

УДК 654.165(045)

В. О. Ведута

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО ЗВ'ЯЗКУ З КОДОВИМИ КАНАЛАМИ

ТОВ «Хуавей Україна», e-mail: vvalery@huawei.com

Узагальнено технічні проблеми сучасного комерційного зв'язку та наведено один з можливих шляхів їх розв'язання – оптимізацію каналоутворювальної кодової послідовності. Розглянуто кодові послідовності сучасних цифрових систем зв'язку та специфіка їх застосування у мережі.

Ключові слова: зв'язок, передача, CDMA, мережа, кодова послідовність, оптимізація.

Вступ. Натепер нараховують три покоління систем зв'язку: 1) аналогові системи; 2) цифрові системи зв'язку, що використовують технології розділення абонентів за частотою, часом та простором, а також уможливають передавання цифрових даних, що є суттєвою відмінністю від мереж першого покоління; 3) мережі 3G, представником мереж 3G можна вважати технологію CDMA Ev-DO rev.A.

Незважаючи на такий бурхливий розвиток мереж зв'язку існує досить багато проблем технічного характеру, особливо вони проявляються за великої кількості користувачів, адже у сучасному суспільстві зв'язком користуються майже всі. Тому проблеми ефективного використання спектру, інтерференції, великого рівня завад, великої завантаженості в мережі постають досить гостро.

Аналіз досліджень. Проаналізувавши послуги, що надаються операторами зв'язку, можна зробити такі висновки:

- системи зв'язку повинні забезпечувати більші швидкості передавання даних та більш ефективне використання спектру;
- різні типи передавання даних (різні послуги) потребують каналів різної якості та ширини і відповідно можуть використовувати різну ширину спектру;
- канали зв'язку мають забезпечувати доступ до ресурсів найбільшої кількості абонентів.

Відомо, що у популярних нині технологіях широко використовуються ортогональні та псевдоортогональні послідовності. Основними проблемами їх використання є втрата ортогональності при зсуві послідовності у часі та завади, які створюються сусідніми каналами (завади, що створює сусідній канал на даний).

Постановка проблеми в загальному вигляді. Мета роботи – ознайомлення із загальними технічними проблемами сучасного комерційного зв'язку та одним з можливих шляхів їх розв'язання – оптимізацією каналоутворювальної кодової послідовності. Розглянуто кодові послідовності сучасних цифрових систем зв'язку та специфіка їх застосування у мережі.

Основна частина. Розглянемо кодові послідовності, що найбільше поширені у системах цифрового зв'язку, методики їх використання, та проблеми, що виникають у реальних мережах.

Система ортогональних функцій Уолта. Систему ортогональних функцій Уолша застосовують у цифровому зв'язку, що набув великої популярності як серед операторів, так і серед користувачів – CDMA. Цей стандарт розроблено американськими військовими службами (такий зв'язок дає велику перевагу в секретності передавання даних), але виявився досить вдалим вирішенням і для комерційного використання.

У CDMA як каналоутворювальний код використали функції Уолша. Ці ортогональні кодові послідовності отримали за допомогою матриці Адамара. Для генерації матриці вищого порядку з меншого використовують рекурсію, а саме:

$$W_{2N} = \begin{bmatrix} W_N & \overline{W_N} \\ W_N & \overline{W_N} \end{bmatrix},$$

де $\overline{W_N}$ – інверсний W_N . Матриця початкових чисел має вигляд:

$$W_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Щоб отримати набір з чотирьох ортогональних функцій Уолша W_0, W_1, W_2, W_3 , необхідно згенерувати матрицю Адамара четвертого порядку:

$$W_4 = \begin{bmatrix} W_2 & \overline{W_2} \\ W_2 & \overline{W_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Чотири ортогональні послідовності у цьому кодовому наборі Уолша беруться з рядків матриці W_4 :

$$\begin{aligned} W_0 &= [1 \ 1 \ 1 \ 1]; \\ W_1 &= [1 \ -1 \ 1 \ -1]; \\ W_2 &= [1 \ 1 \ -1 \ -1]; \\ W_3 &= [1 \ -1 \ -1 \ 1]. \end{aligned}$$

Перший рядок матриці Адамара не використовують для передавання даних у CDMA. У системі цифрового зв'язку IS-95(CDMA) використовується матриця Адамара із 64 рядками, 63 з яких теоретично придатні для створення окремих каналів зв'язку.

