

УДК 004.912

С.Г. Удовенко¹, В.А. Затхей¹, О.В. Тесленко¹¹Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця,
Харків, serhiy.udovenko@hneu.net

МОДЕЛЮВАННЯ МІМО-СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Наведено результати дослідження впливу розмірів пакетів на характеристики системи МІМО передачі даних в інфокомунікаційних мережах при допустимому поєднанні передатчиків і приймачів. Для проведення досліджень обрана модель бездротової мережі, що реалізована за допомогою засобів MATLAB та методу просторово - часового кодування Аламоуті.

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНА МЕРЕЖА, МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТОД АЛАМОУТІ, MATLAB, МІМО-СИСТЕМА

Удовенко С.Г., Затхей В.А., Тесленко О.В. Моделирование МІМО-системы передачи данных в инфокоммуникационных сетях. Приведены результаты исследования влияния размеров пакетов на характеристики системы МІМО передачи данных в инфокоммуникационных сетях при допустимом сочетании передатчиков и приемников. Для проведения исследований выбрана модель беспроводной сети, реализованной с помощью средств MATLAB и метода пространственно-временного кодирования Аламоуті.

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНА МЕРЕЖА, МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТОД АЛАМОУТІ, MATLAB, МІМО-СИСТЕМА

Udovenko S.G., Zathy V.A., Teslenko O.V. Simulation of mimo-data transfer systems in infocommunication networks. The results of research on the influence of packet sizes on the characteristics of the MIMO system of data transmission in infocommunication networks with the admissible combination of transmitters and receivers are given. For conducting researches, the wireless network model implemented using MATLAB tools and the Alamouti spatial - temporal coding method was chosen.

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНА МЕРЕЖА, МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТОД АЛАМОУТІ, MATLAB, МІМО-СИСТЕМА

Вступ

У сфері інформаційних мереж і комунікацій останнім часом все більше поширення знаходять бездротові технології. Це обумовлено як новими розробками в цій галузі, так і своєчасними зусиллями органів стандартизації. Нові розробки ведуться в цілому ряді напрямків: поліпшуються антенні системи, схеми модуляції, комунікаційні компоненти, механізми управління доступом до середовища, безпека комунікацій тощо [1]. В останні роки сформувався поняття специфічного класу інформаційних мереж, які визначаються як інфокомунікаційні мережі [2].

Термін «інфокомунікація» має бінарний характер (information, communications). Інформація (information) сьогодні розглядається як специфічний ресурс, що має низку ознак, які відрізняють його від інших ресурсів розвитку суспільства. З іншого боку, для забезпечення доступу користувачів до цього ресурсу потрібно підтримувати телекомунікаційний зв'язок (communication) між терміналом користувача і транспортною мережею, що об'єднує різні компоненти інформаційних ресурсів. Накопичення ж інформації, її обробка та систематизація в територіально розподілених базах даних, а також інформаційний обмін припускають наявність мережевих структур і програмного забезпечення, що дозволяє погоджувати в реальному часі функціонування різноманітних пристроїв, задіяних в процесі обміну.

В роботі [2] інфокомунікаційна мережа (Infocommunication Network) визначається як сукупність територіально розосереджених інформаційних, обчислювальних ресурсів, програмних комплексів управління, що розміщуються в кінцевих системах мережі і термінальних системах користувачів, взаємодія між якими забезпечується за допомогою телекомунікацій, і які спільно утворюють єдину мультисервісну платформу.

Важливою перевагою сучасних інфокомунікаційних технологій є можливість збільшення пропускної здатності, ємності і надійності мережі паралельно зі збільшенням кількості передавальних і приймальних антен. Інфокомунікаційні технології дозволяють вирішити такі проблеми як інтерференція, втрати при поширенні радіохвиль, завмирання сигналу, затінення і екранування. Завдяки своїм перевагам ці технології мають неабиякі перспективи, але повинні постійно вдосконалюватися. Тому питанням їх дослідження, зокрема моделювання мереж передачі даних, необхідно приділяти належну увагу.

