

Новый вид материнских созвездий для SCMA-систем

М.Г. Бакулин, Т.Б.К. Бен Режеб, В.Б. Крейнделин, Д.Ю. Панкратов,
А.Э. Смирнов

Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия
m.g.bakulin@gmail.com, benrejebt@yandex.ru, vitkrend@gmail.com, dpankr@mail.ru,
smirnov.al.ed@gmail.com

Поступила в редколлегию 01.07.2023

Аннотация—Множественный доступ с прореженным кодовым разделением (Sparse Code Multiple Access - SCMA) является разновидностью технологии неортогонального множественного доступа (NOMA). Основой SCMA являются кодовые книги, основанные на многомерных созвездиях, для генерации которых используются оригинальные материнские созвездия. От свойств этих созвездий во многом зависит эффективность системы связи с SCMA.

В данной статье предлагаются новые материнские созвездия для использования в системах SCMA. Синтез предлагаемых созвездий проведён с помощью нового аналитического метода описания табличных функций в виде функциональной зависимости сигнала от вектора двоичных переменных. Такое представление позволило выявить некоторые закономерности и определить характеристики созвездий, влияющие на эффективность их использования. В частности, предложен новый вид двумерных созвездий с параметрическим описанием, названных созвездиями Arrow (Стрела). Предложенные созвездия относятся к классу многомерных созвездий и могут использоваться как самостоятельно, так и при синтезе кодовых книг в системах SCMA. Наилучший эффект от использования данных созвездий наблюдается при использовании приемника с турбо обработкой, т.е. когда демодулятор и декодер охвачены одной обратной связью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: SCMA, NOMA, материнское созвездие, QPSK, код Грея, неортогональный множественный доступ, цифровые системы связи.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_3_363

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология SCMA – новая технология неортогонального множественного доступа (NOMA) [1] – [3], базирующаяся на кодовом разделении с последовательностями низкой плотности (Low Density Signature – LDS) [4], [5] и позволяющая получить дополнительный выигрыш от кодирования за счёт нелинейного формирования кодовых сигналов. Одной из важных составляющих эффективности использования SCMA является оптимизация материнского созвездия и параметров преобразования этого созвездия для формирования индивидуального сигнала каждого пользователя. В работах [6] – [8] представлены систематические методы проектирования кодовых книг для SCMA, а также некоторые методы построения материнских созвездий. В последнее время выдвинуто несколько новых алгоритмов проектирования кодовой книги SCMA [9] – [14]. Эти методы оптимизации ориентированы, в основном, на гауссовские каналы для линии «вниз» (Downlink) и направлены на оптимизацию индивидуальных углов поворота материнских созвездий для разных пользователей. В каналах линии «вверх» (Uplink) суммируемые сигналы разных пользователей имеют случайные фазы, а для каналов с замираниями ещё и

разные амплитуды [15], [16]. В этих условиях оптимизация параметров преобразования материнских созвездий не так сильно сказывается на эффективности систем связи с технологией SCMA как вид самих материнских созвездий.

В данной статье предлагается аналитический способ описания модулированных сигналов, основанный на двоичном разложении табличных функций, который может использоваться для синтеза и анализа созвездий сигналов с квадратурно-амплитудной модуляцией (Quadrature Amplitude Modulation – QAM). В качестве примера использования данного способа рассматривается синтез новых двумерных созвездий, которые могут использоваться как самостоятельно, так и в составе кодовых книг системы SCMA в качестве материнских созвездий.

2. АНАЛИЗ МАТЕРИНСКИХ СОЗВЕЗДИЙ ИЗВЕСТНЫХ КОДОВЫХ КНИГ SCMA

Рассмотрим созвездия, используемые в качестве материнских в системах SCMA со следующей конфигурацией: число пользователей $N_{us} = 6$, число ресурсов $N = 4$ (Загрузка (Overload) 150%), число ресурсов, используемых одним пользователем, $m = 2$, число пользователей, использующих один и тот же ресурс, $q = 3$, число бит, передаваемых одним пользователем в одном SCMA-блоке, $k = 2$. Данная конфигурация является наиболее исследованной и охватывает разные версии материнских созвездий.

Среди наиболее известных кодовых книг SCMA для этой конфигурации можно выделить следующие:

- кодовая книга Zhang’s (Zhang’s SCMA codebook) [13];
- кодовая книга Altera (Altera SCMA codebook) [7];
- кодовая книга Circular (Circular SCMA codebook) [14].

На Рис. 1, Рис. 2 и Рис. 3 приведены виды материнских созвездий (рисунки а) и б)) и распределения квадрата евклидовых расстояний между точками двумерных созвездий (рисунки с)) для перечисленных кодовых книг.

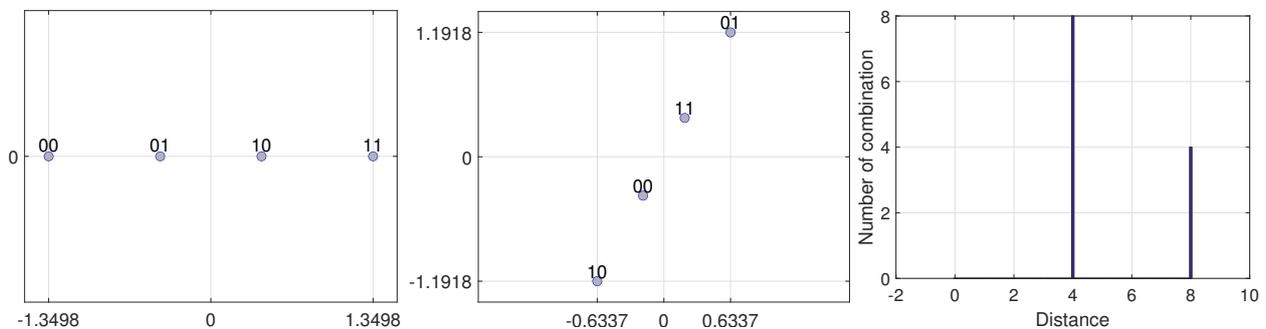


Рис. 1. Два созвездия и распределение расстояний между точками двумерного созвездия кодовой книги Zhang’s SCMA.

