

УДК 621.391

## О СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ОДНОЙ СИСТЕМЕ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА

**Д. С. Осипов,**

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

**Ф. В. Грошев,**

младший научный сотрудник

Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, г. Москва

*Рассматривается система множественного доступа, использующая псевдослучайное переключение частот в динамически выделяемом частотном диапазоне и некогерентный пороговый прием. Для такой системы предложен метод увеличения скорости передачи на основе выделения пользователю нескольких независимых потоков данных. Показаны эффективность данного метода (с точки зрения максимальной скорости надежной передачи), а также эффективность использования порога, имеющего постоянную величину.*

**Ключевые слова** — множественный доступ, псевдослучайное переключение частот, динамически выделяемые частотные поддиапазоны, некогерентный пороговый прием, скорость передачи.

### Введение

Одними из наиболее важных аспектов развития современных информационных технологий являются интенсивный рост объемов данных, передаваемых в системах беспроводной связи, и интенсивное увеличение числа приложений, использующих этот тип связи. Особую актуальность приобретает в этих условиях задача множественного доступа, суть которой состоит в том, что более чем один пользователь может использовать некоторый канал в течение определенного промежутка времени.

Следует отметить, что широкий диапазон приложений, использующих методы множественного доступа для передачи данных, предъявляет к таким системам целый ряд специфических требований.

Среди важнейших требований, предъявляемых к системам множественного доступа, выделим обеспечение защиты данных от прослушивания и подавления. Эта задача с успехом решается методами CDMA (Code Division Multiple Access) — кодового разделения пользователей в системах множественного доступа (СМД) и, в частности, методом псевдослучайно-переключающихся радиочастот (ППРЧ). Однако системы, использующие метод ППРЧ, оказываются неэффективными в случае применения новейших технологий подавления. В работе [1] была предложена моди-

фикация системы, использующей ППРЧ, — система с динамическим выделением диапазона переключающихся частот (Dynamic Hopset Allocation Frequency Hopping Orthogonal Frequency Division Multiple Access, ДНА FH OFDMA). Ниже будет рассмотрена одна из многочисленных модификаций системы такого типа, позволяющая снизить ущерб от применения новейших технологий подавления, — СМД, использующая псевдослучайное переключение частот в динамически выделяемом частотном диапазоне и некогерентный пороговый прием.

Другим важным требованием, предъявляемым к системам передачи данных, является обеспечение широкого диапазона скоростей передачи данных в зависимости от ограничений, накладываемых конкретным типом приложения, видом передаваемых данных и т. п. В настоящей работе предложен метод решения этой проблемы применительно к системе ДНА FH OFDMA.

### Описание системы

Будем рассматривать передачу от многих пользователей по каналу «вверх» (т. е. передачу на базовую станцию — БС) и, соответственно, полагать, что все пользователи, ведущие передачу, передают данные асинхронно и некоординированно. Кроме того, мы будем полагать, что в описываемой системе налажен оптимальный кон-

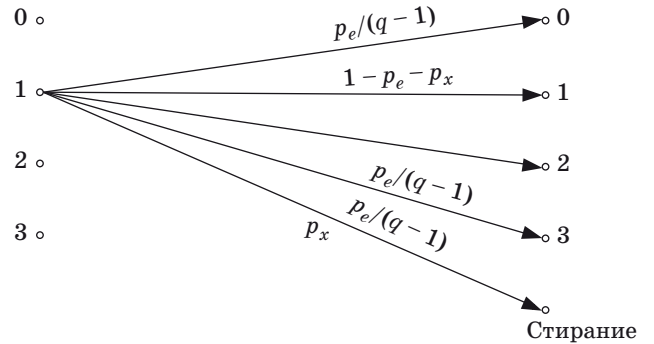
троль мощности, т. е. мощность сигнала, передаваемого каждым из пользователей, выбирается так, чтобы мощность соответствующего сигнала на приемном конце равнялась некоторому заранее заданному значению  $P$ . Пусть используемый канал разбит при помощи технологии OFDM на  $Q$  непересекающихся частотных подканалов. Ниже мы будем предполагать, что в канале присутствует аддитивный белый гауссов шум. Таким образом, исследуемая нами система может рассматриваться как идеализированная модель таких реальных систем, как спутниковые системы связи или системы сотовой связи, а ее анализ — как первый этап анализа такого рода систем.

Рассмотрим передачу  $q$ -ичного символа одним из пользователей (здесь и далее будем называть этого пользователя «рассматриваемым», а остальных пользователей, передающих данные в системе в момент рассмотрения, и передаваемые ими сигналы — «мешающими»). Предполагается, что активный пользователь оснащен генератором номеров подканалов, который случайным образом без повторения выбирает из множества  $Q$  подканалов вектор  $q$  подканалов, которые могут быть использованы при передаче. Передаваемый символ кодируется позицией в этом векторе.

