

УДК 621.391

#### DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-73-82

# МНОЖЕСТВЕННЫЙ ДОСТУП В БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ И ЧАСТОТНОГО ПЕРЕМЕЖЕНИЯ

#### Ф. А. Таубин

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Множественный доступ на основе кодового разделения (СДМА) рассматривается в настоящее время одна из перспективных технологий, позволяющих существенно повысить эффективность функционирования современных и перспективных сетей связи. В системах с кодовым разделением пользователи могут совместно использовать выделенный пространственно-частотно-временной ресурс для одновременной передачи собственного трафика. Для обеспечения разделения на приемной стороне индивидуальных пользовательских потоков, каждый пользователь снабжается своим кодовым признаком, встраиваемым в передаваемый данным пользователем широкополосный сигнал, спектр которого занимает, как правило, всю отведенную полосу частот. При использовании в качестве передающей среды беспроводных каналов в сантиметровом и/или миллиметровом диапазонах такие факторы, как замирания, многолучевость и допплеровское рассеяние могут заметно ухудшить помехоустойчивость системы с кодовым разделением. Стандартным решением в этой ситуации является комбинирование кодового разделения с технологией ОFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением), известное как multicarrier CDMA (MC-СДМА). Для обеспечения эффективного функционирования систем множественного доступа в условиях перенасыщения предложено множество новых подходов, базирующихся на использовании неортогонального множественного доступа (NOMA). В данной работе рассмотрен вариант множественного доступа с неортогональным кодированием, который близок по направленности к множественному доступу с разреженным кодированием (SCMA). Предложенная процедура доступа базируется на разбиении выделенного частотно-временного ресурса на кластеры сравнительно небольшого размера и совместном использовании каждого кластера своей группой пользователей, снабженной неортогональным кластерным кодом с возможностью варьирования величины коэффициента загрузки. Для предложенного класса кластерных кодов изложена общая схема кодирования и декодирования. Приведены примеры конкретных кодовых конструкций и численные результаты, позволяющие получить ряд параметров обменного соотношения между увеличением коэффициента загрузки в системе и дополнительными энергетическими затратами.

Ключевые слова: множественный доступ, кодовое разделение, беспроводные каналы, частотное перемежение, перегруженная система, неортогональное кодирование, кластерный код, коэффициент загрузки.

#### Для цитирования:

Таубин Ф. А. Множественный доступ в беспроводных каналах с использованием неортогонального кодирования и частотного перемежения // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №4(34), ISSN 2007-5687. — СПб.:  $\Gamma$ УАП., 2022 — c.73—82. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-73-82.

# MULTIPLE ACCESS IN WIRELESS CHANNELS USING NONORTHOGONAL CODING AND FREQUENCY INTERLEAVING

#### F. A. Taubin

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Code division multiple access (CDMA) is currently considered as one of the promising technologies that can significantly improve the efficiency of modern and future communication networks. In code division multiple access systems, users can share a dedicated space-frequency-time resource to simultaneously transmit their own traffic. To ensure the separation of individual user streams on the receiving side, each user is provided with his own code sequence embedded in the broadband signal transmitted by this user, the spectrum of which, as a rule, occupies the entire allocated frequency band. When centimeter-and- millimeter wave wireless channels are used as the transmission medium, such factors as fading, multipath, and Doppler scatter can significantly degrade the performance of a code division multiple access system. The standard solution in this situation is to combine code division multiple access with OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) technology, known as multicarrier CDMA (MC-CDMA). To ensure the acceptable level of performance of multiple access systems under oversaturated conditions, many novel approaches based on the use of non-orthogonal multiple access (NOMA) have been proposed. The paper considers a variant of multiple access with non-orthogonal coding that is close in approach to sparse coding multiple access (SCMA). The proposed access procedure is based on dividing the allocated time-frequency resource into relatively small clusters and sharing each cluster with its own group of users, equipped with a non-orthogonal cluster code with the ability to change the loading factor. For the



proposed class of cluster codes, a general encoding and decoding scheme is presented. Examples of specific cluster code constructions and numerical results are given that allow one to get a number of the parameters for tradeoffs between an increase of the loading factor in the system and additional energy loss.

Keywords: multiple access, code division, wireless channels, interleaving in the frequency domain, oversaturated system, nonorthogonal coding, cluster code, loading factor.

