

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ CDMA ОТНОСИТЕЛЬНО ИНТЕНСИВНОСТИ БИТОВОГО ПОТОКА

Рассматривается эволюция систем сотовой связи. Анализируются переходные этапы развития от поколения к поколению. Описывается метод кодового разделения независимых каналов связи, а также рост битового потока при использовании CDMA. Вычисляется коэффициент избыточности битового потока.

Введение

Современный мир пользователей (сотовой связи, интернета и т.д.) нуждается в более высокой скорости обмена данными и увеличении количества одновременно обслуживаемых пользователей в общем канале связи [3].

В этом направлении технологии развиваются уже несколько десятилетий [2]. Увеличение скорости обмена данными происходит за счет:

- 1) расширения количества используемых параметров;
- 2) частоты (первое поколение) [3];
- 3) частоты, интервалов времени (второе поколение) [3];
- 4) частоты, интервалов времени, кода Уолша - энергетический параметр сигнала (третье поколение) [1], [3];
- 5) привязки точки приема и точки излучения к конкретным координатам на одной плоскости (система MIMO - Multiple Input Multiple Output) [3];
- 6) увеличения спектральной ширины сигналов обмена данными [1];
- 7) организации каналов связи на более высокой частоте (свыше 10 МГц) [1].

Увеличение количества одновременно обслуживаемых абонентов в общем эфире и параллельно во времени осуществляется за счет:

- дробления обслуживаемой территории на более мелкие ячейки в целях уменьшения возможного количества пользователей в зонах повышенной интенсивности применения трафика [3];
- использования ортогональных последовательностей (коды Уолша) [1];
- применение ортогональных частот (позволяет эффективно использовать частотный диапазон канала связи) [1].

Цель работы – проанализировать существующие методы передачи данных, выявить и исследовать недостатки существующих систем, рассчитать коэффициент битовой избыточности.

Актуальность данной работы заключается в анализе двух основных проблем:

- скорость передачи данных;
- индивидуальная анонимность информационного сообщения.

1. Анализ эволюции систем сотовой связи

История развития связи имеет огромное количество гениальных идей усовершенствования и конструктивных решений. Первым методом разделения нескольких абонентов в общем эфире было частотное разделение доступа (FDM) Frequency - Division Multiplexing, что позволило в одно время без препятствий организовать работу больше одного канала связи. В связи с повышением количества любителей воспользоваться данными изобретения частотного разрешенного пространства стало недостаточно. Тогда было разработано и реализовано временное распределение доступа (TDM) Time Division Multiplexing, что позволило эффективнее использовать частотно-временной ресурс. Количество абонентов продолжало увеличиваться, и следствием стала разработка кодового распределения доступа (CDMA) Code Division Multiple Access, которая позволила говорить уже о частотно-временном-энергетическом распределении каналов связи. CDMA технология в разы увеличила количество абонентов и улучшила качество связи.

CDMA основан на использовании ансамбля 64-х ортогональных кодов Уолша, которые в свою очередь кодируют 1024 ортогональных поднесущих модуляции (OFDM) Orthogonal frequency-division multiplexing. Несколько поднесущих и их результат OFDM – сигнала можно посмотреть на рис.1.

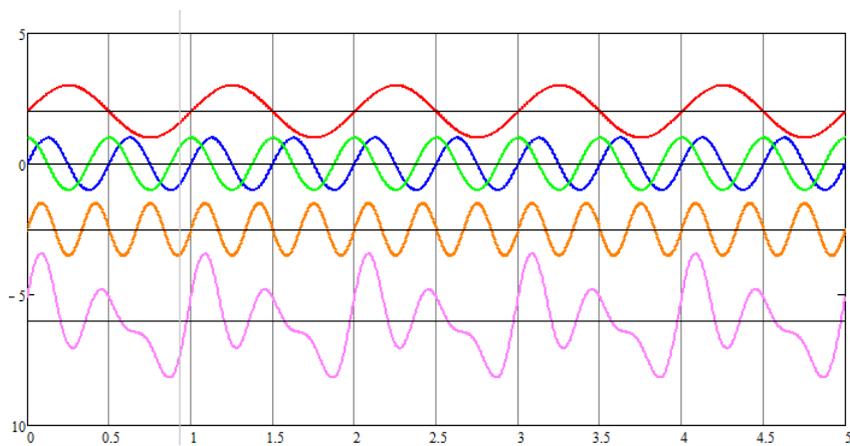


Рис. 1. Совокупность поднесущих сигналов и их результат сложения при формировании OFDM - сигнала

Эта конструкция позволяет в компактном спектре частот параллельно во времени организовать несколько каналов связи без взаимных препятствий.