Предполагается, что БС оснащена генератором, синхронизированным с генератором активного пользователя. Это означает, что БС известны наборы подканалов, выбранные генератором активного пользователя. При этом неизвестно, какой именно из подканалов использовался для передачи. Для того чтобы разрешить эту неопределенность, БС сравнивает энергию каждого из сигналов, принятых из подканалов, выбранных генератором, с некоторым порогом. В случае если превышение порога регистрируется лишь по одному из подканалов, принимается символ, поставленный в соответствие этому подканалу, в противном случае принимается решение о стирании. Если принят символ, отличный от переданного, говорят об ошибке.

### Критерий выбора порога

Мы рассматриваем лишь передачу информации от рассматриваемого пользователя на БС. Сигналы, передаваемые другими пользователями, при таком способе рассмотрения трактуются как источник дополнительных помех. С точки зрения пары «рассматриваемый пользователь — БС», описываемая система представляет собой, говоря языком теории информации, дискретный  $q$ -ичный канал без памяти со стираниями (здесь и далее мы будем обозначать этот канал как  $K_0$ ). Диаграмма состояний такого канала показана на

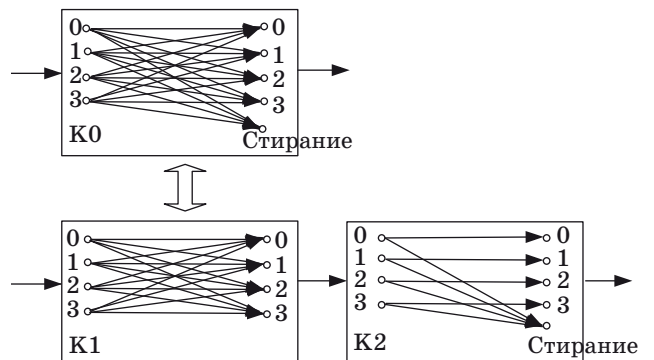


■ Рис. 1. Диаграмма состояний и величины переходных вероятностей для используемого канала

рис. 1 (так как переходные вероятности для различных состояний совпадают, для удобства восприятия на диаграмме показаны переходные вероятности лишь для одного состояния).

На этом рисунке вероятность ошибки обозначена как  $p_e$ , а вероятность стирания как  $p_x$ . Такой канал уместно представить как композицию  $q$ -ичного дискретного симметричного канала без памяти и стирающего канала (под стирающим каналом здесь подразумевается канал, в котором всякий символ переходит либо в себя, либо в стирание), как показано на рис. 2.

Заметим, что выбранное нами представление использует предположение о том, что вероятность появления стираний на любой позиции в передаваемом сообщении не зависит ни от положения самой этой позиции в этом сообщении, ни от того, произошла ли ошибка при передаче сообщения (что делает используемую модель адекватной, так как в реальной системе как ошибки, так и стирания являются результатом работы приемника и, кроме того, позиции ошибок неизвестны приемнику, по крайней мере, до декодирования). Будем обозначать  $q$ -ичный дискретный симметричный канал без памяти как  $K_1$ , а стирающий канал как  $K_2$ . Кроме того, будем обозначать ве-



■ Рис. 2. Представление используемого канала в виде композиции дискретного  $q$ -ичного канала без памяти и стирающего канала

роятность стирания в К2 как  $\tilde{p}_x$ , а вероятность ошибки в К1 как  $\tilde{p}_e$ .

Поскольку стирания независимы, можно утверждать, что

$$p_x = \tilde{p}_x(1 - \tilde{p}_e) + \tilde{p}_x\tilde{p}_e = \tilde{p}_x.$$

Кроме того, для вероятности ошибки верно следующее равенство:

$$p_e = \tilde{p}_e(1 - p_x),$$

а для вероятности правильного приема

$$\begin{aligned} p_c &= (1 - \tilde{p}_e)(1 - p_x) = \\ &= \left(1 - \frac{p_e}{1 - p_x}\right)(1 - p_x) = 1 - p_e - p_x. \end{aligned}$$

Полученные соотношения позволяют нам определить пропускную способность канала КО. Выражение для этой величины в явном виде было получено авторами в работе [2]. Здесь мы лишь вкратце воспроизведем вывод этого выражения, так как оно будет играть важную роль в дальнейшем изложении. Согласно [3]:

$$C_e = C - p_x C,$$

где  $C_e$  — пропускная способность исследуемого канала;  $C$  — пропускная способность канала К1:

$$C = \log_2(q) - H,$$

$$H = -\left[(1 - \tilde{p}_e)\log_2(1 - \tilde{p}_e) + \frac{\tilde{p}_e}{q-1}\log_2\frac{\tilde{p}_e}{q-1}(q-1)\right].$$

Таким образом, пропускная способность исследуемого канала (канала КО) может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} C_e &= [\log_2 q + (1 - \tilde{p}_e)\log_2(1 - \tilde{p}_e) + \\ &+ \tilde{p}_e \log_2 \tilde{p}_e - \tilde{p}_e \log_2(q-1)](1 - p_x), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{где } \tilde{p}_e = \frac{p_e}{1 - p_x}.$$