#### For citation:

Taubin F. A. Multiple access in wireless channels using nonorthogonal coding and frequency interleaving // System analysis and logistics.: №4(34), ISSN 2007–5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2022 –p. 73–82. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-73-82.

#### Ввеление

Множественный доступ на основе кодового разделения (СDMA) рассматривается в настоящее время как одна из перспективных технологий, позволяющих существенно эффективность функционирования современных и перспективных сетей связи [1, 2, 3]. В системах с кодовым разделением пользователи могут совместно использовать выделенный пространственно-частотно-временной ресурс для одновременной передачи своих битовых потоков. Для обеспечения разделения на приемной стороне индивидуальных пользовательских потоков, каждый пользователь снабжается своим кодовым признаком, встраиваемым в передаваемый данным пользователем широкополосный сигнал, спектр которого занимает, как правило, всю отведенную полосу частот. При использовании в качестве передающей среды беспроводных каналов в сантиметровом и/или миллиметровом диапазонах такие факторы, как замирания, многолучевость и допплеровское рассеяние могут заметно ухудшить помехоустойчивость системы с кодовым разделением. Стандартным решением в этой ситуации является комбинирование кодового разделения с технологией OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением), известное как multicarrier CDMA (MC-CDMA) [4,5]. Введение технологии OFDM позволяет существенно снизить влияние многолучевости и допплеровского рассеяния, а также заметно ослабить влияние замираний благодаря использованию частотного разнесения.

В традиционных системах с кодовым разделением в качестве совокупности кодовых признаков пользователей выбирают множество ортогональных последовательностей (например, строки матрицы Адамара). Очевидно, что максимальное допустимое число превосходит используемых пользователей при ЭТОМ не длины ортогональных последовательностей (коэффициента расширения). Систему с числом пользователей, совпадающим с коэффициентом расширения, называют полностью загруженной, и до недавнего времени такой сценарий рассматривался как основной. Вместе с тем, по многим экспертным оценкам, взрывной рост подключений к новым сетям беспроводной связи 5G, неравномерное и внезапное увеличение потребности в трафике нисходящего канала связи службами просмотра веб-страниц будут приводить к перегрузке системы множественного доступа. В этой связи стратегии организации множественного доступа в условиях пульсирующего перенасыщения будут играть важную роль в перспективных системах беспроводной связи вследствие постоянно возрастающих требований к гибкости и адаптивности системы.

Для обеспечения эффективного функционирования систем множественного доступа в условиях перенасыщения было предложено множество новых подходов, базирующихся на использовании неортогонального множественного доступа (NOMA). При неортогональном множественном доступе несколько пользователей совместно используют один и тот же пространственно-частотно-временной ресурс, который при ортогональном доступе использовался лишь одним пользователем. К наиболее перспективным методам множественного доступа для сетей пятого поколения (5G) относят множественный доступ с разделением по мощности PD-NOMA, множественный доступ с чередованием и разделением IDMA и множественный доступ с разреженным кодированием SCMA [6,7].

В данной работе рассматривается метод множественного доступа с неортогональным



кодированием, который близок по направленности к SCMA. Несколько пользователей, использующих один и тот же частотно-временной ресурс, снабжаются такими индивидуальными кодами, которые в совокупности позволяют эффективно разделить принятый сигнал на индивидуальные составляющие, соответствующие каждому пользователю. Приводятся описание предложенных методов кодирования и декодирования, примеры кодов и некоторые численные результаты.

# Перемежение в частотной области

В типичных беспроводных каналах с многолучевым распространением сигнала, поднесущие OFDM сигнала оказываются сильно коррелированными, что приводит к существенному снижению эффективности частотного разнесения. Стандартный подход в этом контексте включает использование перемежения в частотной области. Пусть OFDM сигнал состоит из N поднесущих  $f_1, f_2, \ldots, f_N$ , которые расположены с интервалом  $\Delta f$   $\Gamma$ ц друг от друга в полосе  $\mathit{W}$ . Величина интервала  $\Delta \mathit{f}$  полагается равной  $1/\mathit{T_s}$  , где  $\mathit{T_s}$  представляет собой длительность OFDM сигнала. Очевидно, исходный канал можно рассматривать как совокупность из N подканалов, причем каждый подканал является узкополосным с частотно неселективными замираниями. Будем полагать, что замирания в подканалах являются релеевскими. В типичных широкополосных беспроводных каналах с замираниями и многолучевостью коэффициент корреляции соседними  $\rho_f$ между (подканалами), как правило, определяется соотношением [4]:

$$\rho_f = \frac{1}{1 + (2\pi(\Delta f \cdot \tau_m))^2},\tag{1}$$

где  $\tau_m$  есть среднеквадратичное значение величины времени рассеяния в канале (rms delay spread); обычно среднеквадратичное значение величины времени рассеяния  $\tau_m$  составляет примерно 0.3 от величины  $T_m$  - максимального времени рассеяния (maximum delay spread). Из (1) видно, что для исключения корреляции между замираниями на соседних поднесущих должно выполняться следующее условие:

$$\Delta f \cdot \tau_m \ge 1. \tag{2}$$

Условие (2) в реальных каналах, как правило, не выполняется, что приводит к появлению корреляции между подканалами. Разобьем совокупность всех подканалов на M групп таким образом, что h-я группа содержит подканалы, соответствующие частотам  $f_h, f_{h+M}, \ldots, f_{h+(J-1)M}$ , где J = N/M. Величина взаимного разделения M определяется как

$$M \approx W_c / \Delta f = W_c T_s, \tag{3}$$

где  $W_c$  представляет собой ширину полосы когерентности канала (coherence bandwidth of the channel). В первом приближении, ширина полосы когерентности канала  $W_c$  связана со среднеквадратичным значением величины времени рассеяния  $\tau_m$  следующим соотношением:  $W_c \approx 1/\tau_c$ , так что  $M \approx T_s/\tau_c$ . Очевидно, такое разбиение N подканалов на M групп представляет собой введение перемежения в частотной области, обеспечивающего практически отсутствие корреляции между всеми J подканалами внутри каждой из M групп. В табл.1 приведены параметры типичного беспроводного канала локальной сети внутри/вне здания (indoor/outdoor channel) и OFDM сигналов, используемых для передачи [8].

Таблица 1 - Параметры типичного беспроводного канала локальной сети

	Indoor	Outdoor
Полоса частот W	20 МГц	20 МГц
Несущая частота	5 ГГц	5 ГГц
Максимальная скорость	3 км/ч	200 км/ч
Максимальное время рассеяния $T_m$	800 нс	5 нс
Полоса когерентности $W_c$	4.76 МГц	760 КГц
Максимальное допплеровское рассеяние $f_{\scriptscriptstyle D}$	15 Гц	1 КГц
Интервал временной когерентности	16.7 мс	250 мкс
Длительность OFDM сигнала $T$	26.4 мкс	32 мкс
Количество поднесущих N	512	512
Интервал между поднесущими $\Delta f$	39063 Гц	39063 Гц

При организации перемежения в частотной области для таких каналов получаем, что для канала внутри здания M=128 и J=4, а для канала вне здания M=32 и J=16.

## Модель передачи

Пусть К - число пользователей в рассматриваемой системе множественного доступа в беспроводной канал. Будем полагать, что для использования перемежения в частотной области все пользователи разбиты на M групп, содержащих по L=K/M пользователей. Другими словами, рассматриваемая система есть совокупность из M параллельных независимых подсистем, где M определяется соотношением (3), в каждой из которых Lпользователей. Двоичная информационная последовательность  $\mathbf{a}^{(l)}$ l-го пользователя, порождаемая со скоростью  $1/\mathit{T}_b$  бит/с, кодируется внешним двоичным кодом со скоростью  $R_{out}$  (для упрощения обозначений индекс, указывающий номер каждой из M групп, здесь и далее опущен). Кодовая последовательность  $\mathbf{c}^{(l)}$  l-го пользователя, полученная на выходе внешнего кодера, кодируется внутренним блоковым кодом  $U^{(l)}$  над комплексным алфавитом A. Будем полагать, что длина внутреннего кода равна m, причем m|J, его скорость  $R_{in}=k/m$ бит на символ (из алфавита A), а количество q различных внутренних кодов составляет L/(J/m), т.е.  $U^{(l)} = U^{(t)}$ ,  $t = (l-1) \bmod q + 1$ . Полученное на i-м временном интервале множество кодовых слов L пользователей  $\{u_i^{(1)},u_i^{(2)},...,u_i^{(L)}\}$ ,  $u_i^{(l)}=\left(u_{i1}^{(l)},...,u_{im}^{(l)}\right)$ , разделяется на J/m кластеров (подмножеств) таким образом, что каждый кластер содержит q = L/(J/m) кодовых слов (по одному от каждого из L/(J/m) пользователей в данном кластере). Будем полагать, что в каждом кластере используются идентичные наборы внутренних кодов -  $(U^{(1)}, U^{(2)}, ..., U^{(q)})$ . Кодовые слова пользователей, попавших в общий кластер, суммируются, образуя слова кластерного кода множественного доступа (кластерный код можно рассматривать как multiuser code)  $\Omega = U^{(1)} \oplus U^{(2)} \oplus \cdots \oplus U^{(q)}$ . Величина  $\rho = qR_{in}$  представляет собой суммарную скорость qпользователей, приходящуюся на одну поднесущую, и называется коэффициентом загрузки.