2. Свойства кодового разделения доступа, расчет избыточности битового потока

Для организации CDMA используют коды Уолша, обладающие свойствами полной ортогональности, что позволяет без взаимных помех организовать несколько независимых каналов связи для разных абонентов на единственной частоте параллельно во времени. Количество каналов связи прямо пропорционально зависит от длины кодовой последовательности.

Увеличение количества возможных независимых каналов связи на единственной частоте приводит к увеличению длины кодирующей последовательности Уолша, которая в свою очередь уменьшает скорость передачи информации по каналу связи. Зависимость скорости трафика от количества независимых каналов достаточно простая и имеет вид:

$$R_{\text{реал}} = \frac{R_{\text{факт}}}{N_{\text{кан}}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{факт}}$ – фактическая (максимальная) скорость канала связи без использования распределения информационного пространства между разными абонентами; $N_{\text{кан}}$ – количество организованных независимых каналов связи на единственной несущей частоте параллельно во времени.

Использование всех независимых каналов не обязательно. В случае необходимости возможно увеличивать или уменьшать количество абонентов в общем эфире.

Рассматривая частичную нагрузку абонентами единого пространства передачи данных с ортогональным разграничением, наблюдаем зависимость помехоустойчивости системы от количества абонентов. Помехоустойчивость системы эквивалентна отношению:

$$E_{\text{сист}} \approx \frac{(N_{\text{max}})^2}{N_{\text{real}}}, \quad (2)$$

где N_{max} – максимально возможное количество независимых каналов связи; N_{real} – реальное количество абонентов, которые использует данный канал одновременно.

Коды Уолша строятся несколькими методами [1].

Метод Радемахера превращает синусоиду согласно алгоритму:

$$r_n(x) = \begin{cases} +1, & \text{если } \sin(n \cdot x) > 0; \\ -1, & \text{если } \sin(n \cdot x) < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Полученная последовательность имеет вид рис. 2.

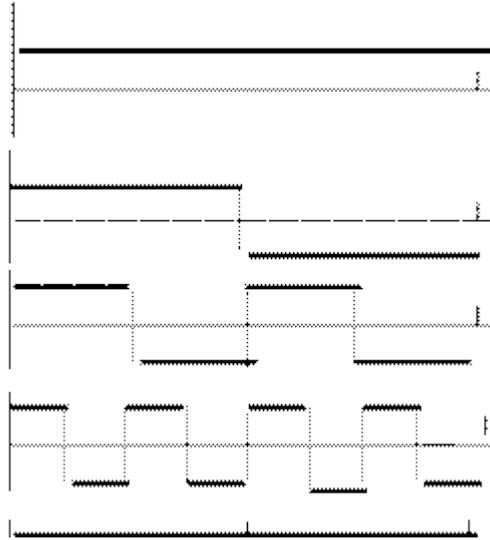


Рис. 2. Ансамбль функций Уолша, полученных методом Радемахера

Для получения функций Уолша из системы функций Радемахера используют преобразование:

$$\text{wal}(w, : \Theta) = \prod_{k=1}^n [r_k(\Theta)]^{w_{n-k+1} \oplus w_{n-k}}, \quad (4)$$

где r_k – функция Радемахера; k – номер соответствующей функции; $\text{wal}(w, : \Theta)$ – функции Уолша на основе функций Радемахера; w – порядок соответствующей функции Уолша.

Для получения функций Уолша, упорядоченных по Пели, используют преобразование:

$$\text{pal}(p, : \Theta) = \prod_{k=1}^n [r_k(\Theta)]^{p_{n-k+1}}. \quad (5)$$

Метод Адамара применяет матрицу Адамара для формирования последовательности:

$$H_2 = \begin{vmatrix} H_1 & H_1 \\ H_1 & -H_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix}, \quad (6)$$

$$H_4 = \begin{vmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & -H_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Если детально рассмотреть приведенные выше методы формирования ортогональных кодовых последовательностей, то оказывается, что состав ансамблей одинаков и отличается лишь упорядочением. Наглядная совокупность этих кодов показана на рис. 3.

Набор ортогональных функций упорядочен по w (порядковый номер функции Уолша), далее поставлен в соответствие p (номер функций Уолша, упорядоченных по Пели), h (номер функции Уолша, сформированной на базе матриц Адамара).

Ортогональные коды хоть и обладают высочайшими свойствами помехоустойчивости, но также они чрезмерно нагружают канал связи избыточностью.