Следует отметить, что величина, которая описывается выражением (1), является пропускной способностью канала КО, но не является пропускной способностью канала множественного доступа, так как методы приема и передачи фиксированы. Эта величина имеет смысл наибольшей скорости, с которой пользователь может надежно передавать информацию в СМД, построенной в соответствии с вышеописанными принципами и характеризующейся данными значениями переходных вероятностей (термин «надежно» имеет здесь тот же смысл, который вкладывается в него в работе [4]). Подставляя выражение для  $\tilde{p}_e$  в аналитическое выражение (1), имеем

$$\begin{aligned} C(p_e, p_x) &= [\log_2 q + \left(1 - \frac{p_e}{1 - p_x}\right)\log_2\left(1 - \frac{p_e}{1 - p_x}\right) + \\ &+ \frac{p_e}{1 - p_x}\log_2\left(\frac{p_e}{1 - p_x}\right) - \frac{p_e}{1 - p_x}\log_2(q-1)](1 - p_x) = \\ &= ((1 - p_x)\log_2 q) + (1 - p_e - p_x)\log_2\left(1 - \frac{p_e}{1 - p_x}\right) + \\ &+ p_e \log_2\left(\frac{p_e}{1 - p_x}\right) - p_e \log_2(q-1). \end{aligned} \quad (2)$$

Как видно из формулы (2), наибольшая скорость, с которой пользователь может вести передачу в рассматриваемой системе, определяется как вероятностью ошибки, так и вероятностью стирания. Эти вероятности, в свою очередь, определяются как особенностями метода приема и передачи (технологией частотно-позиционного кодирования, используемым методом приема, условиями, наложенными на процесс передачи данных активными пользователями) и особенностями используемого физического канала связи (т. е. среды, в которой распространяется передаваемый сигнал), так и параметрами СМД. К последним относятся общее число выделяемых подканалов, число подканалов, которые выделяются каждому из пользователей, число активных пользователей и величины порогов.

Следует отметить, что из всех вышеперечисленных параметров БС может изменять лишь величины порогов. Так как мы рассматриваем систему с оптимальным контролем мощности, в которой сигналы от различных пользователей имеют одну и ту же мощность на приемном конце, целесообразно выбрать величину порога одинаковой для всех пользователей и всех подканалов, выделенных этим пользователям. Как видно из вышесказанного, переходные вероятности ошибки и стирания, которыми описывается канал с точки зрения каждого из рассматриваемых пользователей, в общем случае будут различными для различных значений величины порога. Иными словами, хотя с точки зрения рассматриваемого пользователя математическая модель канала остается неизменной, меняя величину порога, мы тем самым переходим к каналу с новыми параметрами и, соответственно, другой пропускной способностью. Следует отметить, что прочие параметры и ограничения, от которых зависят вероятности ошибки и стирания, полагаются неизменными, иначе говоря, мы выбираем величину порога для конкретных значений таких параметров, как  $Q$  — общее число подканалов;  $q$  — число подканалов, динамически выделяемых каждому пользователю для передачи одного символа;  $K$  — число ак-

тивных пользователей и SNR — отношение сигнал/шум. Представляется целесообразным выбрать величину порога  $TR$ , соответствующей каналу, характеризующемуся наибольшей пропускной способностью

$$C(Q, q, K, \text{SNR}) = \max(C(p_e(Q, q, K, \text{SNR}, TR), p_x(Q, q, K, \text{SNR}, TR))). \quad (3)$$

Заметим, что пропускная способность канала, характеризующегося такой величиной порога, имеет смысл наибольшей скорости, с которой пользователь может надежно вести передачу в системе рассматриваемого типа, характеризующей заданными значениями параметров и наложенными на передачу ограничениями (такая интерпретация была использована еще в работе [5]). Необходимо еще раз отметить, что словосочетание «пропускная способность» относится в данном случае лишь к дискретному каналу, к которому сводится СМД, использующая описанные выше методы приема и передачи и характеризующая конкретными параметрами (в том числе «оптимальной» в вышеуказанном смысле величиной порога). Подлинная пропускная способность СМД представляет собой скорость надежной передачи данных, максимизированную по всевозможным методам приема и передачи (разумеется, использование других методов приема и передачи может привести к тому, что для использующей их СМД уже не будут характерны такие особенности, как, например, устойчивость к подавлению). В рассматриваемом случае максимизация скорости надежной передачи ведется лишь по одному параметру, а именно величине порога, в то время как прочие параметры, а также метод приема и передачи и наложенные на систему ограничения (равенство мощностей сигналов на приемном конце, отсутствие синхронизации между пользователями и т. п.) фиксированы. Поэтому в дальнейшем будем обозначать характеристику, задаваемую равенством (3), как  $R_m$ , для краткости опуская переменные, от которых зависит величина этой характеристики (при этом, разумеется, сравнения величин  $R_m$  будут производиться для одних и тех же значений этих параметров):

$$R_m = C(Q, q, K, \text{SNR}),$$

а саму эту величину будем называть «максимальной скоростью надежной передачи» (опуская для краткости слова «в системе множественного доступа описанного типа», так как далее речь пойдет о передаче информации исключительно в СМД, построенной в соответствии с вышеописанными принципами).