Мережі з комутацією пакетів, в яких реалізовані методи забезпечення якості обслуговування, дозволяють передавати різні види трафіку, в тому числі телефонний і комп'ютерний. Тому методи комутації пакетів сьогодні вважаються найбільш перспективними для побудови конвергентної мережі, яка забезпечить комплексні якісні послуги для абонентів будь-якого типу. Важливим

завданням для проектувальників і користувачів комп'ютерних систем і мереж є розробка нових методів забезпечення необхідної якості обслуговування QoS (Quality of Service), які дозволили б мінімізувати рівень затримок для чутливого до них трафіку [3]. Актуальним є аналіз проблеми комутації пакетів в комп'ютерних мережах і застосування сучасних засобів дослідження основних характеристик передачі даних в інфокомунікаційних багатоканальних системах.

Основною метою роботи є дослідження впливу розмірів пакетів на характеристики системи МІМО при допустимому поєднанні передатчиків і приймачів. Для проведення досліджень була обрана модель бездротової радіомережі, що реалізована за допомогою засобів MatLab System. У будь-якому кадрі система працює з однією, двома, трьома або чотирма передавальними або приймальними антенами.

1. Характеристика методів просторово-часового кодування

У системах МІМО застосовуються різні методи і алгоритми, що діють за принципом просторово-часового кодування, які необхідно, шляхом моделювання, порівняти між собою і, потім, цілеспрямовано досліджувати та удосконалювати найбільш ефективні з них [4].

Основною ідеєю МІМО є формування паралельних потоків даних із загального потоку на вході і пересилку їх на незалежні приймачі, які забезпечують паралельну передачу даних в смузі радіочастот, що використовується в повній мірі одночасно (в один і той же момент часу) кожним приймачем. В цьому випадку пропускна здатність може бути збільшена без додаткового розширення смуги радіочастот, або підвищення ефективної випромінюваної потужності передавальних трактів каналу. Так як для передачі потоків даних використовується одна і та ж смуга радіочастот, потоки необхідно декорелювати, тобто забезпечити їх взаємну незалежність

Декореляція забезпечується організацією паралельних некорельованих каналів за допомогою просторового рознесення елементів передавальної і приймальної антенних решіток на відстань близько декількох довжин хвиль несучої частоти, що може бути реалізовано в використовуваних в даний час і перспективних стандартах бездротового зв'язку. Відповідно, для реалізації методу потрібна наявність більше одного приймально-передавального тракту (зазвичай двох і більше) в складі абонентської станції (АС) та базової станції (БС).

Розглянемо особливості деяких сучасних методів просторово-часового кодування, що застосовуються в інфокомунікаційних системах. Одним з найбільш поширених алгоритмів, просторово-часового блокового кодування є алгоритм MRC (Maximal Ratio Combining) [5]. Слід зазначити, що використання рознесенного прийому на АС

збільшує їх складність, тому методи рознесенного прийому доцільніше використовувати на стороні БС.

Розглянемо алгоритм MRC на прикладі системи з однією передавальною і двома прийомними антенами (система 1×2). В деякий момент часу x передається сигнал x , який проходить по двом просторовим каналам з коефіцієнтами передачі h_1 і h_2 , утворюючи матрицю комплексних канальних коефіцієнтів H . До прийнятих сигналів додається шум, комплексні відліки якого n_1 та n_2 утворюють матрицю відліків шумів N . Прийняті сигнали можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} y_1 = h_1 x + n_1 \\ y_2 = h_2 x + n_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \Rightarrow Y = Hx + N$$

Відновлене значення переданого сигналу \tilde{x} визначається таким чином:

$$\tilde{x} = \frac{h_1^H y_1 + h_2^H y_2 - h_1^H n_1 - h_2^H n_2}{h_1^H h_1 + h_2^H h_2}$$

Значення \tilde{x} подається на детектор максимальної правдоподібності, в якому на основі евклидової відстані між \tilde{x} і множиною можливих для передачі сигналів визначається найбільш правдоподібний переданий сигнал. Спрощене правило рішення засноване на виборі, якщо дотримується умова

$$dist(\tilde{x}, x_i) \leq dist(\tilde{x}, x_j); i \neq j$$

Найбільш правдоподібно переданим сигналом є сигнал, що має мінімальну евклідову відстань від сигналу. Припустимо, що передається k символів за l моментів часу. Отже, швидкість просторово-часового коду визначається як $R = k / l$. Для методу MRC $R=1$, тобто за один момент часу відновлюється один переданий символ. Розглянемо просторово-часовий блоковий алгоритм Аламоуті на прикладі системи з двома передавальними і однією приймальною антенами (система 2×1) [6].

