

Нахождение оптимальных параметров для схемы приема и передачи данных в IDMA-системах

М. П. Бакулина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия

Исследуется задача отыскания некоторых параметров для рассмотренной П. Гойером и Х. Шонехом оптимальной схемы приема и передачи данных в IDMA-системах, т. е. системах множественного доступа с чередующимся разделением каналов – новой технологии, возникшей на основе метода CDMA. В частности, получены формулы для нахождения константы и значений мощностей, зависящие лишь от известных значений отношения сигнал/шум и числа слоев.

Ключевые слова: IDMA-системы, множественный доступ, одноуровневый приемник, пропускная способность канала, приемник с погашением интерференции.

In this paper, we investigate a problem of determination of certain parameters of an optimal scheme of data transmission in Interleave Division Multiple Access systems (IDMA-systems), earlier considered by P. A. Hoeher and H. Schoeneich. IDMA may be considered as a special Code Division Multiple Access scheme. We have obtained formulas for finding a constant and values of power, which are dependent only on known signal/noise ratio and the number of layers.

Key words: IDMA systems, multiple access, single-layer receiver, channel capacity, interference cancellation receiver

Введение. При проектировании систем общего пользования важнейшим требованием является обеспечение связью всех абонентов без взаимных помех. Физическим носителем информации в системах подвижной связи (СПС) является радиосигнал. Все пользователи создают в точке приема сложный единый электромагнитный процесс. Разработчики СПС должны определить, по какому критерию будет выделяться из суммарного радиосигнала информация от того или иного пользователя. В связи с этим выделяют три наиболее распространенных метода разделения сигналов.

FDMA (Frequency Division Multiple Access – множественный доступ с разделением каналов по частоте) – способ использования радиочастот, при котором в одном частотном диапазоне находится только один абонент, причем различные абоненты используют разные частоты в пределах соты. Поэтому, пока начальный запрос не закончен, канал закрыт для других сеансов связи. FDMA использовался в первом поколении аналоговой связи.

TDMA (Time Division Multiple Access – множественный доступ с разделением по времени) – способ использования радиочастот, при котором в одном частотном интервале находится несколько абонентов, причем различные абоненты используют для передачи разные временные интервалы. Таким образом, каждому пользователю TDMA предоставляет полный доступ к интервалу частоты в течение короткого периода времени. Наиболее известной СПС с временным разделением каналов является европейская система GSM, в которой на одну несущую приходится от 8 до 16 цифровых каналов.

CDMA (Code Division Multiple Access) – множественный доступ с кодовым разделением (уплотнением) каналов. При таком способе разделения среды каналы создаются присвоением каждому пользователю отдельного числового кода, который распространяется по всей ширине полосы. Временное разделение отсутствует, все абоненты постоянно используют всю ширину канала. Полоса частот одного канала очень широка, вещания абонентов накладываются друг на друга но, поскольку их коды различаются, они могут быть разделены.

Принципы кодового разделения каналов связи CDMA основаны на использовании широкополосных сигналов, полоса которых значительно превышает полосу частот, необходимую для обычной передачи сообщений, например в системах FDMA. По сравнению с FDMA и TDMA технология CDMA обеспечивает существенное увеличение емкости сети и в настоящее время является основной платформой для мобильных систем третьего поколения. На сегодняшний день определены пять международных стандартов подвижной связи третьего поколения, при этом три стандарта из пяти базируются на технологии Direct Sequence CDMA

(DS-CDMA [1]). Данная технология является разновидностью CDMA и используется для расширения частотного спектра. В DS-CDMA передаваемые для каждого абонента информационные символы расширяются соответствующим псевдослучайным широкополосным сигналом.