### Увеличение скорости передачи данных в СМД рассматриваемого типа

Описанная нами СМД защищена от подавления при помощи сосредоточенных (по спектру) помех существенно лучше, чем известные ныне системы, благодаря использованию технологии частотно-позиционной модуляции и некогерентного приема. Рассмотрение вопросов подавления не входит в нашу задачу, поэтому, иллюстрируя это утверждение, мы ограничимся лишь кратким изложением наиболее общих соображений относительно эффективности применения различных стратегий подавления в системе описываемого типа. В работе [5] было показано, что в системе описываемого типа использование «следающих» помех, имитирующих сигналы авторизованных пользователей, не приводит к значительному ухудшению качества связи даже в том случае, если мощность каждого из сигналов помехи больше, чем мощность сигналов, передаваемых каждым из авторизованных пользователей (при этом общая мощность сигнала помехи была во много раз больше, чем мощность сигналов, передаваемых каждым из авторизованных пользователей). Между тем использование «следающей» помехи (transponder jamming, follower jamming) является одним из наиболее эффективных методов подавления полезного сигнала, применяемых в настоящее время [6]. Другим популярным в настоящее время методом подавления является ретрансляция сигнала, переданного авторизованными пользователями с задержкой (repeater jamming). Эта стратегия рассматривается некоторыми авторами как разновидность «следающей» помехи [6]. Действительно, если выполняются определенные ограничения на задержки распространения, этот метод позволяет сравнительно просто реализовать «следающую» помеху (заметим, что в общем случае для этого необходимо анализировать спектр, в то время как в рассматриваемом случае противник лишь ретранслирует сигнал). Такая стратегия оказывается весьма эффективной, например, при подавлении сигналов в системе DS CDMA [7]. Эта стратегия с успехом может применяться и в системах, использующих ППРЧ с частотно-позиционной модуляцией, причем в некоторых случаях ограничения на задержки оказываются не такими жесткими (тогда уместнее говорить о воспроизведении перехваченных и записанных сигналов от авторизованных пользователей, и такая помеха уже не сводится к «следающей»). Например, в традиционной системе, использующей ППРЧ и частотно-позиционную модуляцию с пороговым приемом, воспроизведение ранее переданных сигналов приводит к тому, что в части поддиапазонов (а именно в тех из них, ко-

торые использовались при передаче в момент записи) будут переданы сигналы помехи и, следовательно, вероятность стирания символов, которые будут передаваться по этим поддиапазонам, будет очень большой, а значит, повысится и вероятность стирания в целом. Это, однако, не относится к рассматриваемой системе: так как диапазоны выделяются динамически, повторение ранее переданных сигналов будет равносильно передаче соответствующего числа сигналов в случайно выбранных подканалах. Заметим, что повторение ранее записанных сигналов, как и передача сигналов помехи на случайных позициях, фактически эквивалентно введению новых активных пользователей. Резюмируя сказанное, можно утверждать, что использование описанных выше методов приема и передачи существенно снижает эффективность методов ретрансляции сигнала как средства создания помех корректному приему.

Из вышесказанного видно, почему частотно-позиционная модуляция, динамическое выделение поддиапазонов и некогерентный пороговый прием играют столь существенную роль в описанной нами системе. Вместе с тем использование частотно-позиционной модуляции приводит к тому, что скорость передачи в системе описываемого типа невелика. Одним из возможных методов повышения скорости в системе такого типа является использование вложенной модуляции более высокого порядка (например, фазовой). При этом часть информации по-прежнему кодируется положением номера подканала, в котором ведется передача, в векторе номеров подканалов, а часть — при помощи вложенной модуляции выбранного типа. Следует отметить, что при таком подходе биты, которые соответствуют состояниям вложенной модуляции, существенно хуже защищены от подавления. Поэтому целесообразно исследовать методы, позволяющие повысить скорость передачи в системе описываемого типа без изменения типа модуляции. Одним из возможных подходов является выделение каждому из пользователей нескольких кодовых последовательностей (последнее позволяет каждому из пользователей передавать несколько потоков данных). Следует отметить, что общее число подканалов всегда много больше, чем число подканалов, которые выбираются генератором номеров рассматриваемого пользователя, поэтому общее число кодовых последовательностей описываемого типа очень велико (тривиальная верхняя оценка на это число равна  $C_m^q$ ). Даже если каждому из абонентов будет выделена группа кодовых последовательностей сравнительно большой мощности, число таких групп (т. е. число потенциальных абонентов, за каждым из которых может быть за-