С точки зрения значений квадрата евклидового расстояния между сигнальными точками эти материнские созвездия ничем не отличаются. Однако, для систем с двоичным кодированием в большей степени имеет значение не только расстояние между точками, но и вес этого расстояния, выраженный в числе различающихся битов для комбинаций этих двух точек. Обычно для передачи двоичной информации в качестве комбинационного кодирования используется код Грея, при котором комбинации с большим числом различающихся битов имеют большее значение квадрата евклидового расстояния. Это позволяет уменьшить вероятность возникновения двойных, тройных и т.п. ошибок, что в итоге уменьшает среднюю вероятность ошибки на бит.

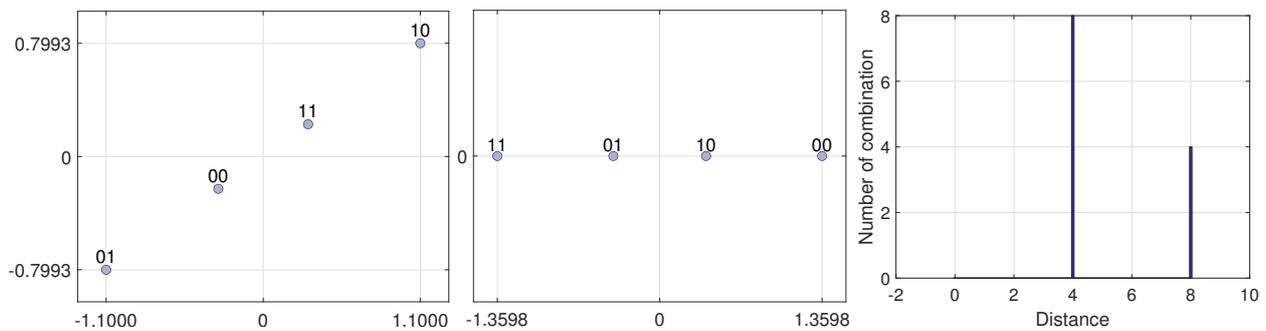


Рис. 2. Два созвездия и распределение расстояний между точками двумерного созвездия Altera SCMA codebook.

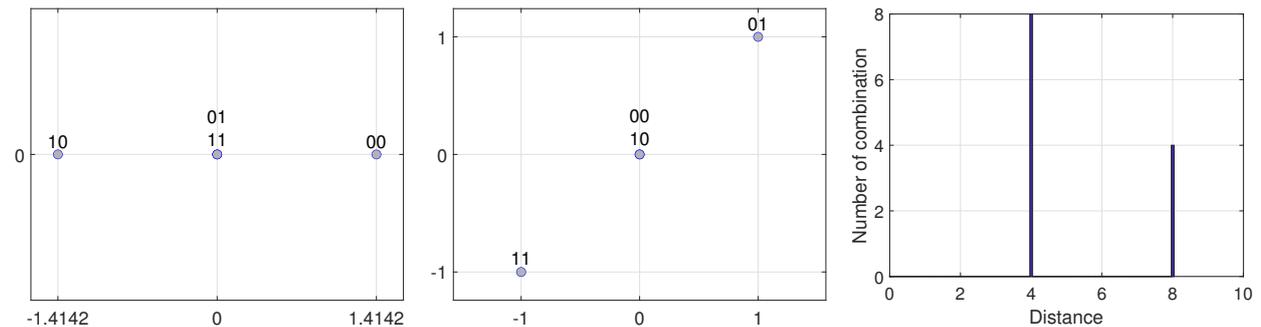


Рис. 3. Два созвездия и распределение расстояний между точками двумерного созвездия Circular SCMA codebook.

Следует отметить, что в последнее время для достижения максимальной энергетической эффективности используют приемники с турбо обработкой, когда обратная связь может охватывать декодеры, QAM- демодуляторы и многопользовательские демодуляторы [17], [20]. В основе такого приема лежат принципы турбо обработки [21]. Эффективность такой обработки сильно зависит от корреляционных связей между сигналами, символами и битами, участвующими при формировании группового сигнала на каждом этапе, и не всегда отдельная оптимальность формирования сигнала на отдельных этапах при отдельной обработке приводит к оптимальности всей системы при совместной итерационной обработке. Например, использование комбинационного кода Грея в системах с турбо обработкой оказывается неэффективным [22]. Особенно наглядно это проявляется при использовании модуляции QPSK, так как если проанализировать этот сигнал, то можно отметить, что разные биты в одном созвездии передаются на ортогональных квадратурных сигналах и, практически, не взаимодействуют между собой. Поэтому, использование дополнительной информации об этих битах, полученной при декодировании сигнала, не позволяет уточнить уже полученные оценки битов.

В связи с этим представляет интерес проанализировать известные материнские созвездия с точки зрения корреляционных связей между битами в созвездии, т.е. записать QAM-символы в виде функций от этих битов. Для этого можно использовать подход, описанный в [23].

В нашем случае каждое двумерное созвездие передает два униполярных бита $(\vartheta_1, \vartheta_2) \in \{0; 1\}$. Перейдём от униполярных битов к биполярным $(\theta_1, \theta_2) \in \{-1; 1\}$ путём следующего преобразования:

$$\theta_i = 1 - 2\vartheta_i, i = 1, 2. \tag{1}$$

В [7], [12], [13] материнские созвездия описаны в табличном виде, т.е. заданы комплексные значения $f_j^{(n)}$, где $n = 1, 2$ – номер материнского созвездия одной кодовой книги, $j = \overline{0, 2^k - 1}$

– номер точки созвездия, соответствующей определённой комбинации битов, k – число битов в созвездии.

Как показано в [23], каждое значение табличной функции $f_j^{(n)}$ может быть описано в виде функции от биполярных битов. Так, для табличной функции с 4-мя точками можно записать:

$$f_j^{(n)} = \kappa_0^{(n)} + \kappa_1^{(n)}\theta_1 + \kappa_2^{(n)}\theta_2 + \kappa_{12}^{(n)}\theta_1\theta_2, \quad (2)$$

где $\kappa_0^{(n)} \kappa_1^{(n)} \kappa_2^{(n)} \kappa_{12}^{(n)}$ – комплексные коэффициенты двоичного представления, $j = \vartheta_1 + 2\vartheta_2$ – номер значения функции, связанный с комбинацией двоичных битов ϑ_1, ϑ_2 , которые, в свою очередь, однозначно связаны со значениями биполярных битов θ_1, θ_2 обратным соотношением для (1), т.е. $\vartheta_i = \frac{(1-\theta_i)}{2}$.

