

**МОДЕЛЮВАННЯ ШИРОКОСМУГОВОГО РАДІОКАНАЛУ ЦИФРОВОГО ЗВ'ЯЗКУ СИСТЕМИ CDMA СТАНДАРТУ IS-95**

*Проведено моделювання релеєвського каналу прямого трафіка системи CDMA стандарту IS-95 за допомогою пакета математичного моделювання MATLAB/SIMULINK. Отримано залежності коефіцієнта прийнятих базовою станцією бітових помилок і коефіцієнта помилкових прийнятих кадрів від максимального доплерівського зсуву частот.*

*Modeling Rayleigh the channel of the direct traffic of system CDMA of standard IS-95 by means of a package of mathematical modeling MATLAB/SIMULINK is spent. Dependences of factor of the bit errors accepted by base station and factor of the erroneous accepted shots from maximum Doppler shift of frequencies are received.*

Ключові слова: система зв'язку CDMA, доплерівський зсув, коефіцієнт помилкових біт (BER), коефіцієнт помилкових кадрів (FER), канал прямого трафіка.

**Вступ.** Цифрова стільникова система зв'язку CDMA (англ. Code Division Multiple Access) – множинного доступу з кодовим поділом каналів, яка забезпечує підвищену ємність, була стандартизована у 1993 році американською телекомунікаційною промисловою асоціацією TIA (англ. U.S. Telecommunications Industry Association у вигляді стандарту IS-95 (англ. "Mobile Station – Base Station Compatibility Standart for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System"). Система CDMA IS-95 фірми Qualcomm розрахована на роботу в діапазоні частот 800 МГц, виділеному для стільникових систем стандартів AMPS, N-AMPS і D-AMPS. Система CDMA IS-95 дає можливість кожному користувачеві всередині стільника використовувати один і той самий радіоканал і всю виділену смугу частот 1,25 МГц. Користувач в суміжному стільнику використовує цю ж смугу частот. Замість поділу спектра або часових слотів (як в інших технологіях систем рухомого радіозв'язку), кожному користувачеві призначається фрагмент шумоподібної носійної. Оскільки її фрагменти є квазіортогональними, виникає можливість відвести всю ширину виділеного каналу для кожного користувача. Ємність на один стільник визначається балансом між необхідним відношенням сигнал / шум для кожного користувача і фактором стиснення кодової послідовності. Таким чином, система абсолютно не потребує частотного планування. Для зменшення витрат операторів рухомого зв'язку і полегшення переходу від AMPS до CDMA у системі CDMA передбачена ширина каналу (1,25 МГц), така ж, як і у AMPS. На відміну від інших стільникових систем, трафік одного каналу не є постійною величиною і залежить від мовної активності і вимог, що пред'являються до мережі [1].

На сьогоднішній день виробництво устаткування цифрових стільникових систем зв'язку CDMA освоєно різними виробниками: Ericsson, Lucent Technologies, Motorola, NEC, Nortel, Samsung та ін. Абонентське устаткування випускається ще більшою кількістю компаній, до списку яких, крім вищенаведених, необхідно додати такі компанії як LG, Nokia, Qualcomm, Sony і т.п.

**Постановка задачі.** Імітатори радіоканалів рухомого зв'язку необхідні для системних випробувань, які багатократно повторюються при розробці та тестуванні систем в вимірвальних лабораторіях.

Натурні вимірювання систем рухомого радіозв'язку є більш дорогими і на їх проведення може знадобитися необхідний дозвіл спеціальних комісій зв'язку та інших органів регулювання. Через випадкову, неконтрольовану природу поширення радіохвиль важко забезпечити повторюваність натурних випробувань [2].

Більшості конструкторських розробок систем передують фаза концептуальної та архітектурної проробки на базі комп'ютерного моделювання та автоматизованого проектування. Отже, вивчення питань комп'ютерного моделювання широкосмугового радіоканалу рухомого цифрового зв'язку є актуальною задачею.

**Метою роботи** є дослідження якості отриманого сигналу базовою станцією в умовах релеєвського поширення радіохвиль при наявності доплерівського зсуву у каналі передачі шляхом моделювання широкосмугового радіоканалу прямого трафіка системи CDMA стандарту IS-95 за допомогою пакета математичного моделювання MATLAB/SIMULINK.