креплена такая группа) окажется существенно превышающим потребности современных систем связи. В частности, для анализируемого ниже случая ( $Q = 4096$  и  $q = 4$ ) оценка сверху на число последовательностей дает число  $S \approx 10^{13}$ , на несколько порядков превышающее население Земли, и даже если каждому из абонентов будут выданы сотни таких последовательностей, количество потенциальных абонентов все же будет больше, чем численность жителей Земли. По этой причине последовательности, приписываемые каждому из пользователей, могут быть выбраны непересекающимися. Такой подход к выбору последовательностей представляется разумным, так как в противном случае существует ненулевая вероятность того, что некоторые подканалы будут выбраны для передачи различных потоков данных от одного пользователя. Это приведет к росту вероятности ошибки и стирания, который в свою очередь неизбежно приведет к снижению максимально возможной скорости надежной передачи данных. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать следующую модификацию вышеописанной модели СМД: будем полагать, что рассматриваемый пользователь одновременно передает  $z$   $q$ -ичных символов, используя для этого  $z$  векторов подканалов (длиной  $q$ ), выбираемых случайно (без повторения) из  $Q$  подканалов, причем каждый из  $z$  векторов используется для передачи одного символа, а передача происходит так, как было описано выше.

Поскольку векторы номеров подканалов, используемые одним пользователем, не пересекаются, такой способ передачи можно трактовать как выделение пользователю нескольких независимых каналов «вверх». Как и прежде, будем характеризовать каждый из таких каналов величиной максимально возможной скорости надежной передачи в соответствующем канале  $R_m(j, k)$  (где  $j = 1 : z$  — индекс, обозначающий номер потока данных,  $k$  — индекс, обозначающий номер активного пользователя). Каналы взаимно независимы, поэтому можно утверждать, что максимальная скорость, с которой рассматриваемый пользователь может вести передачу в такой системе, есть

$$R_m(k) = \sum_{j=1}^z R_m(j, k).$$

По аналогии с пропускной способностью канала на бит, можно определить максимальную скорость передачи на бит:

$$R_m^b(k) = \frac{R_m(k)}{z \log_2 q}.$$

Кроме того, определим суммарную скорость передачи в системе описанного типа. Так как все

пользователи передают информацию независимо и некоординированно, суммарная скорость равна сумме скоростей от каждого из пользователей:

$$R_m^t = \sum_{k=1}^K R_m(k).$$

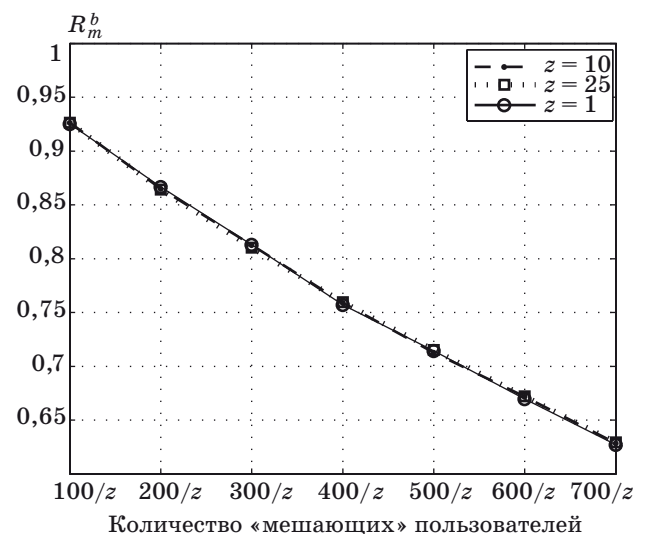
Для того чтобы проводимое нами сравнение было корректным, будем полагать, что число «мешающих» сигналов остается неизменным. Такое предположение дает возможность рассматривать различные ситуации, в которых одна группа пользователей имеет одну скорость, а другие группы — другую (с тем, однако, чтобы ограничение на число «мешающих» пользователей выполнялось). При большом числе «мешающих» сигналов число различных ситуаций, которые приходится рассматривать, оказывается весьма значительным, поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать предельную ситуацию, в которой все пользователи (включая и рассматриваемого) передают  $z$  различных потоков, а число «мешающих» пользователей меняется обратно пропорционально  $z$ . Можно предположить, что коль скоро число «мешающих» пользователей не меняется, вероятности ошибки и стирания, а следовательно, и максимальная скорость передачи не должны измениться значительно. Однако необходимо учитывать, что перераспределение ресурсов (числа одновременно выделяемых одному пользователю потоков) приводит к появлению новых ограничений. Так, раньше, говоря о «мешающих» сигналах, мы предполагали, что каждый из «мешающих» сигналов ассоциируется с одним из пользователей и, следовательно, в общем случае все сигналы асинхронны. Помимо этого, любой из сигналов может быть передан в любом из подканалов (даже в том, в котором уже передаются сигналы других пользователей; такую ситуацию мы будем называть «коллизией», а число пользователей, одновременно передающих в некотором подканале, — «кратностью коллизии»). В модифицированной модели для каждого сигнала, переданного по некоторому частотному подканалу, гарантированно найдется  $z - 1$  синхронизированных с ним по времени сигналов (так как эти сигналы излучаются одним пользователем). Кроме того, если подканал, в котором рассматриваемый пользователь передает сигнал, уже используется для передачи другим пользователем, то можно утверждать, что  $z - 1$  сигналов, передаваемых последним, не будут переданы в рассматриваемом подканале в силу особенностей вышеописанного метода передачи. Это обстоятельство, разумеется, влияет на характер распределения числа коллизий и их кратностей. Вопрос состоит лишь в том, насколько существенно влияние этих факторов на максимальную скорость передачи в рас-