Розглянемо механізм утворення каналів зв'язку за допомогою функцій Уолша.

Отже, наприклад, маємо такі кодові послідовності після кодування передаваних повідомлень та кодування каналу:

$$\begin{aligned} p_1 &= [1 \ -1 \ 1]; \\ p_2 &= [1 \ 1 \ -1]; \\ p_3 &= [-1 \ 1 \ 1]. \end{aligned}$$

Для кожного з повідомлень задамо кодовий канал:

$$\begin{aligned} w_1 &= [-1 \ 1 \ -1 \ 1]; \\ w_2 &= [-1 \ -1 \ 1 \ 1]; \\ w_3 &= [-1 \ 1 \ 1 \ -1]. \end{aligned}$$

Кожне повідомлення передається за допомогою визначеного коду Уолша. При цьому бітова швидкість коду Уолша зростає в чотири рази (табл.1).

Таблиця 1

$p_1(t)$	1				-1				1				
$p_1(t)$	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	
$w_1(t)$	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	
$p_1(t)w_1(t)$	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	

Для другого і третього повідомлень відповідно маємо вигляд табл.2 і 3.

Таблиця 2

$p_2(t)$	1				1				-1			
$p_2(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
$w_2(t)$	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
$p_2(t)w_2(t)$	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1

Таблиця 3

$p_3(t)$	-1				1				1			
$p_3(t)$	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
$w_3(t)$	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
$p_3(t)w_3(t)$	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1

Сигнали з розширеним спектром для всіх трьох повідомлень $p_1(t)w_1(t)$, $p_2(t)w_2(t)$, $p_3(t)w_3(t)$ об'єднуються, щоб отримати загальний сигнал $C(t)$, або

$$C(t) = p_1(t)w_1(t) + p_2(t)w_2(t) + p_3(t)w_3(t),$$

де $C(t)$ – складений сигнал, що передається в окремому радіодіапазоні (табл.4).

Таблиця 4

$C(t)$	-1	-1	-1	3	-1	-1	3	-1	-1	3	-1	-1
--------	----	----	----	---	----	----	---	----	----	---	----	----

Якщо помилки при передачі незначні, приймач розпізнає сигнал $C(t)$. Щоб виділити повідомлення $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$ із $C(t)$, приймач перемножує $C(t)$ на заданий код для кожного повідомлення (табл.5):

Таблиця 5

$C_1(t)w_1(t)$	1	-1	1	3	1	-1	-3	-1	1	3	1	-1
$C_2(t)w_2(t)$	1	1	-1	3	1	1	3	-1	1	-3	-1	-1
$C_3(t)w_3(t)$	1	-1	-1	-3	1	-1	3	1	1	3	-1	1

Після цього приймач додає значення по кожному з бітових періодів. Отримаємо функції $M_1(t)$, $M_2(t)$, $M_3(t)$ (табл.6).

Таблиця 6

$C_1(t)w_1(t)$	1	-1	1	3	1	-1	-3	-1	1	3	1	-1
$M_1(t)$	4				-4				4			
$C_2(t)w_2(t)$	1	1	-1	3	1	1	3	-1	1	-3	-1	-1
$M_2(t)$	4				4				-4			
$C_3(t)w_3(t)$	1	-1	-1	-3	1	-1	3	1	1	3	-1	1
$M_3(t)$	-4				4				4			

Використовуючи таку умову:

$$\tilde{p}(t) = 1, \text{ якщо } M(t) > 1;$$

$$\tilde{p}(t) = 0, \text{ якщо } M(t) < 1,$$

маємо:

$$\tilde{p}_1(t) = [1 \quad -1 \quad 1];$$

$$\tilde{p}_2(t) = [1 \quad 1 \quad -1];$$

$$\tilde{p}_3(t) = [-1 \quad 1 \quad 1].$$

Видно, що $\tilde{p}_1(t) = p_1(t)$, $\tilde{p}_2(t) = p_2(t)$, $\tilde{p}_3(t) = p_3(t)$, тобто початковий сигнал було декодовано з комплексного сигналу.