Следует отметить, что в аналитическом описании (2) в явном виде видна взаимосвязь между битами (двоичными символами), в то время как традиционно используемые описания созвездий в виде таблицы значений комплексного QAM-символа или в виде графического отображения на комплексной плоскости, не позволяют увидеть наличие смешанной и независимых битовых составляющих, которые играют важную роль в свойствах сигнала.

Введём векторы значений комплексных символов созвездий $\mathbf{s}^{(n)} \triangleq [s_0^{(n)} s_1^{(n)} s_2^{(n)} s_3^{(n)}]^T$. Вектор коэффициентов $\boldsymbol{\kappa}^{(n)} \triangleq [\kappa_0^{(n)} \kappa_1^{(n)} \kappa_2^{(n)} \kappa_3^{(n)}]^T$ связан с вектором значений $\mathbf{s}^{(n)}$ преобразованием Уолша-Адамара [23]:

$$\boldsymbol{\kappa}^{(n)} = \frac{1}{2^k} \mathbf{H} \mathbf{s}^{(n)}, \quad (3)$$

где \mathbf{H} – матрица Адамара размером $(2^k \times 2^k)$.

Можно показать, что рассмотренные созвездия могут быть описаны аналитическими выражениями следующего вида:

1. Созвездия из кодовой книги Zhang's SCMA:

$$\begin{aligned} s^{(1)} &= 0.464\theta_1 + 0.886\theta_2, \\ s^{(2)} &= (-0.886\theta_1 + 0.464\theta_2) e^{1.082i}. \end{aligned} \quad (4)$$

2. Созвездия из кодовой книги Altera SCMA:

$$\begin{aligned} s^{(1)} &= (0.486\theta_1 - 0.874\theta_2) e^{0.628i}, \\ s^{(2)} &= (0.874\theta_1 + 0.486\theta_2). \end{aligned} \quad (5)$$

3. Созвездия из кодовой книги Circular SCMA:

$$\begin{aligned} s^{(1)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\theta_1 + \theta_1\theta_2), \\ s^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\theta_1 - \theta_1\theta_2) e^{i\frac{\pi}{4}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для многомерного созвездия квадрат евклидового расстояния между двумя точками, соответствующими комбинациям θ_1, θ_2 и v_1, v_2 , определяется общим соотношением:

$$D(\theta_1, \theta_2, v_1, v_2) = \sum_{n=1}^m \left| s^{(n)}(\theta_1, \theta_2) - s^{(n)}(v_1, v_2) \right|^2. \quad (7)$$

Введём понятие битовой ошибки $\varepsilon_i = \theta_i v_i$. Для неё видно, что $\varepsilon_i = 1$, если $\theta_i = v_i$, и $\varepsilon_i = -1$, если $\theta_i \neq v_i$. Таким образом, расстояние между двумя точками созвездия определяется комбинацией битов θ_1, θ_2 и комбинацией ошибок $\varepsilon_1, \varepsilon_2$.

В Табл. 1 приведены значения расстояния для разных созвездий при разных комбинациях битовых ошибок. Из этой таблицы следует следующее. Во-первых, для всех трёх созвездий расстояния при разных комбинациях ошибок не зависят от комбинации битов θ_1, θ_2 . Во-вторых, для созвездий кодовых книг Zhang's и Altera комбинации с двумя битовыми ошибками $\varepsilon_1 = -1, \varepsilon_2 = -1$ имеют максимальное расстояние, равное 8, в то время как для созвездий Circular для этого случая расстояние будет минимальным (равно 4), а максимальное расстояние соответствует комбинации для ошибки первого бита, т.е. $\varepsilon_1 = -1, \varepsilon_2 = 1$.

Таблица 1. Расстояние между точками материнских созвездий кодовых книг для разных комбинаций битовых ошибок

Кодовая книга	$\varepsilon_1 = -1, \varepsilon_2 = 1$	$\varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = -1$	$\varepsilon_1 = -1, \varepsilon_2 = -1$
Zhang's	4	4	8
Altera	4	4	8
Circular	8	4	4

Таким образом, первичный анализ известных материнских созвездий показал, что созвездия кодовых книг Zhang's и Altera практически имеют одинаковые свойства, а вот созвездия кодовой книги Circular, по всей видимости, будут проигрывать по вероятности ошибки на бит, так как минимальное расстояние соответствует большему числу ошибочных битов.

3. ОБОБЩЁННОЕ ОПИСАНИЕ СОЗВЕЗДИЙ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ИХ СВОЙСТВ

Пусть дано 4-х-точечное созвездие $s \in \{s_0, s_1, s_2, s_3\}$ с нулевым средним значением и единичной мощностью, т.е. $E\{s\} = 0, E\{|s|^2\} = 1$. В этом случае любая комбинация точек созвездия s может быть аналитически записана в следующем виде:

$$s = a\theta_1 + b\theta_2 + c\theta_1\theta_2, \tag{8}$$

где коэффициенты a, b, c должны удовлетворять следующему условию:

$$|a|^2 + |b|^2 + |c|^2 = 1. \tag{9}$$

В общем случае для многомерного созвездия с 4-мя точками можно записать следующие обобщённые выражения:

$$\mathbf{s} = \theta_1 \mathbf{a} + \theta_2 \mathbf{b} + \theta_1 \theta_2 \mathbf{c}. \tag{10}$$

Для двумерного созвездия векторные коэффициенты являются двумерными:

$$\mathbf{s} \triangleq \begin{bmatrix} s^{(1)} \\ s^{(2)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a} \triangleq \begin{bmatrix} a^{(1)} \\ a^{(2)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} \triangleq \begin{bmatrix} b^{(1)} \\ b^{(2)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c} \triangleq \begin{bmatrix} c^{(1)} \\ c^{(2)} \end{bmatrix}.$$

Из условия нормировки мощности каждого созвездия $E\{|s^{(n)}|^2\} = 1$, где $n = 1, 2$ – номер созвездия, следуют следующие соотношения:

$$\|\mathbf{a}\|^2 + \|\mathbf{b}\|^2 + \|\mathbf{c}\|^2 = 2. \tag{11}$$

Из описания (10) видно, что в состав сигнала входят три составляющие, две из которых зависят от каждого бита по отдельности, и одна, зависящая от произведения этих битов. Свойства сигналов и характеристики системы связи с этими созвездиями будут зависеть от соотношения этих составляющих. Рассмотрим параметры, определяемые этими составляющими.