сматриваемой системе. Ниже для ответа на этот вопрос мы воспользуемся имитационным моделированием.

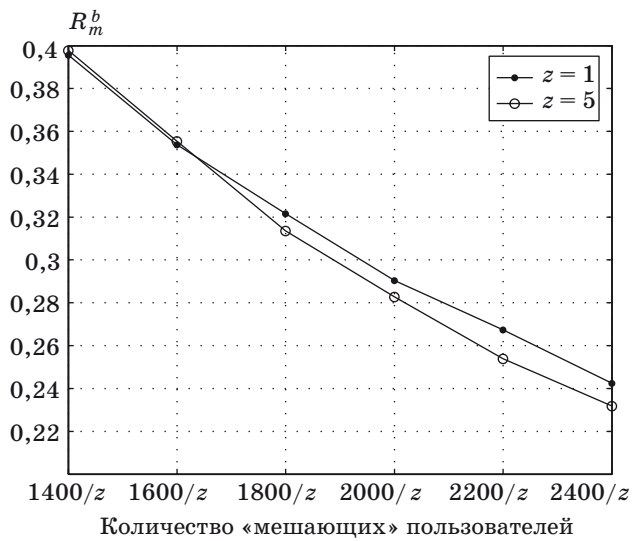
При моделировании такой системы будем использовать следующие параметры: общее число подканалов  $Q = 4096$ , число номеров подканалов в каждом векторе-элементе используемой кодовой последовательности  $q = 4$ , количество «мешающих» пользователей  $K$  меняется от  $100/z$  до  $700/z$  с шагом  $100/z$  (где  $z$  — по-прежнему число потоков данных, передаваемых одним пользователем),  $SNR = 10$  дБ. Нас будет интересовать максимальная скорость надежной передачи данных, которая достижима при тех или иных параметрах системы. Для того чтобы оценить ее, мы будем программно имитировать вышеописанную систему, оценивая по результатам испытаний значения вероятностей ошибки и стирания, вычисляя с использованием полученных оценок значения достижимой скорости передачи для различных значений параметров системы (в том числе величины порога) и выбирая из диапазона значений, вычисленных для различных величин порога, такие, которые максимизируют (при прочих равных) достижимую скорость надежной передачи.

На рис. 3 приведены графики зависимости  $R_m^b$  (в битах на OFDM символ) от числа «мешающих» пользователей для различного числа потоков.

Как видно из графика, кривые, соответствующие различному числу потоков, почти совпадают. Следует, однако, отметить, что использование сравнительно большого числа параллельных потоков может сказываться на величине максимальной скорости надежной передачи на бит пе-



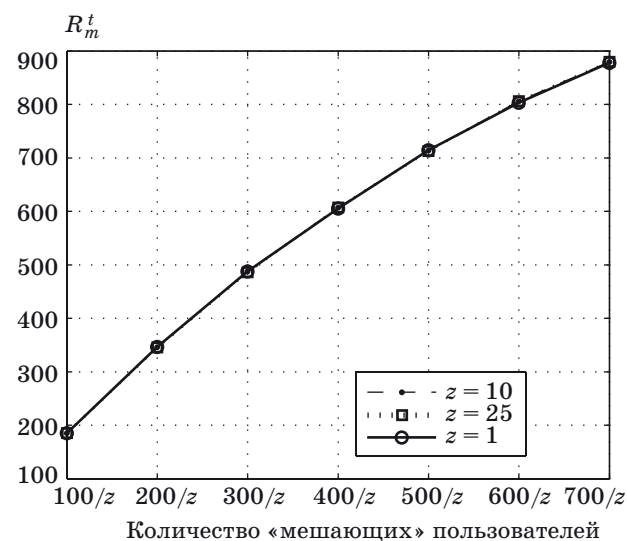
■ Рис. 3. Зависимость значений максимальной скорости надежной передачи на бит передаваемой информации от числа «мешающих» пользователей



■ Рис. 4. Пример изменения значений максимальной скорости надежной передачи на бит передаваемой информации при изменении числа потоков (при сравнительно большом числе «мешающих» пользователей)

редаваемой информации при относительно больших величинах  $K$  (рис. 4).