Слід врахувати, що в реальних умовах передавання даних за рахунок затримок у каналі та завад канали, сформовані за Уолшем, можуть втрачати ортогональність. Це фактично означає втрату можливості приймання сигналу, або значне зменшення швидкості передавання даних. Для її вирішення CDMA використовує синхронізацію із супутниковою системою GPS. Таке рішення досить дороге і не універсальне. І, навіть, незважаючи на такий підхід, реальна кількість абонентів, що можуть одночасно працювати в одному секторі базової станції, використовуючи один частотний діапазон, становить лише 30, проти 63 – теоретично можливих.

Кодова послідовність PN. У системах зв'язку CDMA для передавання цифрових даних у зворотному напрямку (від мобільного абонента до базової станції) використовують коди PN. Річ у тім, що для використання кодів Уолша потрібна синхронізація для усунення часового зсуву. Базові станції та контролер базових станцій як джерело синхронізації використовують GPS (а більш точно – атомний годинник супутника). Технічно реалізувати синхронізацію мобільних абонентів досить складно – передачу вони починають у різні моменти часу, до того ж переміщуються у просторі, отже, зв'язок у зворотному напрямі – асинхронний, а для розділення абонентів між собою використовують код PN.

PN код являє собою широківідому m -послідовність. Сформуванати такий код можна, використавши регістр зсуву зі зворотним зв'язком (рис. 1).

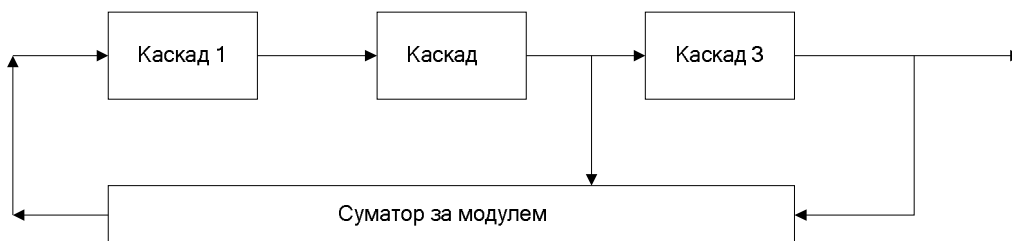


Рис. 1. Регістр зсуву для генерації кодів PN

Розглянемо механізм формування PN – двійкові біти зсуваються каскадами регістра. Вихід останнього та передостаннього каскадів об'єднують і через суматор за модулем два з'єднують з входом першого каскада. Регістр має певний початковий стан, збережений в його каскадах. Із надходженням тактових імпульсів у регістр біти переміщуються через каскади. Таким чином, регістр продовжує генерувати вихідні біти та подавати їх на свій перший каскад.

Вихідні біти останнього каскада і формують код PN. Якщо початковий стан регістра $[1, 0, 1]$, тоді після проходження бітів через регістр отримаємо кодову послідовність, наведену в табл. 7.

З табл. 7 видно, що при сьомому зсуві стан регістра повторюється, і далі зсув бітів дає аналогічну послідовність кодів. Таким чином, ефективна довжина періодичного коду PN дорівнює сім. Отже, вихід регістра формує код PN:

$$p = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0].$$

Таблиця 7

Зсув	Вихід	Вихід	Вихід	Вихід
	Каскад 1	Каскад 2	Каскад 3	Регістр
0	1	0	1	1
1	1	1	0	0
2	1	1	1	1
3	0	1	1	1
4	0	0	1	1
5	1	0	0	0
6	0	1	0	0
7	1	0	1	1

Код, утворений таким чином, – це код максимальної довжини L :

$$L = 2^N - 1,$$

де N – кількість каскадів або порядок регістра. В наведеному прикладі $N=3$, а отже, довжина коду дорівнює 7. Слід зазначити, що структура PN коду визначається логікою зворотного зв'язку та початковим станом регістра. Якщо, наприклад, початковий стан буде $[0 \ 0 \ 0]$, тоді регістр генерував би тільки нулі, та код не був би кодом максимальної довжини. Кодовий набір може бути отриманий шляхом зсуву послідовності p :