**Вирішення питання.** В CDMA канали для передачі від мобільної станції до базової станції називаються прямими (Forward). Користувальницькі дані упаковані і передаються в каналі із пропускну здатністю 1,2288 Мчп/с. Навантажувальна здатність прямого каналу – 128 телефонних з'єднань зі швидкістю трафіка 9,6 Кбіт/с. У прямому каналі базова станція передає одночасно дані для всіх користувачів, що перебувають у комірці, використовуючи для розділення каналів різні коди для кожного користувача. Також передається пілотний сигнал, він має більший рівень потужності, забезпечуючи користувачам можливість синхронізувати частоти [1].

Модель каналу прямого трафіка системи CDMA стандарту IS-95 реалізована за допомогою пакета математичного моделювання MATLAB/SIMULINK [4] наведена на рис. 1.

Розглянемо формування сигналу у каналі прямого трафіка [1,4].

Набір даних з 256 кадрів і частотою дискретизації 13,4 кГц у вигляді початкової випадкової матриці (50x268) надходить з джерела даних (Data Source) на CRC- генератор, який здійснює циклічний контроль за надмірністю переданих біт і додає їх в кінець кадру до вхідних даних при виявленні їх надмірності. Далі

сигнал надходить на блок завадостійкого кодування. Для реалізації на прийомній стороні прямої корекції помилок (без повторного запиту і передачі повідомлення) у каналі використовується згорткове кодування (англ. convolution encoding). На передавальній стороні використовується кодування з характеристиками: довжина кодового обмеження  $K = 9$ , швидкість кодування  $r = 1/2$ . Для цього цифровий потік, що поступає розбивається на пакети тривалістю по 20 мс і подається на згортковий кодер. На його виході число бітів подвоюється ( $r = 1/2$ ), і при вхідній швидкості 9,6 Кбіт/с вихідна швидкість дорівнює 19,2 Кбіт/с (384 біта в 20 мс). Далі сигнал надходить у блок блокового перемежовування символів вхідного кадру (англ. IS-95A Fwd Ch Interleaver), призначений для боротьби з пачками помилок в ефірі. Принцип перемежовування в цьому випадку наступний. Процес перемежовування бітів здійснюється в межах кожного блоку тривалістю 20 мс, який містить при швидкості передачі 19,2 Кбіт/с 384 біти. Потік даних записується у матрицю (24 рядка x 16) по рядках. Як тільки матриця заповнена, починається передача інформації – стовпців зі швидкістю запису. Отже, коли в ефірі спотворюються підряд декілька бітів інформації, при прийманні пачка помилок, пройшовши через зворотну матрицю, перетвориться в одиночні помилки. Після цього сигнал надходить у блок шифрування (захист від підслухування), на інформацію накладається маска (псевдопослідовність) довжиною 42 біта [3].

Для шифрування застосовується скремблювання (блок IS-95A Fwd Ch Scrambler) інформаційної цифрової послідовності – проводиться підсумовування по модулю 2 з іншою цифровою послідовністю, формованою за допомогою довгого коду з періодом  $2^{42} - 1$  символів при швидкості 1,2288 Мчп/с (тривалість чіпа 813,8 нс). Маска формується генератором псевдовипадкової послідовності.

Після шифрування цифровий потік перетворюється за допомогою довгого коду (коду максимальної довжини, які можуть бути отримані за допомогою регістра зсуву або елемента затримки заданої довжини) і логічної операції "виключне АБО" (додавання по модулю два). В апаратурі стандарту IS-95 довгий код формується у результаті декількох послідовних логічних операцій із псевдовипадковою двійковою послідовністю, яка генерується 42-розрядним регістром зсуву. Такий регістр зсуву застосовується у всіх базових станціях цього стандарту для забезпечення режиму синхронізації всієї мережі. Так як інформаційний потік має швидкість 19,2 Кбіт/с, то в прямому каналі з тактовою частотою 1,2288 Мчп/с використовується тільки кожний 64-й символ довгого коду.