Поскольку формирование ортогональных кодов для всех систем одинаково и отличается лишь порядком следования при одинаковой форме сигнала, то для расшифровки достаточно использовать простой метод перебора. Если учесть, что этот перебор состоит из 64 взаимоисключающих вариантов, то нужный код будет найден моментально. Данный анализ показывает, что ортогональные коды не обладают криптостойкостью.

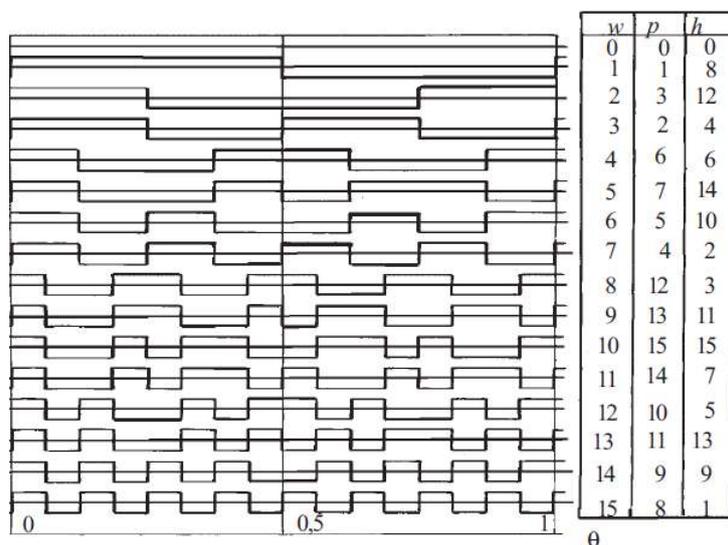


Рис. 3. Ансамбль функций Уолша и их нумерация по Пели и Адамару

3. Описание и наглядный пример формирования ортогональных кодов

Битовый поток в вычислительных системах существует в виде последовательности положительных или отрицательных напряжений, 0 соответствует напряжению условное: -1, а 1 условное: +1 (табл.1).

Информационная последовательность In_N^q , где q – номер абонента (кода Уолша), $N = n \cdot 1, 1 = 64$ – длина кодовой последовательности Уолша, перемножается на ортогональный код Уолша $wal(q)_n$ длина которого помещается на интервале следования информационного бита:

$$S_n^q = In_N^q \cdot wal(q)_n. \quad (8)$$

Результатом является ортогональное сообщение: S_n^q (8). Далее совокупность ортогональных сообщений попадает в общий канал, где побитно суммируется. Сумма общего потока Sm_n передается в эфир:

$$Sm_n = \sum_{q=0}^{q_{\max}} S_n^q. \quad (9)$$

На приемной стороне (табл. 2,3) для извлечения своей информации из общего суммарного потока каждый абонент использует свою ортогональную, кодовую последовательность Уолша (соответствующую кодовой последовательности на передающей стороне) для извлечения информационного сообщения, адресованного ему лично.

Таблица 1

Ортогональное разделение																		
$q = 1$																		
In_N^1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0
$\text{wal}(1)_n$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S_n^1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
$q = 2$																		
In_N^2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$\text{wal}(2)_n$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S_n^2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
$q = 3$																		
In_N^3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\text{wal}(3)_n$	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
S_n^3	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
$q = 4$																		
In_N^4	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
$\text{wal}(4)_n$	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
S_n^4	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1
Сложение нескольких каналов в один поток																		
S_n^1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
S_n^2	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
S_n^3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
S_n^4	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1
S_{m_n}	-2	-2	2	-2	-2	-2	2	-2	2	-2	2	-2	2	-2	2	-2	0	0

Таблица 2

Приемный канал первого абонента (изъятие информации из общего ортогонально сложенного потока данных)																													
S_{m_n}	-2	-4	2	0	-1	-2	-2	2	-2	-4	2	0	-2	0	-2	4	0	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0	4
$\text{wal}(1)_n$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S_{1n}^1	-2	-4	2	0	-2	-2	-2	2	-2	-2	2	0	-2	2	2	2	0	0	-4	0	0	0	0	4	0	0	0	4	0
S_{2n}^1	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
In_N^1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 3

Приемный канал второго абонента (изъятие информации из общего ортогонально сложенного потока данных)																																				
Sm _n	-2	-2	2	-2	-2	-2	-2	2	2	2	-2	-2	2	2	2	0	0	-4	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4	0	0	4	0	0	0	4	
wal(2) _n	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1				
S1 _n ²	-2	-2	-2	2	-2	-2	2	-2	-2	2	-2	-2	2	-2	0	2	-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4
S2 _n ²			-4			-4			-4			-4			-4			4			-4			-4			-4			-4			-4			
In _N ²			-1			-1			-1			1			1			1			1			1			1			1			1			
			0			0			0			0			0			1			0			0			0			0			0			