$$p_0 = [1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1];$$

$$p_1 = [-1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1];$$

$$p_2 = [-1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1];$$

$$p_3 = [1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1];$$

$$p_4 = [1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1];$$

$$p_5 = [1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ -1];$$

$$p_6 = [-1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1].$$

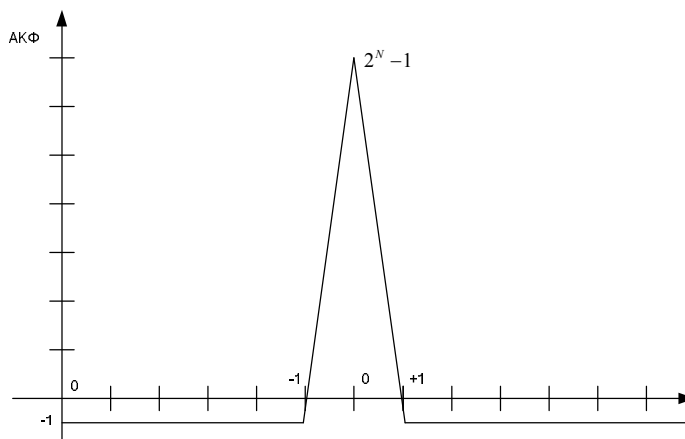
Для каналоутворення код PN використовується аналогічно з кодом Уолша. Спочатку отримують розширений сигнал для кожного з повідомлень, потім комплексний сигнал, який випромінюється в ефір. На приймальному боці з комплексного сигналу виділяють окремі складові, а після цього пороговий пристрій відновлює початкові повідомлення.

M -послідовність – скорочення від *maximum length sequence* – послідовність максимальної довжини. У системі цифрового зв'язку CDMA для того, щоб отримати m -послідовність, використовують генератор Галіа. Він дозволяє отримувати набір послідовностей, кожна з яких містить у собі послідовність довжиною $2^N - 1$ та маску. M -послідовності з різними масками матимуть різні фази.

Застосовують m -послідовності двох типів – m -послідовність довжиною $2^{15} - 1$ (короткий код) та довжиною $2^{42} - 1$ (довгий код).

У прямому каналі зв'язку для скремблювання використовується m -послідовність довжиною $2^{42} - 1$, у той же час послідовність довжиною $2^{15} - 1$ використовується для квадратурної модуляції прямого каналу. Різні сектори CDMA мережі використовують m -послідовність, але з фазовим зсувом мінімум 64 біт. Ця величина пов'язана з впливом одного каналу на інший і не може бути зменшений без значного впливу на якість зв'язку. Отже, можливо 512 PN каналів(фаз PN послідовності).

У зворотному каналі для прямого розширення спектру використовується m -послідовність довжиною $2^{42} - 1$ (рис. 2).

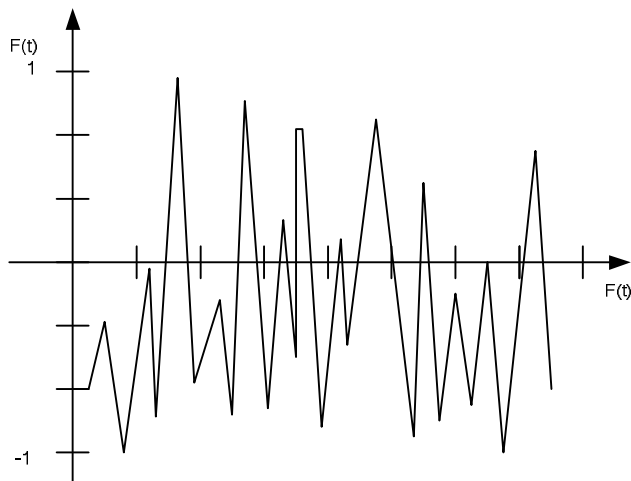
Рис. 2. Автокореляційна функція m -послідовності

M -послідовності використовують у системах зв'язку в основному завдяки їх функції автокореляції. Автокореляція m -послідовності дорівнює -1 для будь якого фазового зсуву τ , окрім періоду $[-1; +1]$, де значення автокореляції лінійно зростає від -1 до $2^N - 1$, де $2^N - 1$ довжина послідовності.

Очевидно, що зі збільшенням довжини m -послідовності графік автокореляційної функції (АКФ) буде крутішим, а послідовність – наближатися до псевдовипадкового шуму.

Інші коди мають АКФ, що лише наближається до АКФ m -послідовностей, ця властивість дуже важлива для використання кодів у системах цифрового зв'язку.