Матриця передачі для цієї системи визначається наступним чином:

$$G_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix}$$

Процес кодування і передачі відбувається відповідно до таблиці 1.

Таблиця 1
Кодування та схемою Аламоуті (2×1)

Часовий слот	Антенa 1	Антенa 2
1	x_1	x_2
2	$-x_2^*$	x_1^*

Значення коефіцієнтів h_1 і h_2 мають бути постійними протягом двох послідовних тимчасових слотів. Прийняті сигнали можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} y_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + n_1 \\ y_2 = -h_1 x_2^H + h_2 x_1^H + n_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^H & -h_1^H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}$$

Відновлені сигнали визначаються таким чином:

$$\tilde{x}_1 = \frac{h_1^H y_1 + h_2 y_2^H - h_1^H n_1 - h_2 n_2^H}{h_1^H h_1 + h_2^H h_2},$$

$$\tilde{x}_2 = \frac{h_2^H y_1 - h_1 y_2^H - h_2^H n_1 + h_1 n_2^H}{h_1^H h_1 + h_2^H h_2}.$$

Значення \tilde{x}_1 та \tilde{x}_2 подаються на детектор максимальної правдоподібності. Для розглянутого методу $R=1$.

Розглянемо схему просторово-часового кодування з використанням методу мінімізації середньоквадратичної помилки (MMSE) між вхідними та відновленими сигналами системи передачі [7]. Рішенням цього методу є матриця наступного вигляду:

$$V = [H^H H + \alpha I_{N_t \times N_t}]^{-1} H^H,$$

де α – параметр регуляризації, що визначається наступним чином:

$$\alpha = Nt \frac{\sigma_n^2}{P} = \frac{Nt}{SNR},$$

де Nt – кількість передавальних антен; σ_n^2 – дисперсія шуму; P – середня потужність; SNR (Signal Noise Ratio) – відношення дисперсії шуму до середньої потужності.

Відновлені сигнали визначаються таким чином:

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} = [H^H H + \alpha I_{N_t \times N_t}]^{-1} H^H \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}.$$

Для розглянутого методу $R=2$.

Існують також інші методи просторово-часового кодування, зокрема: ZF, D-Blast, V-Blast тощо [5].

2. Опис МІМО моделі

Досліджувана модель базується на застосуванні методу Аламоуті з використанням M передавальних і N прийомних антен (де $M, N = 1, 2, 3, 4$), що дозволяє отримувати ефективні параметри передачі та підвищувати її завадостійкість. На рис. 1 наведена запропонована структура цієї моделі,