1. Суммарные мощности составляющих каждого бита:

$$P_{s,i} = \|E_{\theta_1, \theta_2} \{\theta_i \mathbf{s}\}\|^2 = \begin{cases} \|\mathbf{a}\|^2 & \text{для } i = 1 \\ \|\mathbf{b}\|^2 & \text{для } i = 2 \end{cases}. \quad (12)$$

2. Суммарная мощность смешанной составляющей:

$$P_{s,12} = \|E_{\theta_1, \theta_2} \{\theta_1 \theta_2 \mathbf{s}\}\|^2 = \|\mathbf{c}\|^2. \quad (13)$$

3. Раздельные мощности составляющих по каждому созвездию:

$$P_{s,i,n} = \left| E_{\theta_1, \theta_2} \left\{ \theta_i s^{(n)} \right\} \right|^2 = \begin{cases} |a^{(n)}|^2 & \text{для } i = 1 \\ |b^{(n)}|^2 & \text{для } i = 2 \end{cases}, \quad (14)$$

$$P_{s,12,n} = \left| E_{\theta_1, \theta_2} \left\{ \theta_1 \theta_2 s^{(n)} \right\} \right|^2 = |c^{(n)}|^2.$$

4. Средние условные мощности составляющих:

$$P_{s,1|2} = E_{\theta_2} \left\{ \|E_{\theta_1} \{\theta_1 \mathbf{s}\}\|^2 \right\} = \|\mathbf{a}\|^2 + \|\mathbf{c}\|^2, \quad (15)$$

$$P_{s,2|1} = E_{\theta_1} \left\{ \|E_{\theta_2} \{\theta_2 \mathbf{s}\}\|^2 \right\} = \|\mathbf{b}\|^2 + \|\mathbf{c}\|^2.$$

Поясним некоторый физический смысл этих параметров и их возможное влияние на характеристики. Суммарные мощности составляющих $P_{s,1}$, $P_{s,2}$ определяют мощности сигналов, которые переносят информацию о каждом бите. По их относительным значениям можно судить о качестве демодуляции каждого бита. Для обеспечения одинакового качества демодуляции необходимо обеспечить равенства этих мощностей

$$P_{s,1} = P_{s,2} \Rightarrow \|\mathbf{a}\|^2 = \|\mathbf{b}\|^2. \quad (16)$$

Раздельные мощности составляющих $P_{s,i,n}$ несут в себе такой же смысл, но только при раздельном приеме сигнала каждого созвездия. Для систем связи с независимыми замираниями эти параметры будут характеризовать качество демодуляции при глубоком замирании одного из сигналов и возможность восстановления информации по одному сигналу.

Средние условные мощности составляющих $P_{s,1|2}$ и $P_{s,2|1}$ определяют мощность составляющей одного бита при условии, что второй бит точно известен. Эти параметры могут играть существенную роль при использовании демодулятора с декодером в обратной связи. Тогда бит с хорошим качеством декодирования позволит улучшить качество демодуляции другого бита. Эта возможность будет определяться параметрами $P_{s,1|2}$ и $P_{s,2|1}$.

Рассмотрим расстояния между парами точек созвездия, определяемыми двумя комбинациями битов (θ_1, θ_2) и $(\varepsilon_1 \theta_1, \varepsilon_2 \theta_2)$, где биполярные случайные величины $\varepsilon_i = \pm 1, i = 1, 2$, выполняют роль ошибок. Расстояние между этими двумя точками будет определяться выражением:

$$D(\theta_1, \theta_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2) = \|\theta_1(1 - \varepsilon_1)\mathbf{a} + \theta_2(1 - \varepsilon_2)\mathbf{b} + \theta_1\theta_2(1 - \varepsilon_1\varepsilon_2)\mathbf{c}\|^2. \quad (17)$$

В Табл. 2 приведены условия для обеспечения максимума минимального расстояния и значения этого расстояния для разных комбинаций ошибок. При выполнении условий, приведённых во втором столбце этой таблицы, минимальное расстояние между двумя точками комбинаций не зависит от исходной комбинации битов (θ_1, θ_2) .

Таблица 2. Условия максимизации минимального расстояния для разных комбинаций ошибок

$(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$	Условие	$D_{min, \varepsilon_1 \varepsilon_2}$
$(-1, 1)$	$\mathbf{a}'\mathbf{c} + \mathbf{c}'\mathbf{a} = 0$	$4\ \mathbf{a}\ ^2 + 4\ \mathbf{c}\ ^2$
$(1, -1)$	$\mathbf{b}'\mathbf{c} + \mathbf{c}'\mathbf{b} = 0$	$4\ \mathbf{b}\ ^2 + 4\ \mathbf{c}\ ^2$
$(-1, -1)$	$\mathbf{a}'\mathbf{b} + \mathbf{b}'\mathbf{a} = 0$	$4\ \mathbf{a}\ ^2 + 4\ \mathbf{b}\ ^2$

Из условия нормировки созвездий (11) имеем:

$$\|\mathbf{c}\|^2 = 2 - (\|\mathbf{a}\|^2 + \|\mathbf{b}\|^2). \tag{18}$$

В результате расстояния между точками будут описываться следующими выражениями:

$$\begin{aligned} D_{min, \varepsilon_1} &= 8 - 4\|\mathbf{b}\|^2, \\ D_{min, \varepsilon_2} &= 8 - 4\|\mathbf{a}\|^2, \\ D_{min, \varepsilon_1 \varepsilon_2} &= 8 - 4\|\mathbf{c}\|^2. \end{aligned}$$

Нетрудно заметить, что

$$\begin{aligned} \|\mathbf{a}\|^2 &= \|E_{\theta_1, \theta_2} \{\theta_1 \mathbf{s}\}\|^2 \triangleq P_{s,1}, \\ \|\mathbf{b}\|^2 &= \|E_{\theta_1, \theta_2} \{\theta_2 \mathbf{s}\}\|^2 \triangleq P_{s,2}, \end{aligned} \tag{19}$$

где $P_{s,1}, P_{s,2}$ – мощности составляющих двумерного сигнала, зависящие от 1-го и 2-го битов, соответственно. Аналогично,

$$\|\mathbf{c}\|^2 = \|E_{\theta_1, \theta_2} \{\theta_1 \theta_2 \mathbf{s}\}\|^2 \triangleq P_{s,12}, \tag{20}$$

где $P_{s,12}$ – мощности составляющих двумерного сигнала, зависящие и от 1-го и от 2-го битов.