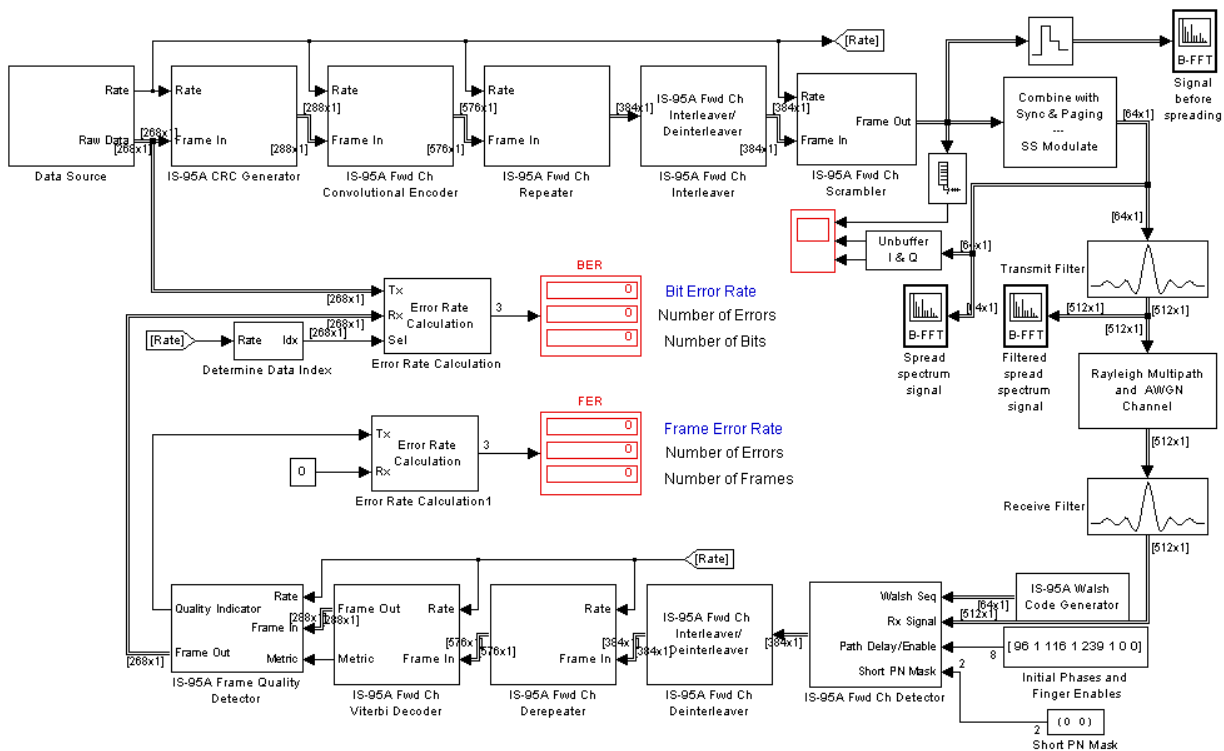


Рис. 1. Модель каналу передачі від мобільної станції до базової станції системи IS-95A

Оскільки всі користувачі одержують об'єднаний сигнал, для виділення інформації необхідно передавати опорний сигнал (по пілотному каналі). У цьому каналі передається нульовий інформаційний сигнал. Код Уолша для пілотного каналу формується з нульового ряду матриці Уолша [3]. У пілотному каналі передається потужний сигнал, що містить тільки короткий код. Зазвичай на ньому випромінюється близько 20 % загальної потужності. Опорний сигнал необхідний для наступної фазової демодуляції. Короткий код дозволяє багаторазово використовувати в кожній комірці один і той самий набір кодів Уолша. Кожна базова станція має свій часовий зсув при формуванні коду і тому може бути однозначно визначена в мережі. Засновано це на властивості псевдовипадкових двійкових кодів: значення автокореляційного моменту наближається до нуля для всіх часових зсувів більше однієї бітової довжини.

На цьому етапі кодування сигналу відбувається розширення спектра частот, тобто кожний біт інформації кодується послідовностями ПВП1 і ПВП2, побудованими за функціями Уолша і канална швидкість потоку даних (19,2 Кбіт/с) збільшується у 64 рази. Отже, у блоці модуляції сигналу швидкість маніпуляції сигналу зростає і при цьому розширюється спектр частот [3].