В системах DS-CDMA основная технология передачи при кодовом уплотнении каналов на примере линии "вниз", т. е. от базовой станции к абонентской, заключается в следующем:

- 1) N информационным потокам, предназначенным для N абонентов, присваивается своя кодовая псевдослучайная последовательность (ПСП);
- 2) кодовые последовательности имеют малую взаимную корреляцию;
- 3) бинарные информационные потоки модулируются собственной ПСП;
- 4) каналные широкополосные сигналы складываются в суммирующем устройстве;
- 5) производится модуляция несущей результирующим сложным широкополосным сигналом и излучение радиосигнала в пространство.

При этом на приемной стороне в абонентской станции:

- 1) известна "своя" кодовая последовательность;
- 2) осуществляется перенос сигнала с радиочастоты в область низких частот;
- 3) низкочастотный импульсный сигнал поступает на вход коррелятора, на второй вход которого синхронно поступает кодирующая ПСП; коррелятор вычисляет взаимокорреляционную функцию двух сигналов, т. е. выделяет сигнал из результирующего потока;
- 4) отклик на выходе коррелятора происходит только тогда, когда в уплотненном сложном сигнале присутствует "своя" ПСП, в противном случае на выходе наблюдается только шум.

Заметим, что существуют и другие методы кодового разделения каналов, например FH CDMA, PPH CDMA, однако в данной работе использование кодового разделения рассматривается на примере DS CDMA как наиболее близкой к IDMA технологии.

Несмотря на преимущества и широкое распространение технологии CDMA, на практике возможности CDMA-систем существенно ограничены интерференцией передаваемых сигналов. Поэтому в последнее время возрос интерес к новому методу, построенному на основе DS-CDMA-схемы и предложенному Л. Пингом [2, 3]. Данный метод получил название IDMA (Interleave Division Multiple Access) – схема множественного доступа с чередующимся разделением каналов. Метод IDMA позволяет повысить пропускную способность беспроводных систем связи. Основное отличие данного метода от DS-CDMA состоит в том, что для разделения пользователей в CDMA используются ортогональные последовательности, в IDMA – различные устройства-интерливеры. Эти устройства перемешивают данные в случайном порядке, а в приемнике их исходная последовательность восстанавливается. На рис. 1 приведена общая схема передачи сигнала с использованием методов DS-CDMA и IDMA. (Распределитель (англ.: spreader) – устройство, выполняющее операцию формирования излучаемого сигнала.)

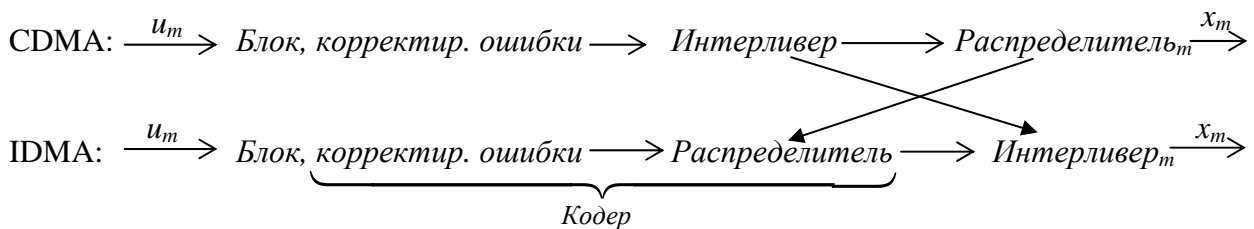


Рис. 1. Схема передачи сигнала с использованием методов DS-CDMA и IDMA

В работе [4] показано, что на практике технология IDMA превосходит DS-CDMA. Заметим, что метод, аналогичный IDMA, представлен также в работах П. Френжера и др. [5] (под названием code-spread CDMA) и Дж. Проакиса и др. [6] (под названием chip-interleaved CDMA). Среди современных работ, посвященных теоретическому и практическому использованию IDMA-систем, отметим работы П. А. Гойера и др. (см., например, [7, 8]).

В работе [7] предложена оптимальная (с точки зрения общей скорости) схема передачи данных в системах множественного доступа IDMA. В частности, рассмотрены две модели передающего устройства (приемника), которые могут быть использованы в IDMA-системах, вычислены пропускные способности каналов и обоснована целесообразность использования выбранной модели в IDMA.