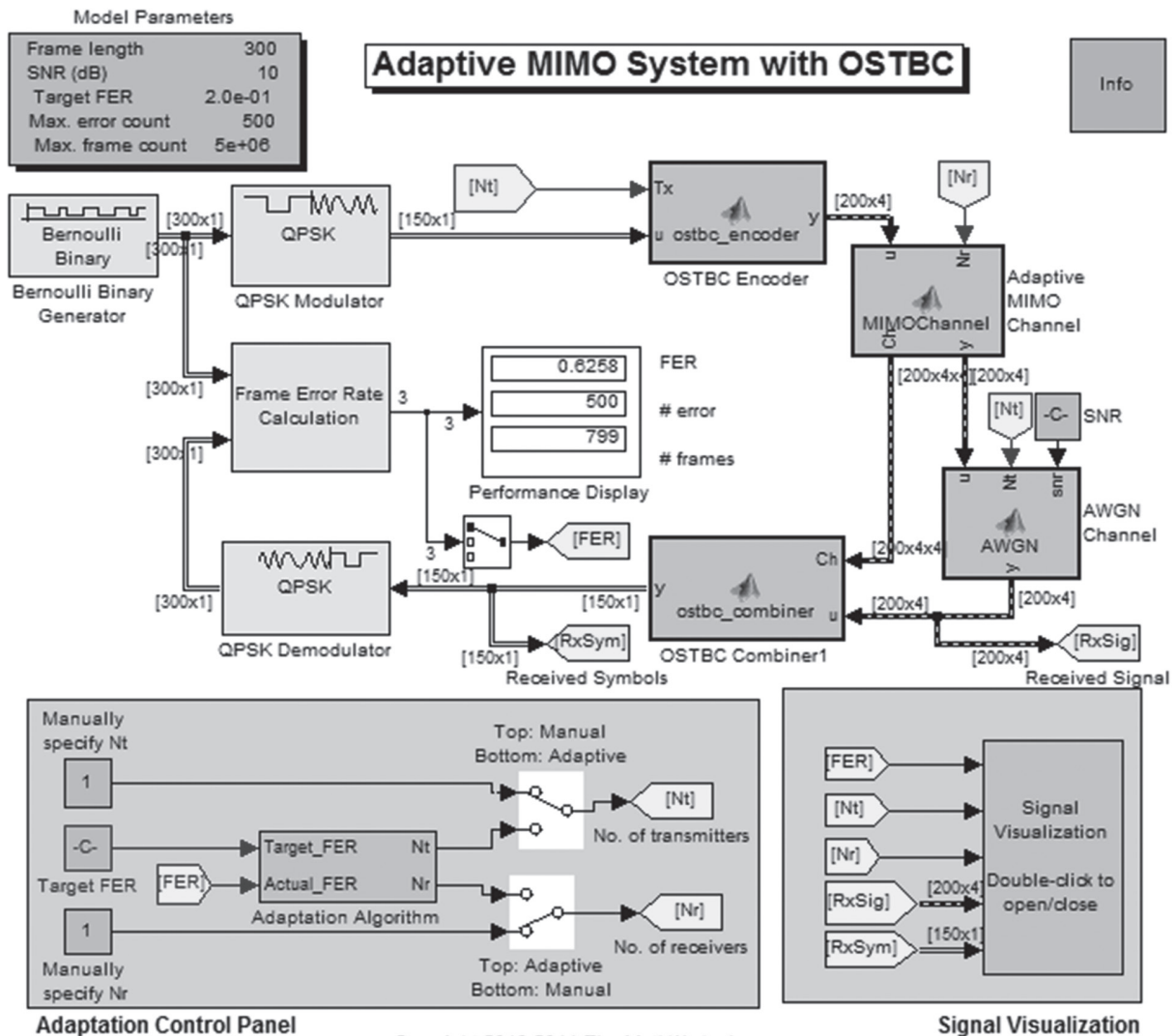


Рис. 1. Модель МІМО-системи передачі даних

реалізована за допомогою засобів MatLab System, а саме тулбоксу Communications System Toolbox, що містить алгоритми та інструменти для розробки, моделювання та аналізу систем зв'язку [8]. Ці можливості реалізовані у вигляді системних об'єктів і функцій MATLAB і блоків, які дозволяють реалізовувати алгоритми каналного кодування і кодування джерела, модуляції, стабілізації, синхронізації, а також моделі каналів зв'язку. Адаптивні алгоритми, що входять до Communications System Toolbox, дозволяють моделювати динамічні системи зв'язку, в яких застосовуються такі техніки як OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів), OFDMA і MIMO (multiple input / multiple output – кілька входів / кілька виходів). Розглянемо основні компоненти моделі, що досліджуються в даній роботі.

Блок «Генератор випадкових двійкових чисел (Bernoulli Binary Generator)» генерує кадр випадкових бітів та є джерелом інформації для моделювання. Параметр довжини кадру (Frame Length) визначає довжину вихідного кадру. Блок генерує випадкові двійкові числа за розподілом Бернуллі. Якщо параметр розподілу Бернуллі вибирається як ймовірність p , то блок виробляє «0» з ймовірністю p і «1» з ймовірністю $1 - p$. Блок генерує кадр з 300 або 3000 випадкових бітів в залежності від вимог завдання. Тип вихідних даних – «Boolean».

Блок «OSTBC (Orthogonal space-time block codes)» є датчиком ортогональних кодів, що кодує інформаційні символи з модулятора QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) з використанням коду Аламоуті для двох, трьох або чотирьох передавальних антен або інших узагальнених комплексних ортогональних кодів. Число передавальних антен в цьому блоці є важливим вхідним параметром. На виході цього блоку ($N_t N_r$) формується матриця змінного розміру, де кількість стовпців N_t відповідає кількості передавальних антен, а кількість рядків N_r – кількості приймальних антен. Цей функціональний блок є об'єктом системи в загальній схемі MIMO-моделювання алгоритмів кодування для обраної кількості передавальних та приймальних антен. Демодулятор QPSK розпізнає вихід блоку OSTBC, який є відновленим сигналом з розміром, рівним половині вхідного.