Таким образом, распределяя мощности между отдельными составляющими, можно изменять значения минимальных расстояний для разных комбинаций ошибок от 0 до 8.

Это свойство позволяет осуществлять оптимизацию созвездий для разных условий применения. Рассмотренные ранее созвездия кодовых книг Zhang's и Altera имеют $P_{s,1} = P_{s,2} = 1$ и $P_{s,12} = 0$, а созвездия из кодовой книги Circular имеют $P_{s,1} = P_{s,12} = 1$ и $P_{s,2} = 0$.

4. ОПИСАНИЕ И СВОЙСТВА НОВОГО ВИДА СОЗВЕЗДИЙ ARROW

Воспользуемся результатами параграфа 2 для синтеза нового вида созвездий. Там были получены условия для обеспечения максимума минимальных расстояний для разных комбинаций ошибок. Они приведены в Табл. 2. Для того, чтобы вероятности ошибок первого и второго битов при детектировании были одинаковыми, необходимо, чтобы $D_{min, \varepsilon_1} = D_{min, \varepsilon_2}$. Отсюда следует ещё одно условие:

$$\|\mathbf{a}\|^2 = \|\mathbf{b}\|^2. \tag{21}$$

Для каналов с замираниями должна быть возможность детектирования всех битов при приеме только одного сигнала. Если при этом ещё необходимо обеспечить одинаковое качество детектирования всех битов по одному сигналу, то возникают следующие условия:

$$|a_i|^2 = |b_j|^2 = \alpha^2, \quad |c_i|^2 = \beta^2, \quad i = 1, 2, \quad j = 1, 2. \tag{22}$$

где α, β – некоторые коэффициенты, удовлетворяющие условию нормировки (9), из которого следует, что

$$\beta^2 = 1 - 2\alpha^2 \text{ или } \alpha^2 = \frac{1}{2}(1 - \beta^2). \quad (23)$$

Можно предложить разные варианты созвездий, удовлетворяющих условиям Табл. 2 и условиям (21)–(23). Рассмотрим один из таких вариантов созвездия

$$\begin{aligned} s^{(1)} &= \sqrt{\frac{(1 - \beta^2)}{2}} \left(\theta_1 e^{j\frac{\pi}{4}} + \theta_2 e^{-j\frac{\pi}{4}} \right) + \beta\theta_1\theta_2, \\ s^{(2)} &= \sqrt{\frac{(1 - \beta^2)}{2}} \left(\theta_1 e^{j\frac{\pi}{4}} + \theta_2 e^{-j\frac{\pi}{4}} \right) - \beta\theta_1\theta_2. \end{aligned} \quad (24)$$

Для созвездий такого вида минимальные расстояния для разных комбинаций ошибок будут зависеть от параметра β следующим образом:

$$\begin{aligned} D_{\min, \varepsilon_1} &= 4 + 4\beta^2, \\ D_{\min, \varepsilon_2} &= 4 + 4\beta^2, \\ D_{\min, \varepsilon_1 \varepsilon_2} &= 8 - 8\beta^2. \end{aligned} \quad (25)$$

На Рис. 4 показаны зависимости минимальных расстояний для разных комбинаций ошибок от параметра β^2 . При $\beta^2 = 0$ данное созвездие имеет такие же минимальные расстояния, как и созвездия из кодовых книг Zhang's и Altera. Кроме того, нетрудно заметить, что в этом случае созвездия (24) становятся обычными QPSK-созвездиями с кодом Грея. Увеличение β^2 позволяет увеличить минимальное расстояние для одиночных ошибок, но при этом уменьшает минимальное расстояние для парных ошибок. Следовательно, для разных условий применения возможны разные оптимальные значения параметра β^2 .

Виды созвездий (24) при разных значениях параметра $\beta^2 = (1/4; 1/5; 1/6)$ приведены на Рис. 5.

Здесь видно, что данный вид созвездий по форме похож на наконечник стрелы (Arrowhead), поэтому этот вид созвездий будем называть «Arrow». Особенность этого вида созвездий состоит в симметрии аналитической формы записи по отношению к двоичным битам как в одном созвездии, так и в разных созвездиях, т.е. перемены битов в созвездиях на свойства их демодуляции не влияет. С другой стороны, в отличие от известных созвездий, обладающих свойством центральной симметрии или свойством отображения созвездия самого на себя при некоторых углах вращения в канале, созвездие Arrow отображается само на себя только при повороте на 360 градусов. Как известно, отображение созвездия самого на себя при некоторых преобразованиях в канале приводит к возникновению эффекта обратного приема при квази-когерентном приеме [24], что требует использования относительных методов передачи (например, фазоразностной модуляции) или передачи дополнительных пилот-символов. Благодаря отсутствию эффекта отображения самого на себя при преобразовании в канале, предложенное созвездие допускает использование некогерентного (или «слепого») метода приема, а при квази-когерентном позволит снизить требования к частоте передачи пилот-символов.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОДНОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО РЕЖИМА

Для проверки эффективности использования новых созвездий было проведено моделирование. Для сравнения были также промоделированы известные созвездия, описанные в параграфе 1. Кроме того, чтобы проверить влияние разных свойств созвездий на характеристики,