На жаль, кроскореляційна функція послідовності набагато гірша за автокореляційну, для системи цифрового зв'язку це означає, що для використання користувачами мережі вузького частотного діапазону слід досить чітко обирати послідовності з найкращою автокореляцією (рис. 3).

Рис. 3. Кроскореляційна функція m -послідовності

На практиці застосовують планування кодів PN – присвоєння конкретного коду, сектору базової станції мережі. Таке планування є досить складним завданням і потребує роботи досить високооплачуваних спеціалістів протягом тривалого часу. Слід також зазначити, що саме погана кроскореляція m -послідовностей є однією з основних причин обмеження кількості абонентів на сектор у системі цифрового зв'язку CDMA.

Для забезпечення якісного зв'язку PN-послідовності мають відокремлюватися одна від одної мінімум на 64 чипи:

$$\begin{aligned} 1 \text{ чип} &= 3 \times 10^8 / 1.2288 \text{ М} = 244,14 \text{ (м)}; \\ 64 \text{ чипи} &= 64 \times 244,14 = 15,6 \text{ (км)}. \end{aligned}$$

Але в реальній мережі, що планується для комерційного використання, навіть такої відстані недостатньо, тому під час планування застосовують методики, що дозволяють отримувати результат, який відповідає реальним можливостям системи.

Кодові послідовності UMTS(WCDMA) мережі. Абрівеатура WCDMA походить від WidebandCDMA, тобто CDMA з розширеним спектром. У UMTS ширина смуги сигналу становить 5 МГц або більше. Таке значення обрано за таких умов:

- 1) така ширина смуги частот дозволяє передавати дані зі швидкостями 144 кбіт/с, 384 кбіт/с або навіть 2 Мбіт/с за хороших умов;
- 2) більш широкий діапазон стійкіший до інтерференції, отже, буде покращено якість зв'язку;
- 3) частотний ресурс обмежено, тому потрібно обирати найменш можливу для певної технології смугу частот.

Процедура розширення спектра в UTRAN (радіочастина мережі UMTS) складається з двох операцій: каналоутворення та скремблювання. Для каналоутворення використовують ортогональні коди, а для скремблювання – псевдовипадкові послідовності PN. Каналоутворення виконується до скремблювання в обох напрямках передавання – прямому та зворотному.

Під час каналоутворення кожен символ, що передається, трансформується у певну кількість чипів. Відношення кількості чипів до символу – коефіцієнт розширення спектру. I та Q частини символів, що передаються, змішуються з каналоутворювальним кодом. Коди каналоутворення в UMTS – ортогональні, для збереження ортогональності використовують синхронізацію. Передача від абонента до базової станції, як і в CDMA, – асинхронна, а ортогональні коди розділяють абонентів між собою при передаванні від базової станції до мобільної та різні сервіси одного абонента у каналі.

Скремблювальний код у мережі UMTS використовують PN код, аналогічний як PN CDMA. PN послідовностей в UMTS дві: короткий код $2^{18} - 1$ та довгий код $2^{41} - 1$. Як PN послідовності WCDMA використовує код Голда; в його основу покладено m -послідовність. Механізм застосування PN також подібний до CDMA. Принцип формування коду Голда UMTS показано на рис. 4:

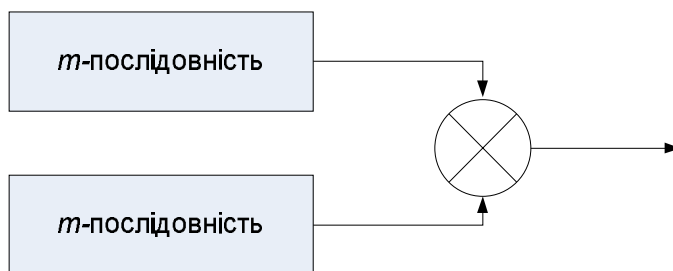


Рис. 4. Генератор «коду Голда»

Дві m -послідовності надходять на вхід суматора, на виході якого отримуємо код Голда. Якщо початкові фази вихідних m -послідовностей будуть змінюватися, то на виході суматора отримаємо набір кодів Голда.

Уперше код Голда був описаний в 1967 р. ученим Р. Голдом. (R. Gold).