Блок «AMC (Adaptive MIMO Channel)» здійснює адаптацію MIMO каналу, що імітує частотно-кватратний розподіл Релея згасання MIMO каналу від N_t передавальних антен до N_r прийомних антен. Блок об'єднує просторово незалежні 4×4 MIMO канали з передавальною і приймальною сторони вибору антен. Перший вхід цього блоку ($N_t \times N_r$) є матрицею змінного розміру, де кількість колонок (N_t) відповідає кількості окремих передавальних антен, а кількості рядків (N_r) відповідає числу приймальних антен.

Блок «AWGN (Add white Gaussian noise to signal)» додає білий шум до дійсної або комплексної складової вхідного сигналу на прийомній стороні системи, що підтримує сигнали змінної довжини. Коли вхідний сигнал є реальним, цей блок додає реальний гауссівський шум і виробляє реальний вихідний сигнал. Якщо вхідний сигнал є комплексним, цей блок додає комплексний гауссів шум і виробляє комплексний вихідний сигнал відповідно. Блок AWGN бере час вибірки зі вхідного сигналу. Перший вхід цього блоку є перший виходом блоку MIMO каналу. Другий вхід цього блоку є дисперсією шуму, яка обчислюється з урахуванням числа передавальних антен (N_t), а на третій вхід подається значення SNR.

Блок «FERC (Frame Error Rate Calculation)» є підсистемою розрахунку показника FER, що обчислюється як відношення кількості кадрів з помилками до загальної кількості оброблених кадрів в одному експерименті з моделювання каналної передачі даних в MIMO-системі. Цей блок порівнює декодовані біти з бітами на вході кадрів для виявлення помилок і динамічно оновлює вміст вікон вихідного дисплея (Performance Display). Виходом блоку є вектор з трьох елементів: FER, кількість фреймів з помилками і кількість оброблених фреймів. Модель перевіряє параметр моделювання Стоп (Max error count), щоб контролювати тривалість моделювання. Симуляція зупиняється при виявленні заданої кількості кадрів з помилками.

3. Результати моделювання

Для проведення досліджень була обрана модель мережі MIMO, наведена на рис. 1. Необхідні для моделювання співвідношення кількості передавальних і приймальних антен задаються на панелі управління моделі у відповідних вікнах N_t та N_r . Метою моделювання було дослідження впливу розміру пакетів на такі характеристики функціонування системи бездротової мережі передачі даних MIMO як рейтинг системи та продуктивність бездротової мережі. Для дослідження моделі були обрані такі значення вхідних параметрів: розміри фреймів – 300 байт і 3000 байт; SNR – 10 dB.

Результати моделювання для розмірів пакетів 300 байт та 3000 байт наведено відповідно в таблицях 2 та 3. На таблицях позначено: K_1 – кількість передавальних антен; K_2 – кількість приймальних антен.

На рис. 2 та 3 наведено рейтинг системи MIMO з різною кількістю передавальних і приймальних антен ($N_t, N_r = 1, 2, 3, 4$). Рейтинг системи MIMO істотно залежить від кількості антен на передавачі і приймачі. Результати дослідження показали, що найкращий рейтинг система має, коли $N_t = N_r = 4$.

Оцінка FER обчислюється як відношення кількості фреймів з помилками до загальної кількості оброблених фреймів в одному експерименті. Чисельні значення цього параметра наведені в стовпчиках 3 і 5 табл. 1 і на малюнках 3а) і 3б).

Таблиця 2

Результати моделювання (1)

K1	K2	Розмір пакету 300 байт	
		FER	Frames
1	1	0.652	229800
	2	0.783	191400
	3	0.825	181800
	4	0.892	168000
2	1	0.379	394800
	2	0.435	344100
	3	0.497	301800
	4	0.493	304200
3	1	0.241	621900
	2	0.249	600900
	3	0.256	585300
	4	0.258	581100
4	1	0.170	879600
	2	0.157	955500
	3	0.148	1011300
	4	0.143	1046400

Таблиця 3

Результати моделювання (2)

K1	K2	Розмір пакету 3000 байт	
		FER	Frames
1	1	0.907	1653000
	2	0.980	1530000
	3	0.994	1509000
	4	0.996	1506000
2	1	0.716	2094000
	2	0.809	1854000
	3	0.877	1710000
	4	0.909	1650000
3	1	0.63	2367000
	2	0.678	2211000
	3	0.717	2091000
	4	0.768	1953000
4	1	0.508	2949000
	2	0.561	2673000
	3	0.584	2565000
	4	0.568	2640000