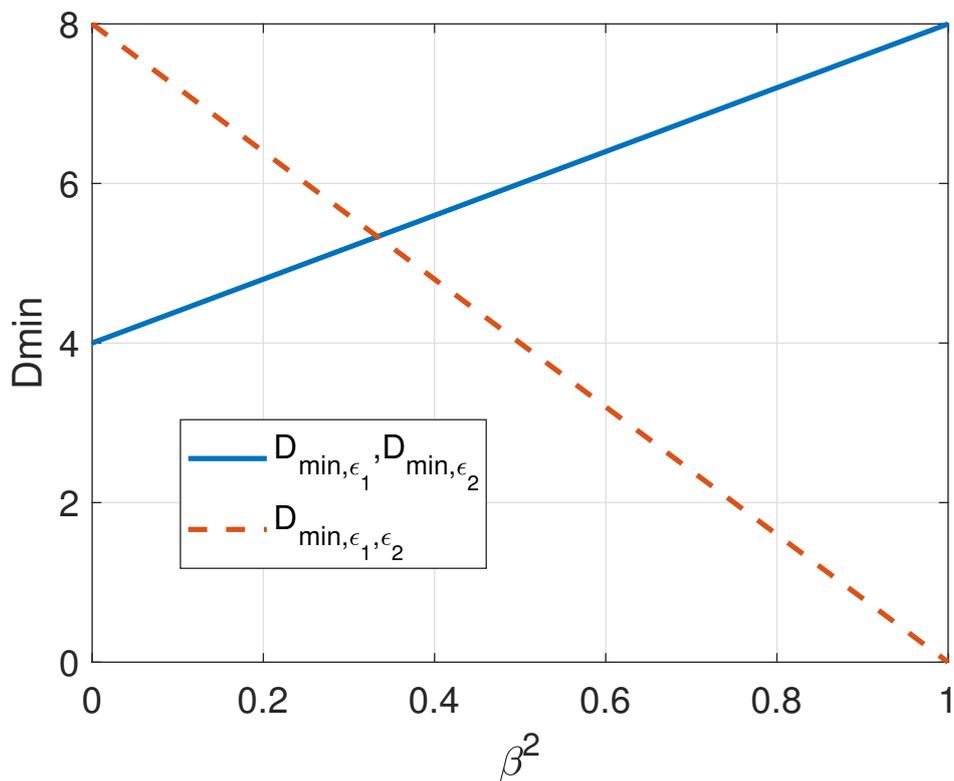


Рис. 4. Зависимости минимального расстояния для разных комбинаций ошибок от параметра β^2 .

также было рассмотрено двумерное созвездие, образованное объединением двух одномерных BPSK созвездий (2BPSK), т.е. созвездие следующего вида:

$$\begin{aligned} s^{(1)} &= \theta_1, \\ s^{(2)} &= \theta_2. \end{aligned} \tag{26}$$

На первом этапе исследования было проведено моделирование однопользовательской системы связи с кодированием, использующей двумерные созвездия с двумя независимыми ресурсами. Использовался канал с аддитивным белым гауссовским шумом (Additive White Gaussian Noise – AWGN) без замираний, со случайными фазами по каждому ресурсу. В качестве канального кода использовался турбокод со скоростью 1/2.

На Рис. 6 приведены зависимости вероятности битовой ошибки (Bit-Error-Rate – BER) без кодирования (Uncoded) от отношения сигнал/шум на бит (E_b/N_o) для разных двумерных созвездий. Характеристики созвездий кодовой книги Zhang’s и Altera, а также 2BPSK, практически полностью совпадают. Созвездия из кодовой книги Circular проигрывают всем остальным созвездиям около 1,5 дБ. Это объясняется тем, что данное созвездие для парных ошибок имеет наименьшее минимальное расстояние, что приводит к высокой частоте появления парных ошибок. Новые созвездия Arrow при отношениях $E_b/N_o > -1,5$ дБ ($BER < 0,12$) имеют характеристики лучше, чем известные созвездия, причем наблюдается тенденция увеличения выигрыша с ростом отношения сигнал/шум. Это объясняется тем, что созвездия Arrow при $\beta^2 = (1/5, 1/6)$ имеют большее минимальное расстояние для одиночных ошибок.

На Рис. 7 приведены зависимости вероятности кадровой ошибки (Frame-Error-Rate – FER) с кодированием от отношения (E_b/N_o) для разных двумерных созвездий для приемника с оптимальным мягким демодулятором и турбо декодером. Здесь созвездие Arrow с параметром $\beta^2 = 1/6$ обладает незначительным преимуществом (на 0,05 дБ) по сравнению с созвездиями