На заключному етапі двійковий потік розділяється між синфазним і квадратурним каналами (I- і Q-каналами) для наступної передачі з використанням квадратурної фазової маніпуляції (QPSK). Цифровий потік у кожному з каналів перетворюється за допомогою короткого коду і логічної операції "виключне АБО". Короткий код являє собою псевдовипадкову двійкову послідовність довжиною  $2^{15} = 32768$  двійкових символів, генеровану зі швидкістю 1,2288 Мчіп/с. Ця послідовність є загальною для всіх базових і рухомих станцій у мережі. Короткий код формується в 15-розрядному регістрі зсуву з лінійним зворотним зв'язком. Він формується на базі двох породжуючих поліномів:  $g(x)_I = x^{15} + x^{13} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + 1$ ;  $g(x)_Q = x^{15} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$  [1].

Блок модуляції сигналу. У стандарті CDMA використовується квадратурна фазова маніпуляція ФМ4, ВФМ4. Результуючий двійковий потік у кожному каналі проходить через цифровий фільтр (англ. Transmit Filter) із кінцевою імпульсною характеристикою, що дозволяє обмежити смугу випромінюваного сигналу. Частота зрізу фільтра становить близько 615 кГц. Отримані аналогові сигнали надходять на відповідні входи I/Q-Модулятора. Для зменшення займаної смуги частот на виході модулятора встановлюють фільтр, що формує спеціальний вид сигналу "піднятий косинус".

Далі сигнал проходить через багатопроменевий релеєвський канал зв'язку з шумом (англ. Rayleigh Multipath and AWGN channel). Під час руху мобільної станції зовнішнє радіосередовище змінюється безупинно через повільні завмирання, затінення, зовнішні завади і інші фактори.

Якість мови пов'язана із частотою появи помилок у кадрі (FER – Frame Error Rate) на прямій і зворотній лінії зв'язку. FER визначається як відношення коефіцієнта кадрів, прийнятих з помилками, до загального числа переданих. FER у значній мірі задається відношенням ( $E_b/N_0$ ), а також залежить від швидкості пересування транспортного засобу (доплерівський зсув), місцевих умов поширення радіосигналів і розподілу каналів між працюючими мобільними станціями. Цей параметр прямо характеризує якість мови в системі CDMA.

Рекомендований діапазон характеристик:

- для FER – 0,2-3 % (оптимальний рівень потужності досягається, коли FER – 1 %);
- максимальна довжина пакета помилок 3-4 кадри (оптимальне значення пакета помилок – 2).

На приймальній стороні дані (рис. 1), що пройшли через канал зв'язку та приймальний фільтр потрапляють на детектор, де виконується звуження, демодуляція, і відновлення символів вихідних даних у блоці декодера Вітербі (англ. IS-95A Fwd Ch Viterbi Decoder). У блоці деперемежувача (англ. IS-95A Fwd Ch Deinterleaver) здійснюється деперемежування символів вхідного кадру. Декодування згорткового коду здійснюється за допомогою алгоритму Вітербі (блок декодера Вітербі, англ. IS-95A Fwd Ch Viterbi Decoder). Перевірка якості кадрів (фреймів) з використанням CRC і даних біт сигналу Вітербі декодера здійснюється у блоці детектора якості кадру (англ. IS-95A Frame Quality Detector).

Таблиця 1

№ з/п	Макс. доплеровський зсув (Гц)	Швидкість руху об'єкта, км/ч	№ біта	№ помилки	Коефіцієнт помилок біт (BER)	№ кадру	№ помилки	Коефіцієнт помилок кадрів (FER)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4.63	2.5	2924	33	0.011290	17	2	0.11760
2	18.51	9.9	2924	328	0.112200	17	4	0.23530
3	37.03	19.9	2924	137	0.046850	17	4	0.23530
4	55.57	30.0	2924	88	0.030100	17	2	0.11760
5	74.06	39.9	2924	29	0.009918	17	1	0.05882
6	92.59	49.9	2924	0	0.000000	17	0	0.00000
7	111.11	59.9	2924	98	0.033520	17	2	0.11760
8	129.63	70.0	2924	35	0.011970	17	2	0.11760
9	148.15	80.0	2924	100	0.034200	17	3	0.17650
10	166.67	90.0	2924	53	0.018130	1	2	0.11760
11	185.20	100.0	2924	61	0.020860	17	3	0.17650
12	203.70	110.0	2924	38	0.013000	17	1	0.05882
13	222.23	120.0	2924	8	0.002736	17	1	0.05882
14	240.74	129.9	2924	67	0.022910	17	2	0.11760
15	259.26	140.0	2924	3	0.001026	17	1	0.05882
16	277.78	150.0	2924	16	0.005472	17	1	0.05882

У таблиці 1. наведені виконані за допомогою пакету програм імітаційного моделювання

MATLAB/SIMULINK радіоканалу системи IS-95A розрахунки коефіцієнта помилкових біт (BER) та коефіцієнта помилкових кадрів (FER), які отримуються при прийомі на базовій станції за наявності доплерівського зсуву у багатопробному релеєвському радіоканалі прямого трафіка із шумом.