Порівняльний аналіз результатів моделювання свідчить про те, що рейтинг фреймів з розмірі 3000 природно вище при будь-якому поєднанні передавальних і приймальних антен. У цьому випадку передача даних вимагає великих витрат часу в порівнянні з передачею фреймів розміром в 300 байт і ймовірність появи помилкових біт в фреймі розмірі 3000 байт вище. На рис. 3 представлені результати моделювання МІМО системи з використанням фреймів розміром 300 байт. З рисунка видно, що навіть при роботі тільки одного передавального пристрою рейтинг системи змінюється від 0.64 до 0.91, що значно менше, ніж значення цієї характеристики для фреймів розміром 3000 байт.

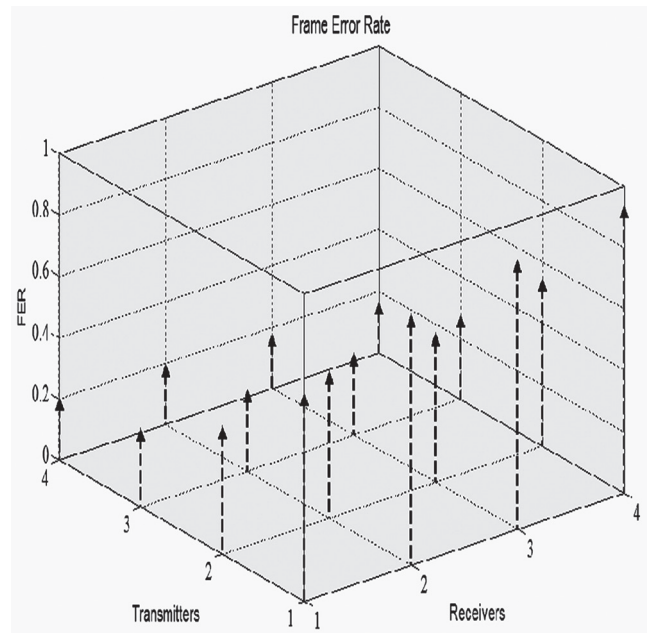


Рис. 2. Рейтинг МІМО-системи передачі даних (розмір фреймів 300 байт)

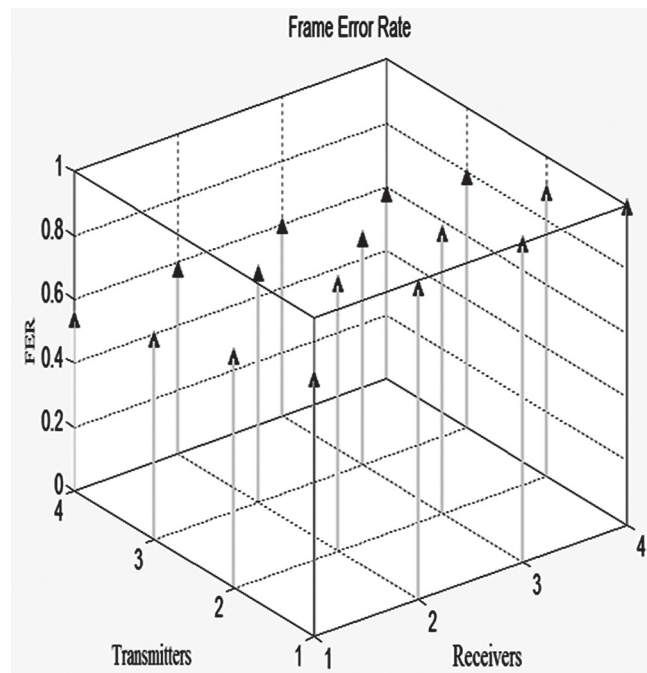


Рис. 3. Рейтинг МІМО-системи передачі даних (розмір фреймів 3000 байт)

Для мережевих фахівців важливою характеристикою будь-якої мережі є її пропускна здатність (throughputs). При використанні в контексті мереж зв'язку, пропускна здатність мережі – це швидкість успішної доставки повідомлень по каналу зв'язку. Якщо мережа має кілька послідовних ланок з різними бітрейтами, максимальна пропускна здатність загального каналу нижча або дорівнює найнижчій швидкості передачі даних.