Для этого необходимо перемножить побитно весь поток на свою кодовую последовательность:

$$S1_n^q = Sm_n \cdot wal(q)_n \cdot \quad (10)$$

Далее берется сумма всех результатов в пределах длины последовательности Уолша:

$$S2_N^q = \sum_{n=1}^1 S1_n^q, \quad (11)$$

после чего восстанавливается информационное (цифровое) сообщение:

$$In_N^q = \frac{S2_N^q}{1}. \quad (12)$$

4. Расчет избыточности битового потока в CDMA

Цифровая информация In_N^q перед передачей в эфир проходит несколько этапов обработки, увеличивая свою избыточность W на выходе Sm_n [1]:

– 1 бит информации сверхточным кодированием преобразовывается в 2 бита (повышение помехоустойчивости); $In_N^q \cdot 2$;

– перемежение (равномерное распределение информации по всему временному интервалу - для борьбы с «замиранием») $In_N^q \cdot 2 \cdot 1$;

– скремблирование (позволяет защитить канал связи от несанкционированного доступа) $In_N^q \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1$;

– преобразование ортогональным кодом Уолша порядка $l = 64$ (позволяет организовать 64 независимых канала связи в совместной среде распространения) $In_N^q \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$;

– сложение ансамбля кодовых сообщений $\sum_{q=1}^{q_{\max}} In_N^q \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$;

– далее следует манипуляция аналогового сигнала по закону цифрового ряда сформированной кодовой последовательности на основе функции Уолша (понятие бита исчезает);

Зная алгоритм преобразований в CDMA, рассчитаем битовую избыточность для максимально возможного количества абонентов $q = 64$:

$$W = \frac{\sum_{q=1}^{q_{\max}} In_N^q \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1}{In_N^q} = \frac{64 \cdot (In_N^q \cdot 2 \cdot 64)}{In_N^q} = 8192. \quad (13)$$

Рассчитанная битовая избыточность в современных системах связи имеет довольно большое значение.

Заключение

Анализ современных систем связи показал:

1. Современная система CDMA имеет избыточность 8192 бита на выходе к 1 биту информации, что приводит к чрезмерной загруженности канала связи и снижению скорости обмена данными. В свою очередь, такой факт является неблагоприятным и требует решения для обеспечения потребностей абонентов по увеличению скорости обмена данными.

2. Отсутствует криптостойкость ортогонально кодированных сообщений и неспособность обеспечения необходимого уровня конфиденциальности. Данное обстоятельство выходит за рамки требований международного права о сохранении личной информации и противоречит тенденции растущих запросов безопасности и конфиденциальности обмена данными среди потребителей.

3. Ограничение количества независимых каналов связи с общим ресурсом в связи со свойством ортогонального кода: для увеличения независимых каналов связи необходимо увеличивать длину ортогональной последовательности. Из формулы (13) видно, что избыточность будет возрастать по квадратному закону.

Список литературы: 1. *Никитин Г.И.* Применение функций Уолша в сотовых системах связи с кодовым разделением каналов // Редакционно-издательский отдел электронных публикаций и библиографии библиотеки. Отдел оперативной полиграфии СПбГУАП 190000, Санкт-Петербург. 2. *Аверин В.Г.* Компьютерные сети и телекоммуникации. Курс лекций. Федеральное государственное образовательное учреждение среднего профессионального образования «Уральский радиотехнический техникум им. А.С. Попова», Екатеринбург 2009. 3. *Дязитдинов Р.Р.* Системы подвижной связи. Конспект лекций. Самара: ФГОБУ ВПО ПГУТИ, 2013.

Поступила в редколлегию 11.12.2015

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: кодирование и защита информации для передачи в телекоммуникационных системах. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79. E-mail: barannik_v_v@mail.ru

Окладной Дмитрий Евгеньевич, начальник группы (авиационного прицельно - навигационного комплекса) учебно-лабораторного комплекса кафедры бортового оборудования и комплексов воздушной разведки инженерно - авиационного факультета Харьковского университета Воздушных Сил. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79, E-mail: barannik_v_v@mail.ru

Супрун Олег Валерьевич, соискатель кафедры Информационно-сетевой инженерии ХНУРЭ. Научные интересы: кодирование и защита информации для передачи в телекоммуникационных системах. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14.