Полученные в результате суммирования на i-м этапе слова всех J/m кластеров объединяются с использованием матрицы Адамара H размера  $J \times J$  в передаваемый на i-м временном интервале по J подканалам данной группы сигнальный вектор  $s_i$ ,  $s_i = (s_{i1}, \ldots, s_{iJ})$ , имеющий следующий вид:

$$s_{i} = \sqrt{\frac{k R_{out} E_{b}}{J \lambda}} \sum_{l=1}^{J/m} \sum_{z=1}^{m} \sum_{t=1}^{q} u_{iz}^{((l-1)q+t)} h_{(l-1)m+z} , \qquad (4)$$



где  $E_b$  - энергия, затрачиваемая на передачу одного бита, параметр  $\lambda$  определяется как

$$\lambda = \frac{1}{q} \frac{\overline{\sum_{z=1}^{m} |v_z|^2}}{\sum_{z=1}^{m} |v_z|^2} \; , \quad v_z = \sum_{t=1}^{q} u_z^{(t)} \quad \text{обозначает} \quad z\text{-} \breve{\mathbf{u}} \quad \text{символ} \quad \text{кодового} \quad \text{слова} \quad v = \left(v_1, \dots, v_m\right) \quad \text{кода}$$

Полученные на i-м временном интервале J-мерные сигнальные векторы  $s_i$  для каждой из M групп, объединяются (посредством конкатенации) в общий N-мерный вектор. Затем полученный вектор подвергается обратному быстрому преобразованию Фурье (IFFT), результатом которого является передаваемый по каналу на i-м временном интервале OFDM сигнал, имеющий длительность  $T_s = k\,R_{out}T_b$ . Очевидно, что каждый OFDM сигнал «переносит»  $LM\,k\,R_{out} = KmR_{in}R_{out}$  бит, поэтому энергия  $E_s$  сформированного указанным образом OFDM сигнала связана с величиной  $E_b$  соотношением  $E_s = KmR_{in}R_{out}E_b$ .

Отметим, что в частном случае: при L=J, m=J, k=1 и использовании в качестве  $U^{(l)}$ ,  $1 \le l \le L$ , кода, состоящего из двух противоположных слов с единственным ненулевым компонентом  $\mp 1$  на l -й позиции, - совокупность сигнальных векторов S представляет собой все линейные комбинации строк матрицы Адамара H с весами  $\mp 1$ , поэтому рассматриваемая схема множественного доступа совпадает с традиционной системой CDMA, основанной на использовании ортогонального кодирования.

Последовательность OFDM сигналов передается по каналу с частотно-селективными релеевскими замираниями. Принятый на i-м временном интервале OFDM сигнал подвергается быстрому преобразованию Фурье (FFT), после чего полученный N-мерный вектор расщепляется (с учетом частотного перемежения) на M J-мерных векторов. Принятый на i-м временном интервале J-мерных вектор  $r_i = (r_{i1}, \dots, r_{iJ})$  имеет вид

$$r_{ij} = \mu_{ij} \, s_{ij} + n_{ij} \,, \quad 1 \le j \le J \,,$$
 (5)

где  $\mu_{ij}$  - коэффициент передачи на i-м временном интервале в j-м подканале, представляющий собой комплексную гауссовскую случайную величину с нулевым средним и дисперсией  $\overline{\left|\mu_{ij}\right|^2}=1$ ; благодаря введенному перемежению в частотной области, все компоненты вектора  $\mu_i=\left(\mu_{i1},\ldots,\mu_{iJ}\right)$  взаимно независимы между собой. Совокупность  $\{n_{ij}\}$  в (5) - аддитивный белый комплексный гауссовский шум с дисперсией  $N_0$ .