Пропускна здатність зазвичай вимірюється в бітах за секунду (біт / с або bps), а іноді в пакетах даних за секунду (p / s або pps) або пакетах даних на часовий проміжок часу. Під корисною пропускною здатністю розуміють швидкість передачі

даних користувачів, які переносяться полем даних кадру.

Тому наступне дослідження моделі мережі було присвячено впливу розміру пакету на корисну пропускну здатність МІМО мережі. З цією метою в таблиці 2 та 3 в останні стовпці були занесені фрейми для пакетів 300 і 3000 байт відповідно, що характеризують пропускну здатність кожного розміру МІМО мережі. З використанням цих даних були отримані характеристики корисної пропускну здатності (p/s) каналу МІМО (для різних значень $K1$ та $K2$) при передачі фреймів різних розмірів. Відповідні результати наведені в табл. 3 (для розміру фреймів 3000) та в табл. 4 (для розміру фреймів 300).

Таблиця 3

Корисна пропускну здатність (для розміру фреймів 3000)				
K1 \ K2	1	2	3	4
1	1.53	1.51	1.5	1.49
2	2.16	1.8	1.7	1.61
3	2.35	2.23	2.1	1.9
4	2.9	2.68	2.51	2.6

Таблиця 4

Корисна пропускну здатність (для розміру фреймів 300)				
K1 \ K2	1	2	3	4
1	0.25	0.21	0.2	0.19
2	0.4	0.36	0.32	0.32
3	0.62	0.61	0.6	0.58
4	0.8	0.9	1.05	1.1

Дані таблиць 3 та 4 свідчать про те, що для конкретних умов експлуатації інфокомунікаційних мереж (для різних розмірів пакетів) можна визначити (за результатами МІМО-моделювання з використанням методів просторово-часового кодування) оптимальні співвідношення $K1$ (Nt) та $K2$ (Nr), що дозволяють теоретично отримати найвищу корисну здатність системи передачі даних.

Висновки

В роботі наведено результати дослідження впливу розмірів пакетів на характеристики системи МІМО передачі даних в інфокомунікаційних мережах при допустимому поєднанні передатчиків і приймачів. Для проведення досліджень була обрана модель бездротової мережі, що реалізована за допомогою засобів MATLAB та методу просторово-часового кодування Аламоуті. Виконані дослідження з визначення рейтингу і пропускну здатності системи МІМО показали, що перехід від SISO системи до МІМО системи збільшує пропускну здатність і значно підвищує рейтинг системи. Отримано рекомендації з підвищення корисної пропускну здатності комунікаційних мереж за різних умов передачі даних. Слід також зазначити, що представлені в пакеті MATLAB блоки побудови моделей продемонстрували задовільну відповідність теоретичних передумов і отриманих результатів моделювання.

Список літератури:

1. *Голдсмит А.* Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит ; пер. с англ. Н.Л. Бирюкова, Н.Р. Триски; под ред. В.А. Березовского. – М.: Техносфера, 2011. – 903 с.
2. *Воробийенко П.П.* Инфокоммуникационные технологии: термины и определения / П.П. Воробийенко, Л.А. Никитюк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6 (54). – С. 4–6.
3. *Гулиус В.А.* Имитационное моделирование пакетной сетевой коммутации для разных дисциплин обслуживания / В.А. Гулиус, С.Г. Удовенко, А.А. Шамраев // Системы обработки информации. – 2013. – Вип. 7(114). – С. 65–70.
4. *Бакулин М.Г.* Технология МІМО: принципы и алгоритмы / М.Г. Бакулин, Л.А. Варукина, В.Б. Крейнделлин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 242 с.
5. *Прокис Дж.* Цифровая связь. Пер. с англ. / Дж. Прокис. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
6. *Alamouti S.M.* Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications / S.M. Alamouti // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2008. – vol. 16, pp. 1451–1458.
7. *Benslama M.* Ad Hoc Networks Telecommunications and Game Theory / M. Benslama, M.L. Boucenna, H. Batatia. – London SW19 4EU UK ISTE: Ltd John Wiley & Sons, Inc. 27-37 St. George's Road, 2015. – 141 p.
8. *Paulraj A.J.* An Overview of MIMO Communications – A Key to Gigabit Wireless / A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, H. Bolcskei. // Proc. Of the IEEE – February 2004. – Vol. 92, No. 2 – P. 198–218.

Надійшла до редколегії 14.03.2018