Как видно из рис. 4, различия в значениях  $R_m^b$  для разных  $z$  более существенны, чем различия между значениями, приведенными на рис. 3. Вместе с тем с практической точки зрения больший интерес представляет исследование предлагаемого метода при значениях  $K$ , для которых можно получить приемлемые значения максимальной скорости передачи. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать диапазон значений  $K$ , который рассматривали выше:  $K = 100/z \dots 700/z$ .



■ Рис. 5. Зависимости суммарной скорости передачи от числа «мешающих» пользователей

На графике рис. 5 даны зависимости суммарной скорости передачи от числа «мешающих» пользователей для различного числа потоков  $z$ . Кривые практически совпадают, что позволяет сделать вывод, что использование нескольких потоков не снижает эффективности предлагаемого метода передачи (при условии, что число сигналов от мешающих пользователей остается тем же, а число активных пользователей лежит в диапазоне, представляющем интерес с практической точки зрения).

### Зависимость скорости надежной передачи данных от параметров СМД

Выше, говоря о скоростях передачи информации, доступных пользователю, передающему информацию в СМД, использующей псевдослучайное переключение частот в динамически выделяемом частотном диапазоне, мы полагали, что порог выбирается таким образом, чтобы максимизировать скорость, при которой еще возможна надежная передача информации. При этом величина порога зависела от таких величин, как число «мешающих» пользователей и SNR, и, следовательно, информация о значениях этих величин была необходима для правильного выбора порога. Предположим теперь, что величина порога фиксирована. Использование фиксированного порога не требует знания указанных параметров и позволяет не подстраивать порог адаптивно. Вместе с тем использование величины порога, отличной от оптимального значения, приводит к уменьшению достижимой скорости надежной передачи. Для того чтобы охарактеризовать величину этих потерь, будем изменять порог на некоторую фиксированную величину (в данном случае  $\Delta = 0,05P$ , где  $P$  — мощность сигнала на приемном конце) и станем оценивать отношение величины достижимой (при данной величине порога и фиксированном количестве «мешающих» пользователей) скорости надежной передачи  $R$  к величине максимальной скорости надежной передачи  $R_m$ . Следует отметить, что под значением «величины максимальной скорости надежной передачи» здесь подразумевается наибольшее из вычисленных нами значений достижимой скорости надежной передачи при данном количестве «мешающих» пользователей и различных значениях величины «порога» (т. е. величина  $\Delta$  предопределяет требования к точности оптимизации). Соответственно оптимальность вычисленных значений является, в известной степени, условной. Впрочем, такой подход к определению оптимальной величины вполне согласуется с тем, который используется в реальных системах, так как на практике оптимальные значения должны быть

вычислены заранее (с фиксированной точностью) и храниться в виде таблицы, по которой БС выбирает оптимальную для текущих параметров величину. В таблице приведены значения отношения  $R/R_m$  для различного количества «мешающих» пользователей и различных значений величины порога (при различных значениях SNR). Для наглядности были выбраны те значения величины порога, которые обеспечивают значения отношения  $R/R_m$ , близкие к 1.

Оценивая результаты моделирования, приведенные в таблице, можно отметить, что при всех проанализированных значениях SNR при сравнительно малых и больших величинах числа «мешающих» пользователей значения отношения  $R/R_m$ , близкие к 1, обеспечивают значения величины порога в диапазоне  $0,5P \div 0,55P$  и  $0,45P \div 0,5P$  соответственно.

Вместе с тем все полученные значения величины  $R_m$  для различных значений величины порога весьма близки. В частности, для анализируемых значений числа «мешающих» пользователей наименьшее значение отношения  $R/R_m$  (т. е. значение, соответствующее наибольшим потерям) равно 0,957, что соответствует потере 4,3 % от максимальной (для соответствующих значений числа «мешающих» пользователей, величины порога и SNR) величины. Таким образом, если величина порога фиксирована и находится в интервале  $0,45P - 0,55P$ , значения максимально возможной скорости надежной передачи при таком выборе порога незначительно отличаются от тех, которые обеспечивают оптимальный выбор порога в достаточно широком диапазоне значений количества «мешающих» пользователей (и, соответственно, числа «мешающих» сигналов). Это

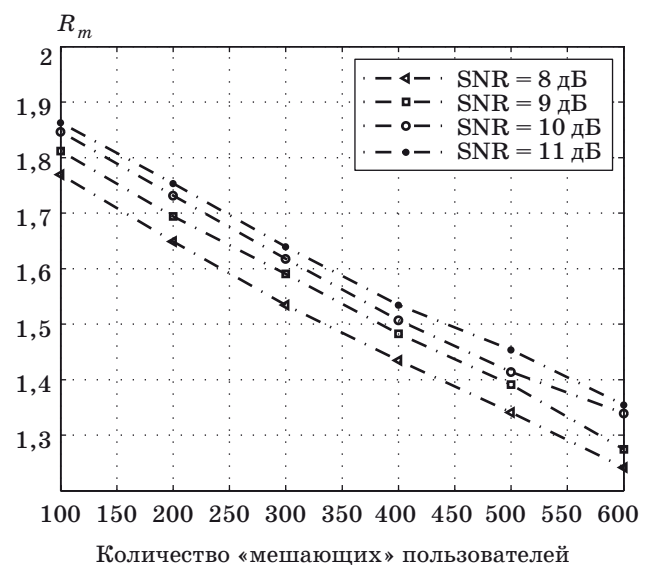
■ Значения отношения  $R/R_m$  в зависимости от количества «мешающих» пользователей и значения величины порога