# Декодирование кластерного кода множественного доступа

Будем полагать, что точные оценки коэффициентов передачи  $\{\mu_{ij}, 1 \le j \le J\}$  известны в декодере на каждом i-м временном интервале. Такие достаточно точные оценки могут быть получены с помощью пилот-сигналов, встраиваемых в каждый передаваемый OFDM сигнал [4].

Для рассматриваемой схемы передачи возможны два сценария организации декодирования J/m кластерных кодов множественного доступа. Первый сценарий — раздельное декодирование каждого из J/m кодов  $\Omega$  в своем кластере. Второй сценарий — совместное декодирования всех J/m кодов  $\Omega$  посредством декодирования

кода-произведения  $(\otimes \Omega)^{J/m}$ .

Pаздельное декодирование. Для выполнения декодирования кода  $\Omega$  в конкретном p-м кластере,  $1 \le p \le J/m$ , следует прежде всего получить из принятого J-мерного вектора  $r_i$  m-мерный вектор  $y_i^{(p)}$ , соответствующий встроенному в переданный J-мерный сигнальный вектор  $s_i$  кодовому слову  $v_i^{(p)} = \left(v_{i1}^{(p)}, \dots, v_{im}^{(p)}\right)$ . Вектор  $y_i^{(p)}$  формируется путем а) компенсации в каждом компоненте вектора  $r_i$  влияния коэффициента передачи в соответствующем подканале  $\mu_{ij}, 1 \le j \le J$ , (equalization) и б) умножения полученного после компенсации вектора на подматрицу размера  $J \times p$  транспонированной матрицы Адамара (despreading). При выполнении компенсации исходя из критерия минимума среднеквадратической ошибки, компоненты полученного m-мерного вектора  $y_i^{(p)}$  имеют вид

$$y_{iz}^{(p)} = \sum_{j=1}^{J} g_{i,(l-1)m+z,j} r_{ij}, \quad 1 \le z \le m,$$

где

$$g_{iij} = \frac{h_{ij} \mu_{ij}^*}{\beta \left( \left| \mu_{ij} \right|^2 + N_0 / \gamma \right)},$$

$$\beta = \sqrt{JkR_{out}E_b/\lambda} ,$$

$$\gamma = Lk R_{out} E_b / J ,$$

 $h_{\!\scriptscriptstyle tj}$  - j-й символ t-го столбца транспонированной матрицы Адамара.

Исходя из этих соотношений можно показать, что компоненты вектора  $y_i^{(p)}$  могут быть достаточно точно аппроксимированы как

$$y_{iz}^{(p)} \sim \alpha_i \ v_{iz}^{(p)} + \ w_{iz}^{(p)}, \quad 1 \le z \le m,$$
 (6)

где  $v_{iz}^{(p)}$  есть z -й символ кодового слова  $v_i^{(p)}$  , коэффициент

$$\alpha_{i} = (1/J) \sum_{j=1}^{J} \left( 1 + (N_{0}/\gamma) |\hat{\mu}_{ij}|^{-2} \right)^{-1}, \tag{7}$$

 $w_{iz}^{(p)}$  - шум, состоящий из двух независимых слагаемых. Первое слагаемое — случайная величина с плотностью распределения близкой к гауссовой и дисперсией

$$\frac{\lambda N_0}{kR_{out}E_b\left(1+\left(N_0/\gamma\right)\left|\hat{\mu}_{ij}\right|^{-2}\right)};$$

второе - интерференционный шум, порождаемый кодовыми словами  $v_i^{(p')}, p' \neq p$ , других кластерных кодов.

Декодер кластерного кода вычисляет квадрат евклидова расстояния  $\delta^2\left(y_i^{(p)},v\right)$  между полученным m-мерным вектором  $y_i^{(p)}$  и всеми возможными  $\alpha_i$ -взвешенными кодовыми



словами кластерного кода  $\Omega$ , т.е.