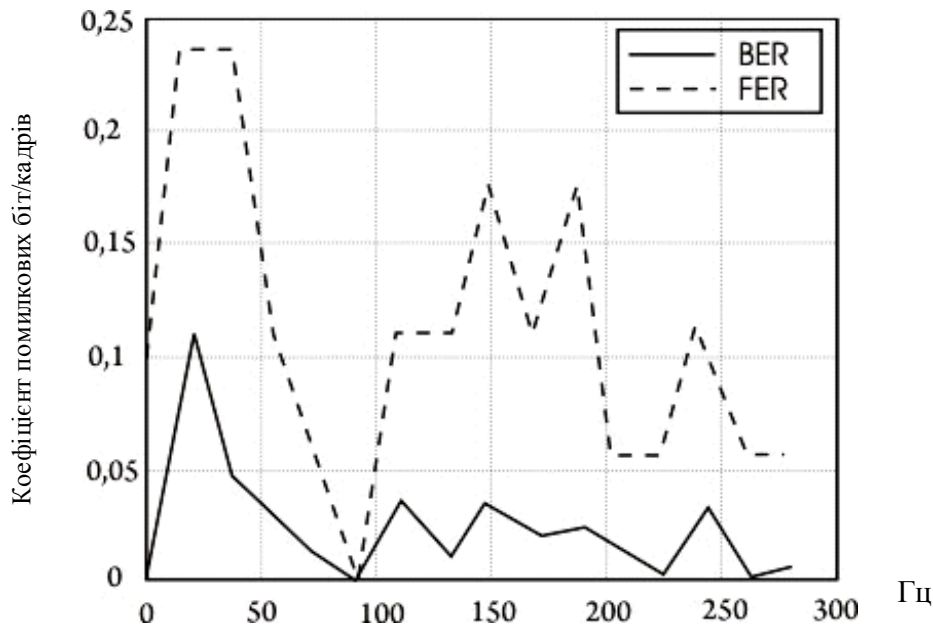


Рис. 2. Залежності коефіцієнта помилкових біт (BER) та коефіцієнта помилкових кадрів від максимального доплерівського зсуву у каналі передачі стандарту IS-95A системи CDMA

На рис. 2 наведені побудовані залежності коефіцієнта помилкових біт (BER) та коефіцієнта помилкових прийнятих кадрів від зміни доплерівського зсуву у каналі передачі IS-95A.

Висновки. Результати моделювання показали, що при передачі сигналу в каналі прямого трафіка системи CDMA стандарту IS-95 від мобільної до базової станції коефіцієнт помилкових бітових помилок (BER) при нульовому доплерівському зсуву у релеєвському каналі передачі мінімальний. Зі збільшенням доплерівського зсуву коефіцієнт помилкових бітів збільшується і досягає максимального значення 0,117 при доплерівському зсуві, який становить близько 20 Гц. При максимальному доплерівському зсуві частоти менше 20 Гц коефіцієнт помилкових біт залишається нижче, ніж 0,04. Крім того, виявлено, що максимальний коефіцієнт отриманих помилкових кадрів характерний для більш низьких частот зсуву Доплера, але спостерігається його зменшення для значень доплерівського зсуву частоти близько 100 Гц.

### Література

1. Веселовский Кшиштоф. Системы подвижной радиосвязи / Пер. с польск. И.Д. Рудинского / Под ред. А. И. Ледовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 536 с.: илл.
2. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / Под ред. В.И. Журавлёва (перевод с англ.). – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд. – М.: «Вильямс», 2003. – 1104 с. – илл.
4. CDMA Reference Blockset For Use with Simulink, 2001. – 62 с.

Надійшла до редакції  
14.3.2011 р.