В настоящей работе на основе результатов, полученных в [7], ставится задача отыскания оптимальных параметров рассматриваемой схемы приема и передачи данных в IDMA-системах. В частности, получены формулы для нахождения рассмотренной в [7] константы и значений мощностей, зависящие лишь от известных значений отношения сигнал - шум и числа слоев.

1. Модель системы множественного доступа. Рассмотрим обобщенную модель системы множественного доступа, представляющую собой канал множественного доступа с n входными последовательностями [9] (рис. 2). Заметим, что IDMA является частным случаем данной обобщенной модели.

В данной модели рассматривается суперпозиция n кодовых последовательностей длины k (называемых также “слоями” или “кодowymi словами”). Слои могут принадлежать различным пользователям (множественный доступ) или являться различными входными последовательностями одного пользователя (мультиплексирование). В дальнейшем для простоты не будем делать различие между множественным доступом и мультиплексированием, а также ограничимся рассмотрением каналов без памяти.

Каждый m -й слой, показанный на рис. 2, представляет собой последовательность $x_m = (x_m^1, x_m^2, \dots, x_m^k)$ длины k , где $1 \leq m \leq n$,

$$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_m^i)^2 \leq P_m,$$

P_m – среднее значение мощности. Последовательность $z = (z_1, z_2, \dots, z_k)$ длины k представляет собой белый гауссов шум мощности N . На выходе последовательность $y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$ длины k определим следующим образом:

$$y = \sum_{m=1}^n x_m \oplus z$$

($x_m^i \in R, y_i \in R, z_i \in R$ для всех i и m ; знак " \oplus " обозначает сложение по модулю 2).

Пусть s_m - длина (в битах) m -го входного слова $u_m = (u_m^1, u_m^2, \dots, u_m^{s_m})$, где $u_m^i \in \{0, 1\}, 1 \leq m \leq n$. Скорость передачи в канале определим как величину

$$T_m = \frac{s_m}{k}.$$

Тогда общая скорость передачи T и суммарная мощность P равны

$$T = \sum_{m=1}^n T_m, P = \sum_{m=1}^n P_m. \quad (1)$$

Заметим, что в IDMA у всех пользователей одна и та же скорость передачи, так как используется один и тот же кодер. Не ограничивая общности, будем считать, что суммарная мощность P и мощность шума N (а значит, и отношение сигнал – шум P/N) – константы.

Обозначим через $C(P/N)$ пропускную способность одноуровневого канала [10]. В случае равномерно распределенных кодовых символов $x_m^i \in \{-\sqrt{P_m}, \sqrt{P_m}\}$ пропускная способность канала $C(P/N)$ выражается формулой

$$C(P/N) = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} e^{-\frac{(y-\sqrt{P})^2}{2N}} \log_2(1 + e^{-\frac{2\sqrt{P}y}{N}}) dy.$$

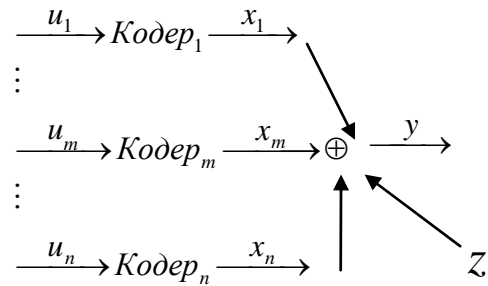


Рис. 2. Модель канала множественного доступа

Известно, что пропускная способность каналов множественного доступа зависит от типа приемного устройства [11]. Как и в работе [7], рассмотрим две модели приемника: одноуровневый приемник и приемник с погашением интерференции. Изучив функциональные возможности данных моделей, можно сделать вывод о преимуществе использования приемника определенного вида для IDMA-систем.

2. Одноуровневый приемник и приемник с погашением интерференции. Сначала рассмотрим модель одноуровневого приемника. В данной модели сигнал поступает от одного пользователя, сигналы от остальных пользователей рассматриваются как помехи.