Голд описав метод отримання PN послідовності з двох поліномів, що мала такі властивості:

- 1) коди Голда мають обмежену та визначену крос-кореляцію;
- 2) крос-кореляція коду Голда значно краща від крос-кореляції вихідної m -послідовності;
- 3) коди Голда дають можливість отримувати більше кодових послідовностей, ніж можна створити з однієї m -послідовності.

Каналоутворювальний ортогональний код задається у вигляді кодового дерева, причому для передавання даних можна використовувати код різної довжини залежно від потреби в даний момент. Це реалізується шляхом вибору відповідної гілки кодового дерева. Слід зазначити, що існує деяке обмеження на застосування частин кодового дерева для отримання кодів нижчого порядку. Новий канал може використовувати частини кодового дерева нижчого порядку тільки тоді, коли вони не зайняті каналом, який займає кодові послідовності з частин дерева вищого порядку. Тобто новий канал повинен використовувати кодові послідовності з іншої гілки кодового дерева. Каналоутворювальний ортогональний код WCDMA називають OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor) Такий підхід підвищує ефективність використання частотного ресурсу, адже із зміною довжини коду змінюється коефіцієнт розширення спектру. Порівняно висока ефективність використання спектру є однією з основних переваг технології WCDMA.

Структуру кодового дерева, що застосовується у UMTS, показано на рис. 5. За його допомогою можна отримати коди з коефіцієнтом розширення спектру від 1 до 16.