$$\delta^2\left(y_i^{(p)}, v\right) = \left|y_i^{(p)} - \alpha_i v\right|^2.$$

Полученные расстояния используются при вынесении решений относительно переданных в данном p-м кластере q пользователями q кодовых слов — по одному из кодов  $U^{(1)}, U^{(2)}, \dots, U^{(q)}$ . Решения  $\{\hat{u}_i^{(1)}, \hat{u}_i^{(2)}, \dots, \hat{u}_i^{(q)}\}$  выносятся следующим образом. Вначале отыскивается ближайшее к вектору  $y_i^{(p)}$   $\alpha_i$ -взвешенное кодовое слово кластерного кода  $\Omega$ :

$$\hat{v}_i^{(p)} = \underset{v \in \Omega}{\operatorname{argmin}} \, \delta^2 \left( y_i^{(p)}, v \right).$$

Затем находятся q кодовых слов  $\hat{u}_i^{(1)}, \hat{u}_i^{(2)}, \dots, \hat{u}_i^{(q)}, \hat{u}_i^{(l)} \in U^{(l)}$ , таких что

$$\sum_{l=1}^{q} \hat{u}_{i}^{(l)} = \hat{v}_{i}^{(p)}. \tag{8}$$

Для однозначного решения уравнения (8) кластерный код  $\Omega$  должен быть однозначно декодируемым. Полученные в (8) решения определяют решения относительно q k-блоков, кодированных кодами пользователей  $U^{(1)}, U^{(2)}, \dots, U^{(q)}$  на i-м временном интервале. Из соотношений (6) и (7) следует, что вероятность ошибки декодирования в существенной степени определяется нормированным квадратом минимального расстояния  $d_{norm}^2 = k\delta^2/\lambda$ , где  $\delta^2 = \min_{v',v'\neq v'} \delta^2(v',v'')$ .

Совместное декодирование. Пусть  $\theta = \left(v_1^{(1)}, \dots, v_m^{(1)}, \dots, v_1^{(J/m)}, \dots, v_m^{(J/m)}\right)$  кодовое слово кода-произведения  $(\otimes \Omega)^{J/m}$ , где m-блок  $\left(v_1^{(p)}, \dots, v_m^{(p)}\right)$  обозначает кодовое слово кластерного кода  $\Omega$ , соответствующего p-му кластеру. Декодер максимального правдоподобия для каждого кодового слова  $\theta \in (\otimes \Omega)^{J/m}$  вычисляет квадрат евклидова расстояния между принятым J-мерным вектором  $r_i = (r_{i1}, \dots, r_{iJ})$  и взвешенным (с весами коэффициентов передачи на i-м временном интервале) сигнальным вектором, соответствующем кодовому слову  $\theta \in (\otimes \Omega)^{J/m}$ :

$$\delta^{2}(r_{i}, s_{i}) = \sum_{j=1}^{J} |r_{ij} - \mu_{ij} s_{ij}|^{2}.$$

Затем отыскивается кодовое слово  $\hat{\theta}_i$ , на котором достигается минимум величины  $\delta^2(r_i,s_i)$ :

$$\hat{\theta}_i = \operatorname*{argmin}_{\theta \in \Omega^{J/m}} \delta^2 \left( r_i , \theta \right),$$

после чего для каждого m -блока (кодового слова)  $\left(v_1^{(p)}, \dots, v_m^{(p)}\right)$ ,  $1 \le p \le J/m$ , решается уравнение (), в результате чего для каждого кластерного кода из  $(\otimes \Omega)^{J/m}$  находятся q наиболее правдоподобных кодовых слов  $\hat{u}_i^{(1)}, \hat{u}_i^{(2)}, \dots, \hat{u}_i^{(q)}, \hat{u}_i^{(l)} \in U^{(l)}$ .

При сопоставлении процедур совместного и раздельного декодирования следует отметить, что при совместном декодировании всех J/m кластерных кодов исключается интерференционный шум, порождаемый кодовыми словами других кластерных кодов, в результате чего, очевидно, снижается вероятность ошибки. Однако оборотной стороной более

высокой помехоустойчивости процедуры совместного декодирования является существенный рост сложности реализации декодера: при раздельном декодировании сложность оценивается как  $\chi \sim 2^{qR_{in}m}$  операций на кодовый символ внешнего кода, тогда как при совместном декодировании оценка сложности составляет  $\chi \sim 2^{LR_{in}m}$ , т.е. сложность возрастает примерно в  $2^{(L-q)R_{in}m}$  раз. Например, при J/m=4, q=6 и  $R_{in}=1/4$  сложность возрастает примерно в  $2^{18}$  раз.