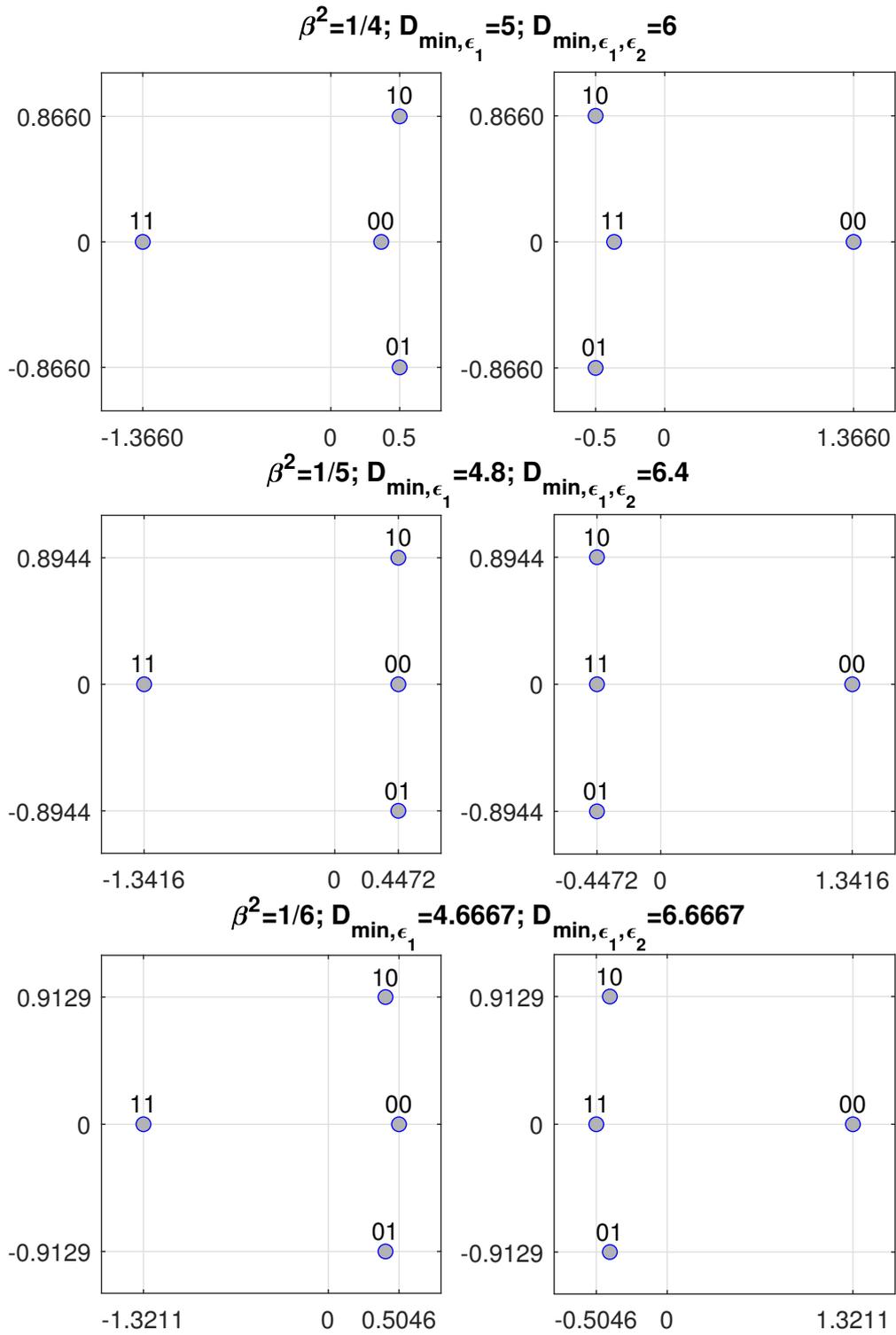


Рис. 5. Виды созвездий (24) при разных значениях параметра β^2 .

кодовых книг Zhang's, Altera и 2BPSK, и на 0,03 дБ лучше, чем созвездие Arrow с параметром $\beta^2 = 1/5$.

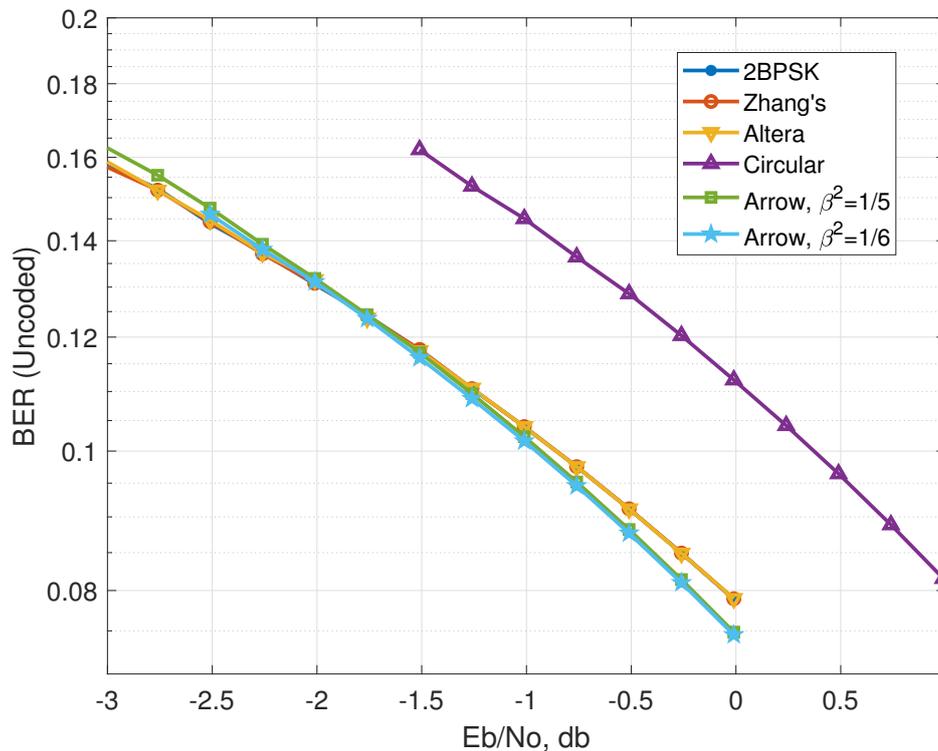


Рис. 6. Зависимости вероятности битовой ошибки (BER) без кодирования от отношения сигнал/шум на бит (E_b/N_0) для разных двумерных созвездий.

Как уже отмечалось, новые созвездия имеют в своём составе смешанную составляющую, зависящую и от первого и от второго битов. Предполагалось, что наличие этой составляющей должно положительно сказаться на характеристики системы при использовании приемника с декодером в цепи обратной связи, т.е. с турбо обработкой. Это подтверждается результатами моделирования на Рис. 8. Здесь приведены зависимости FER с кодированием от отношения E_b/N_0 для разных двумерных созвездий при приеме с декодером в обратной связи (3 итерации). Хорошо видно, что новые созвездия Arrow при наличии обратной связи улучшают характеристики системы на 0,4 дБ, в то время как характеристик системы с созвездиями кодовых книг Zhang's, Altera и 2BPSK, не имеющими смешанной составляющей, при наличии обратной связи не изменяются. Следует отметить, что созвездия кодовой книги Circular так же как и новые созвездия Arrow, обеспечивают улучшение характеристик на 0,4 дБ, поскольку они так же имеют в своём составе смешанную составляющую. Однако, этого улучшения недостаточно и они всё равно проигрывают новым созвездиям.

Таким образом, данное моделирование показало, что новые созвездия Arrow при их непосредственном использовании для передачи информации в однопользовательской системе обеспечивают лучшую энергетическую эффективность, чем известные созвездия, используемые в кодовой книге SCMA. Это объясняется, во-первых, тем, что они имеют большее минимальное расстояние для одиночных ошибок, и, во-вторых, наличие смешанной составляющей позволяет получить дополнительный выигрыш при приеме с декодером в обратной связи.