В случае если число пользователей n велико, то согласно центральной предельной теореме интерференция имеет гауссово распределение, и пропускная способность канала C_m для m -го уровня может аппроксимироваться величиной

$$C_m = C \left(\frac{P_m}{N + \sum_{i=1, i \neq m}^n P_i} \right).$$

Вследствие симметричности канала среднее значение мощности должно быть одинаковым для всех пользователей, т. е. $P_m = P/n$. При $P/N \rightarrow \infty$ пропускная способность $C_m = C \left(\frac{1}{n-1} \right)$, общая скорость передачи $T \leq n C \left(\frac{1}{n-1} \right)$.

В табл. 1 приведены полученные в результате моделирования значения пропускной способности канала множественного доступа $C_{1\text{-уровн пр}}$ (в битах на входной символ в канале) с n слоями и одноуровневым приемником. В первом столбце даны значения для отношения сигнал – шум P/N , а в последнем столбце приведены результаты для пропускной способности канала с гауссовым входом $C_{\text{гаус вх}}$.

В табл. 1 видно, что значения пропускной способности канала с одноуровневым приемником существенно отличаются от значений пропускной способности канала с гауссовым входом, причем с увеличением n это различие увеличивается. Следовательно, модель одноуровневого приемника является нецелесообразной для применения в системах множественного доступа с чередующимся разделением каналов IDMA.

Рассмотрим теперь другую модель приемного устройства, представляющую собой приемник с погашением интерференции, и исследуем пропускную способность канала множественного доступа с этим типом приемника. Известно, что в случае успешного погашения интерференции можно достичь оптимальной пропускной способности канала [1]. Без ограничения общности будем полагать, что $P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_n$. Кроме того, будем считать, что интерференция имеет гауссово распределение, а мощность шума намного больше мощности интерференции.

Таблица 1

Пропускная способность канала множественного доступа с одноуровневым приемником и канала с гауссовым входом

P/N , дБ	$C_{1\text{-уровн пр}}$ (бит/вх. симв.)			$C_{\text{гаус вх}}$ (бит/вх. симв.)
	$n=1$	$n=10$	$n=100$	
5	0,83	0,54	0,49	1,12
10	1,0	0,66	0,63	1,71
15	1,0	0,72	0,70	2,56
20	1,0	0,76	0,74	3,29
25	1,0	0,76	0,74	4,25
30	1,0	0,76	0,74	4,98

В приемнике с погашением интерференции первым обнаруживается слой, обладающий наибольшей мощностью. Если скорость передачи для первого слоя T_1 удовлетворяет неравенству

$$T_1 \leq C \left(\frac{P_1}{N + \sum_{i=2}^n P_i} \right),$$

то этот слой может быть легко декодирован. Имея первый слой, можно декодировать второй слой и т. д. При этом скорость передачи для m -го слоя T_m ($1 \leq m \leq n-1$) должна удовлетворять неравенству

$$T_m \leq C \left(\frac{P_m}{N + \sum_{i=m+1}^n P_i} \right),$$

для последнего слоя имеем $T_n \leq C (P_n / N)$.

Для того чтобы оптимизировать суммарную скорость передачи в данной модели, необходимо оптимизировать n полученных мощностей P_m ($1 \leq m \leq n$), задаваемых формулой (1) и условием $P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_n$. Таким образом, задача оптимизации общей скорости передачи в канале сводится к следующей задаче:

$$\sum_{m=1}^n C \left(\frac{P_m}{N + \sum_{i=m+1}^n P_i} \right) \longrightarrow \max \quad (2)$$

в n -мерном пространстве (P_1, P_2, \dots, P_m) . Решение задачи (2) будем искать при следующем предположении:

$$T_1 = T_2 = \dots = T_n = T / n,$$

т. е. во всех слоях кодер имеет одну и ту же скорость передачи. Заметим, что это предположение выполняется и в IDMA-системах, где для всех слоев используется одно и то же кодирующее устройство. Тогда для всех $1 \leq m \leq n-1$ выполняется равенство

$$C \left(\frac{P_m}{N + \sum_{i=m+1}^n P_i} \right) = C \left(\frac{P_n}{N} \right)$$