## Примеры кластерных кодов и численные результаты

Простейшим вариантом рассматриваемой конструкции является традиционный множественный доступ с ортогональным кодированием. В этом случае k=m=q=1,  $R_{in}=1$ , код  $U^{(1)}=\left\{1,-1\right\}$ , коэффициент загрузки  $\rho=1$ , величина нормированного квадрата минимального расстояния  $d_{norm}^2=4$ . В работах [9,10] были приведены конструкции кодов с коэффициентом загрузки  $\rho>1$ , имеющие параметры а) m=3, q=4,  $\rho=4/3$ , и б) m=4, q=5,  $\rho=1.25$ . Коды с более высоким коэффициентом загрузки – до 1.97, при m=64 предложены в [11], однако сложность их декодирования оказывается чрезмерно высокой.

Рассмотрим два примера кластерных кодов с коэффициентом загрузки  $\rho > 1$ : а именно, коды с параметрами m=4, q=6, имеющие вполне приемлемую сложность декодирования. Оба кластерных кода состоят из 7 пользовательских кодов  $U^{(1)}, U^{(2)}, \dots, U^{(7)}$  со скоростями  $R_{in}=1/4$  и  $R_{in}=2/4$ , соответственно. Коды строятся с использованием следующих двоичных векторов:  $a_1=\left(1,1,1,1\right), \qquad a_2=\left(1,-1,1,-1\right), \quad a_3=\left(1,1,-1,-1\right), \quad a_4=\left(1,-1,-1,1\right), \quad a_5=\left(1,-1,-1,-1\right), \quad a_6=\left(-1,1,-1,-1\right), \quad a_7=\left(1,1,-1,1\right), \quad a_8=\left(-1,-1,-1,1\right), \quad a_9=\left(1,-1,1,1\right).$ 

Для первого кода  $\Omega_1$  пользовательские коды имеют вид :

$$U_{1}^{(1)} = \left\{a_{1}, -a_{1}\right\}, U_{1}^{(2)} = \left\{a_{2}, -a_{2}\right\}, U_{1}^{(3)}\left\{a_{3}, -a_{3}\right\}, U_{1}^{(4)} = \left\{a_{4}, -a_{4}\right\}, U_{1}^{(5)} = \left\{a_{5}, -a_{5}\right\}, U_{1}^{(6)} = \left\{a_{6}, a_{7}\right\}, U_{1}^{(7)} = \left\{a_{8}, a_{9}\right\}$$

Для второго кода  $\Omega_2$  пользовательские коды строятся из пользовательских кодов кода  $\Omega_1$  следующим образом:  $U_2^{(l)} = U_1^{(l)} \otimes \left(j U_1^{(l)}\right), 1 \le l \le 7$ . Для кода  $\Omega_1$  коэффициент загрузки  $\rho=1.75$ , для кода  $\Omega_2$  коэффициент загрузки  $\rho=3.5$ ; величина нормированного квадрата минимального расстояния  $d_{norm}^2$  для обоих кодов одинакова и составляет 2.154. Отметим, что увеличение коэффициента загрузки вдвое для кластерного кода  $\Omega_2$  при сохранении величины  $d_{norm}^2$  достигается благодаря расширению алфавита пользовательских кодов  $U_2^{(1)}, U_2^{(2)}, \dots, U_2^{(7)}$  путем добавления квадратурного компонента.

Для оценки величины дополнительных энергетических затрат, связанных с увеличением коэффициента загрузки системы с множественным доступом при использовании кластерных кодов  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , было проведено моделирование системы с множественным доступом в outdoor канале с параметрами, указанными в табл.1, и интервалом перемежения в частотной области M=32. Другими словами, в каждой из 32 параллельных подсистем передача ведется по J=16 подканалам. При моделировании в качестве внешнего кода использовался сверточный код (371,247) со скоростью  $R_{out}=1/2$ ; для исключения пакетирования ошибок на входе внешнего декодера информационная последовательность каждого пользователя подвергалась перемежению. Все четыре кластерных кодов в 16 подканалах декодировались раздельно. Результаты проведенного моделирования показали следующее. При требуемой вероятности ошибки декодирования в диапазоне  $10^{-5}\dots 10^{-6}$  увеличение коэффициента загрузки в 1.75 раза при использовании кластерного кода  $\Omega_1$  сопровождается увеличением энергии  $E_b$ , затрачиваемой на передачу одного бита, на 3.7 ... 4.3 дБ. При использовании кластерного кода