TR	Количество «мешающих» пользователей					
	100	200	300	400	500	600
SNR = 9 дБ						
0,45P	0,9819	0,9725	1,0000	0,9964	1,0000	1,0000
0,5P	0,9751	1,0000	0,9969	1,0000	0,9961	0,9929
0,55P	1,0000	0,9773	0,9886	0,9832	0,9700	0,9642
SNR = 10 дБ						
0,45P	0,9570	0,9778	0,9840	0,9979	1,0000	1,0000
0,5P	1,0000	0,9924	1,0000	1,0000	0,9938	0,9904
0,55P	0,9935	1,0000	0,9962	0,9864	0,9865	0,9726
SNR = 11 дБ						
0,45P	0,9810	0,9858	0,9899	1,0000	1,0000	0,9982
0,5P	0,9735	0,9835	1,0000	0,9955	0,9967	0,9946
0,55P	0,9931	1,0000	0,9990	0,9927	0,9862	0,9865

в частности означает, что фиксированный порог может использоваться даже в том случае, когда число «мешающих» сигналов меняется значительно (например, вследствие большой мобильности активных пользователей или использования активными пользователями метода повышения скорости передачи, описанного выше). Кроме того, полученный результат свидетельствует о том, что даже если система использует адаптивную подстройку порога, нет необходимости вычислять оптимальные величины порога с высокой точностью.

Выберем теперь фиксированную величину порога и сравним значения максимально возможной скорости надежной передачи для различных значений SNR (рис. 6).

Анализируя полученные зависимости, можно отметить, что даже при уровне фонового шума, равном 8 дБ, значения, соответствующие величине порога  $0,45P$ , отличаются от тех, которые соответствуют SNR = 11 дБ, не более чем на 0,13 бит на OFDM кадр. Для SNR, отличающихся менее чем на 3 дБ, различие оказывается еще менее существенным. Это позволяет сделать вывод, что при использовании фиксированного порога изменение величины SNR на 1–2 дБ не приводит к существенному изменению характеристик системы, что весьма важно с точки зрения использования описанных методов приема и передачи в реальных системах, так как механизмы контроля мощности, используемые в реальных системах, субоптимальны, и потому мощность принятого сигнала (а значит, и величина SNR) может меняться.



■ Рис. 6. Зависимость скорости передачи от числа «мешающих» пользователей при различных величинах SNR (для фиксированной величины порога  $TR = 0,45P$ )



**Заключение**

Суммируя полученные в работе результаты, можно отметить, что при сравнительно небольшом числе пользователей использование предложенного метода повышения скорости передачи данных практически не приводит к снижению эффективности передачи, о чем свидетельствует близость значений максимальной скорости на-

дежной передачи на бит передаваемой информации для различных значений числа потоков. Результаты моделирования указывают также на небольшие потери при использовании фиксированного порога в СМД, построенной в соответствии с вышеописанными принципами, из чего можно сделать вывод, что с практической точки зрения такое решение представляется вполне оправданным.

**Литература**

1. **Зяблов В., Осипов Д.** Об оптимальном выборе порога в системе множественного доступа, основанной на перестроении ортогональных частот // Проблемы передачи информации. 2008. Т. 44. № 2. С. 23–31.
2. **Грошев Ф., Осипов Д.** Исследование пропускной способности системы множественного доступа с пороговым приемом // Информационные технологии и системы: 32-я конф. молодых ученых и специалистов, Бекасово, Россия, 15–18 декабря 2009 г. / ИППИ РАН. М., 2009. С. 152–155.
3. **Verdu S., Weissman T.** The Information Lost in Erasures // IEEE Transactions On Information Theory. Nov. 2008. Vol. 54. N 11. P. 5030–5058.
4. **Галлагер Р.** Теория информации и надежная связь. — М.: Сов. радио, 1974. — 738 с.
5. **Осипов Д. С.** Система множественного доступа, использующая некогерентный пороговый прием, частотно-позиционное кодирование и динамически выделяемый диапазон частот, в условиях подавления полезного сигнала // Информационно-управляющие системы. 2010. № 6 (49). С. 28–32.
6. **Poisel R.** Modern Communications Jamming Principles and Techniques. 2<sup>nd</sup> ed. — Norwood: ARTECH HOUSE, 2011. — 870 p.
7. **Wang H., Guo J., Wang Z.** Evaluation of Security for DSSS Under Repeater Jamming // Proc. of ICC'2007, Glasgow, Scotland, June 24–28, 2007. P. 5525–5530.

**ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ**

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*