и, следовательно,

$$\frac{P_1 / N}{1 + \sum_{i=2}^n P_i / N} = \dots = \frac{P_m / N}{1 + \sum_{i=m+1}^n (P_i / N)} = \dots = \frac{P_{n-1} / N}{1 + P_n / N} = \frac{P_n}{N} = K. \quad (3)$$

Полученное равенство позволяет находить оптимальные значения мощностей для всех слоев: зная самую слабую мощность P_n и мощность шума N , из (3) рекуррентно определим по возрастанию остальные мощности.

В табл. 2 приведены полученные в результате моделирования значения пропускной способности канала множественного доступа $C_{\text{погаш интерф}}$ с n слоями и приемником с погашением интерференции.

Таблица 2

Пропускная способность канала множественного доступа с приемником, погашающим интерференцию, и канала с гауссовым входом

P/N , дБ	$C_{\text{погаш интерф}}$ (бит/вх. символ)						$C_{\text{гаус вх}}$ (бит/вх. символ)
	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$	
5	0,75	1,10	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
10	1,00	1,56	1,68	1,69	1,71	1,71	1,71
15	1,00	1,78	2,23	2,48	2,53	2,56	2,56
20	1,00	2,00	2,71	3,11	3,17	3,2	3,29
25	1,00	2,00	2,84	3,65	3,95	4,13	4,25
30	1,00	2,00	3,00	4,24	4,45	4,71	4,98

В табл. 2 видно, что с увеличением числа слоев n значения пропускной способности канала $C_{\text{погаш интерф}}$ приближаются к значениям $C_{\text{гаус вх}}$. Следовательно, данный тип приемника целесообразно использовать в системах множественного доступа с чередующимся разделением каналов IDMA.

3. Нахождение оптимальных параметров для схемы приема и передачи данных в IDMA-системах. Исследуем некоторые полученные в п. 2 параметры рассмотренной оптимальной схемы приемника. В частности, из равенства (3) можно получить еще одно выражение для константы K , зависящее лишь от числа слоев n и отношения сигнал – шум.

Для этой цели обозначим через $f_m (m = 1, \dots, n)$ отношение мощности m -го пользователя к суммарной мощности, т. е. $f_m = P_m / P$, где P определяется формулой (1). Тогда из выражения (3) имеем

$$K = \frac{P_m}{N + \sum_{i=m+1}^n P_i} = \frac{P_m}{N + \left(\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^m P_i \right)} = \frac{P_m / P}{N / P + 1 - \sum_{i=1}^m (P_i / P)} = \frac{f_m}{N / P + \left(1 - \sum_{i=1}^m f_i \right)}. \quad (4)$$

Кроме того, из (3) следует

$$P_m = \frac{N + \sum_{i=m+1}^n P_i}{N + \sum_{i=m}^n P_i} P_{m-1},$$

откуда с учетом (4) получаем

$$f_m = \frac{f_{m-1}}{1 + K} = \frac{f_1}{(1 + K)^{m-1}}. \quad (5)$$

В частности, для последнего слоя имеем

$$f_n = \frac{f_1}{(1 + K)^{n-1}}. \quad (6)$$

Так как $\sum_{m=1}^n f_m = \sum_{m=1}^n (P_m / P) = 1$, то из соотношения (5) находим

$$1 = \sum_{m=1}^n f_m = \sum_{m=1}^n \frac{f_1}{(1 + K)^{m-1}} = f_1 \frac{\left(\frac{1}{1 + K} \right)^n - 1}{\frac{1}{1 + K} - 1} = f_1 \frac{(1 + K)^n - 1}{K (1 + K)^{n-1}},$$

