method is proposed that allows to increase by 4 times the information transfer rate while maintaining the signal duration and, accordingly, the bandwidth of the radio channel. According to the proposed methodology, telecommunication systems can be created with large numbers of multiposition amplitude-manipulated signals, as well as in combination with multiposition phase-shifted signals. It is shown that an increase in the signal-to-noise ratio when processing signals from parallel antenna channels cannot increase the system capacity, but only lead to a decrease in the signal reception error.

Keywords: bandwidth; MIMO; signal/noise; multi-position signal.