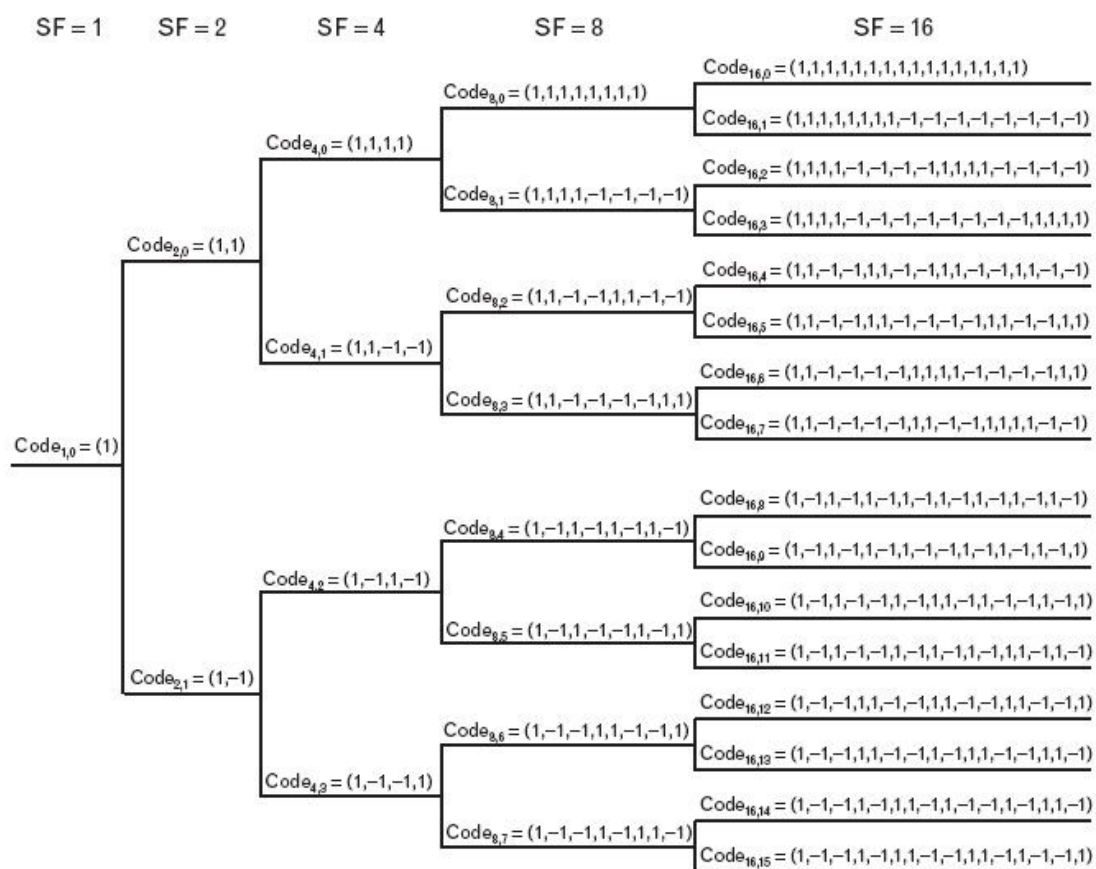


Рис. 5. Кодове дерево, що застосовується у WCDMA технології

Вибір того чи іншого коду з дерева у зворотному каналі зв'язку здійснюється контролером базових станцій RNC. Для передавання даних у прямому напрямку використовуються гілки кодового дерева із скремблювальним кодом, що дає змогу не керувати процесом надання кодової послідовності абоненту і використовувати кодове дерево та скремблювальний код мобільним абонентам чи базовим станціям повністю незалежно один від одного.

Більш ефективні кодові послідовності та розширена смуга частот дозволяють теоретично вести передачу у зоні обслуговування однієї базової станції для 128 абонентів одночасно, але реальна кількість абонентів у зоні обслуговування однієї базової станції, що можуть користуватися послугами зв'язку з певною якістю, не перевищує 50 (!).

Як мережа CDMA, так і мережа WCDMA потребують досить складної процедури радіопланування, але планування кодів значно простіше від частотного планування у мережах GSM.

Для передавання сигналу у прямому напрямку використовується кодова скремблювальна послідовність довжиною від 0 до $2^{24}-1$. Кодові слова генеруються та надаються абонентам за допомогою контролера базових станцій автоматично, тому планувати скремблювальний код для прямого каналу немає потреби.

Скремблювальні коди зворотного каналу мають довжину $2^{18}-1$. Але щоб прискорити процедуру скремблювання, використовують тільки 8192 коди. Ці 8192 коди розподілено на 512 груп, кожна з яких містить у собі 16 скремблювальних кодів. Перший код з групи називається основним кодом (PSC), інші 15 кодів – вторинними кодами скремблювання (SSC).

512 PSC кодів також розбито на 64 групи, кожна з яких у свою чергу має 8 PSC. Планування в зворотному каналі використовують для того, щоб ідентичні коди PSC не були сусідніми (не використовувалися сусідніми секторами базових станцій) у мережі.

У мережі кожен абонент має власний канал передавання даних. Окремий скремблювальний код має відповідне кодове дерево. Кожен користувач може використовувати код стільника PSC для скремблювання, але якщо кількість абонентів у стільнику перевищить деяку критичну кількість, користувач може використати SSC-код для скремблювання та продовжити передавання даних.

Слід зазначити, що єдиної і ефективної методики планування скремблювальних кодів немає, тобто різні методики можуть мати різну ефективність залежно від конкретних випадків. Отже, для радіопланування велике значення мають кваліфікація та досвід персоналу, що виконує ці роботи, навіть незважаючи на високий ступінь автоматизації цього процесу (використання спеціального програмного забезпечення).

Висновки. Оптимізація методу використання існуючого коду систем цифрового зв'язку або використання нового коду відкриває широкі можливості для вдосконалення сучасних чи побудови нових мереж. Оскільки каналоутворювальний код впливає майже на всі ключові параметри радіочастини мережі (швидкість передавання даних (завадостійкість), дальність зв'язку, кількість абонентів на сектор, ширину смуги частот, що використовується), то вдосконалення лише його дозволяє поліпшити мережу в цілому.

Вивчення та розв'язання цієї проблеми є перспективним, важливим і актуальним напрямом досліджень.

Список літератури

1. *Yang Samuel C.* CDMA RF system Engineering. – Boston.: Artech House inc, 1998. – 280 p.
2. *Juha K.* Introduction to 3G mobile communications. – Boston.: Artech House inc, 2003. – 549 p.

В. А. Ведуга

Оптимизация систем цифровой связи с кодовыми каналами

Обобщены технические проблемы современных коммерческих систем связи и приведен один из способов их решения – оптимизацию каналообразующих кодовых последовательностей. Рассмотрены кодовые последовательности современных систем связи и специфика их использования в сетях.

V. A. Veduta

Code division RF system optimization.

Article acquaints readers with the common technical problems of modern commercial communication systems and one of the ways of their solutions - optimization channelizing code sequences. We consider the code sequence of modern communication systems and the specifics of their use in networks.