 $\Omega_2$ , позволяющего увеличить коэффициент загрузки в 3.5 раза дополнительные энергетические затраты составляют 4.1 ... 4.7 энергетические затраты. Дополнительное увеличение энергетических затрат — на 0.4 дБ, при том же значении  $d_{norm}^2$  объясняется дополнительным интерференционным шумом, создаваемым квадратурными компонентами. Результаты моделирования показали также, что присущий процедуре раздельного декодирования эффект несократимой вероятности ошибки (вследствие наличия интерференционного шума) в рассматриваемом сценарии моделирования проявляется на уровне явно ниже вероятности ошибки  $10^{-6}$ .

#### Заключение

Неортогональный множественный позиционируется как эффективный доступ инструмент поддержания приемлемого уровня QoS в условиях пульсирующего перенасыщения трафика в современных и перспективных системах беспроводной связи. В работе рассмотрен один из вариантов реализации NOMA – разбиение выделенного частотновременного ресурса на кластеры сравнительно небольшого размера и совместное использование каждого кластера своей группой пользователей, снабженной неортогональным кластерным кодом с возможностью варьирования величины коэффициента загрузки. Поддержание стандартного уровня помехоустойчивости (соответствующего неперегруженной системе) при увеличении коэффициента загрузки и ограниченном пространственно-частотно-временном сопровождается дополнительными pecypce энергетическими затратами, однако во многих сценариях это обстоятельство рассматривается как вполне приемлемая плата за возможность функционирования в условиях перегрузки. Для предложенного класса кластерных кодов изложена общая схема кодирования и декодирования. Приведены примеры конкретных кодовых конструкций и некоторые численные результаты, позволяющие получить представление о параметрах обменного увеличением коэффициента дополнительными соотношения между загрузки И энергетическими затратами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Torrieri D.* Principles of Spread-Spectrum Communication Systems / D. Torrieri Springer Cham, 2018. 743 p.
- 2. Stuber G. L. Principles of Mobile Communication / G. L. Stuber Springer, 2017. -739 p.
- 3. *Ma Z. et al.* Literature Review of Spread Spectrum Signaling: Performance, Applications and Implementation / Z. Ma et al. // Journal of Communications. 2015. Vol. 10, N. 12. P. 932-938. Doi: 10.12720/jcm.10.12.932-938.
- 4. Schulze H., Lueders G. Theory and Applications of OFDM and CDMA: Wideband Wireless Communications / H. Schulze, G. Lueders John Wiley & Sons Ltd, 2005. 420 p.
- 5. *Ipatov V.P.* Spread Spectrum and CDMA: Principles and Applications / V.P. Ipatov John Wiley & Sons Ltd, 2005. 375 p.
- 6. *Dai L. et al.* Nonorthogonal multiple access for 5G: solutions challenges opportunities and future research trends / L. Dai et al. // IEEE Communications Mag. 2015. Vol. 53, N. 9. P. 74-81.
- 7. *Ding Z. et al.* Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks / Z. Ding et al. // IEEE Communications Mag. 2017. Vol. 55, N. 2. P. 185-191.
- 8. 3GPP TR 38.901 v15.0.0. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz / Technical Report. ETSI, 2018. 103 p.
- 9. *Paavola J., Ipatov V.* Distance-Optimal Oversaturated CDMA Signature Ensemble // Proc. of the 4th International Symposium on Wireless Communication Systems. Trondheim, Norway, 2007. P. 480-484. doi: 10.1109/ISWCS.2007.4392386.



- 10. *Vanhaverbeke F., Moeneclaey M.* Sequences for Oversaturated CDMA Channels // Proc. of the 10th IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Bologna, Italy, 2008. P. 735-739. doi: 10.1109/ISSSTA.2008.143.
- 11. *Singh A. et al.* Set of uniquely decodable codes for overloaded synchronous CDMA/ A. Singh et al. // IET Communications. 2016. Vol.10, N.10. P.1236-1245.

# ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Таубин Феликс Александрович —

Доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения 190000, Санкт-Петербург, ул. Больная Морская, д. 67, лит. А E-mail: ftaubin@yahoo.com

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

#### Taubin Feliks Aleksandrovich -

Dr. Sc., professor Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation 67, Bolshaya Morskaia str., Saint-Petersburg, 190000, Russia E-mail: ftaubin@yahoo.com