откуда следует

$$f_1 = \frac{K (1 + K)^{n-1}}{(1 + K)^n - 1}. \quad (7)$$

Тогда из выражений (6), (7) получаем

$$f_n = \frac{1}{(1 + K)^{n-1}} \frac{K (1 + K)^{n-1}}{(1 + K)^n - 1} = \frac{K}{(1 + K)^n - 1}. \quad (8)$$

Для последнего слоя из (4) имеем

$$f_n = \frac{K N}{P}. \quad (9)$$

Сравнивая (8), (9), получаем

$$\frac{N}{P} = \frac{1}{(1 + K)^n - 1},$$

откуда находим окончательное выражение для K :

$$K = \sqrt[n]{\frac{P}{N} + 1} - 1. \quad (10)$$

Из соотношений (6), (9) можно также получить выражение для мощности произвольного m -го слоя P_m ($m = 1, \dots, n$). Действительно,

$$P_1 = f_1 P = f_n (1 + K)^{n-1} = \frac{K N (1 + K)^{n-1}}{P}. \quad (11)$$

Тогда с учетом (5) из (11) получаем, что для $\forall m = 1, \dots, n$ справедлива формула

$$P_m = f_m P = \frac{f_1 P}{(1 + K)^{m-1}} = K \frac{N}{P} (1 + K)^{n-m}. \quad (12)$$

С использованием выражений (10), (12) можно вычислять значение константы K и значения мощностей P_m , зная лишь общее число слоев и отношение сигнал – шум.

Список литературы

1. VITERBY A. J. CDMA: Principles of spread spectrum communication. Addison-Wesley Wireless Communication Series, 1995.
2. PING L., LIU L., WU K. Y., LEUNG W. K. A unified approach to multiuser detection and space-time coding with low complexity and nearly optimal performance // Proc. of the 40th Allerton conf. on communication, control and computing, Monticelli (USA), Oct., 2002.
3. PING L. Interleave-division multiple access and chip-by-chip iterative multi-user detection // IEEE Commun. Magazine. 2005. V. 43, N 6. P. S19-S23.
4. KUSUME K., BAUCH G. CDMA and IDMA: iterative multiuser detection for near-far asynchronous communications // Proc. of the IEEE Intern. symp. personal indoor and mobile radio commun. (PIMRC'05), Berlin (Germany), Sept., 2005.
5. FRENGER P., ORTEN P., OTTOSSON T. Code-spread CDMA using maximum free distance low-rate convolutional codes // IEEE Trans. Commun. 2000. V. 48, N 1. P. 135-144.
6. МАНАДЕВАППА R., ПРОАКИС J. G. Mitigating multiple access interference and intersymbol interference in uncoded CDMA systems with chip-level interleaving // Trans. Wireless Commun. 2002. V. 1, N 4. P. 781-792.
7. HOEHER P. A., SCHOENEICH H. Interleave-division multiple access from a multiuser theory point of view // Proc. of the Intern. symp. on turbo codes and related topics in conjunction with Intern. ITG conf. on source and channel coding, Munich (Germany), Apr., 2006.
8. HOEHER P. A., SCHMEINK K. Multi-layer interleave-division multiple access for joint communication and localization // Proc. of the 7th Intern. ITG conf. on source and channel coding (SCC 2008), Ulm (Germany), Jan., 2008.
9. RIMOLDI B., URBANKE R. A rate splitting approach to the Gaussian multiple-access channel // IEEE Trans. Inform. Theory. 1996. V. 42, N 3. P. 364-375.
10. ШЕННОН К. Е. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
11. CAIRE G., MÜLLER R. R., TANAKA T. Iterative multiuser joint decoding: optimal power allocation and low-complexity implementation // IEEE Trans. Inform. Theory. 2004. V. 50, N 9. P. 1950-1973.
12. COVER T. M. Elements of information theory / T. M. Cover, J. A. Thomas. N. Y.: John Wiley and Sons, 1991.

*Марина Павловна Бакулина – канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.
Ин-та вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
e-mail: marina@rav.sgcc.ru*