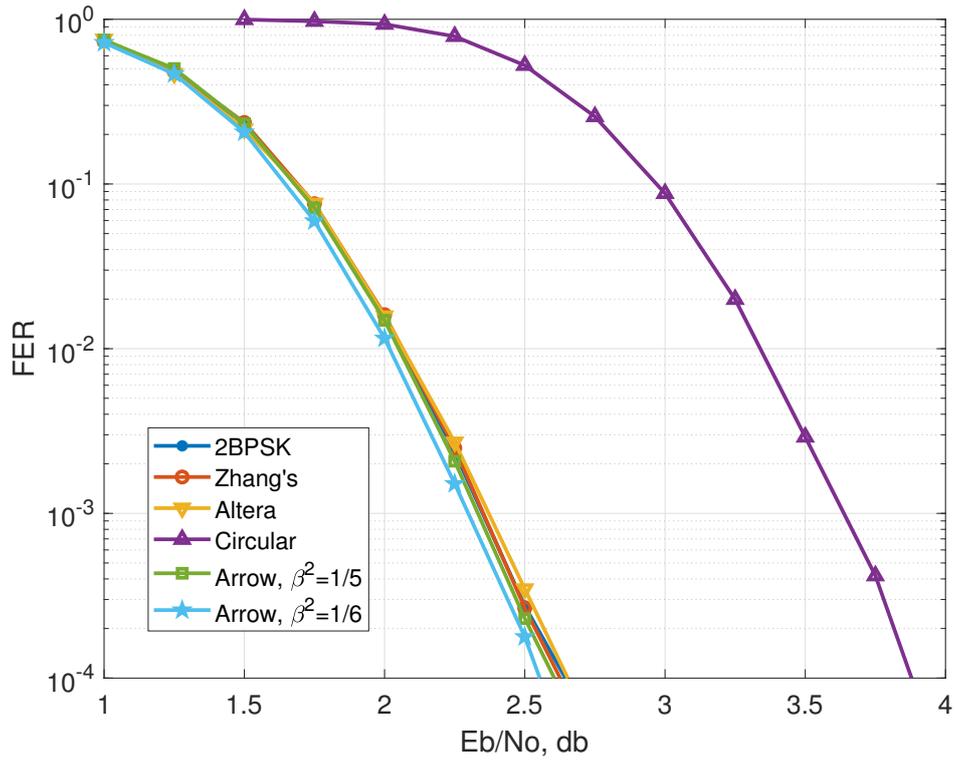


Рис. 7. Зависимости вероятности кадровой ошибки (FER) с кодированием от отношения сигнал/шум на бит (E_b/N_0) для разных двумерных созвездий.

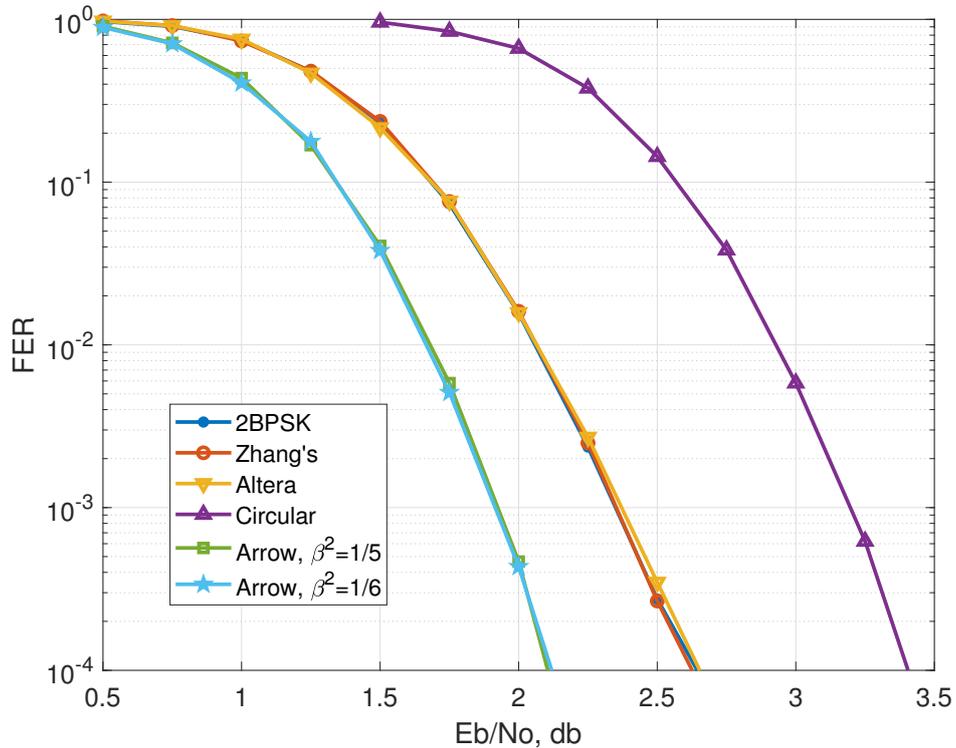


Рис. 8. Зависимости FER с кодированием от отношения E_b/N_0 для разных двумерных созвездий при приеме с декодером в обратной связи (3 итерации).

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ SCMA С НОВЫМИ СОЗВЕЗДИЯМИ ARROW

Результаты моделирования, приведённые в параграфе 4, показали эффективность самостоятельного использования предложенных двумерных созвездий Arrow в однопользовательской системе связи. Однако конечной целью данных исследований является улучшение характеристики SCMA-системы. Поэтому для проверки эффективности предложенных созвездий было проведено моделирование SCMA-системы с разными вариантами созвездий, включая предложенные.

Условия моделирования:

1. Конфигурация системы:

- число пользователей $N_{us} = 6$;
- число ресурсов $N_{res} = 4$;
- число бит, передаваемых одним пользователем в одном SCMA блоке $k = 2$ (число точек созвездия $M = 4$);
- число ресурсов, используемых одним пользователем, $m = 2$;
- число пользователей, использующих один и тот же ресурс, $q = 3$;

2. Канал с независимыми замираниями в каждом ресурсе каждого пользователя и дружными замираниями по времени.

3. Кодирование LDPC со скоростью 1/2.

4. Длина блока 2560 битов.

Поскольку моделирование проводилось для восходящей линии (Uplink), то при формировании кодовых книг дополнительное вращение созвездий для каждого пользователя не использовалось, так как при независимых случайных замираниях оно на характеристики системы не влияет. Распределение по ресурсам определялось шаблоном, который в данной конфигурации одинаковый для всех исследуемых вариантов.

Следует отметить, что предложенные созвездия могут использоваться для любых конфигураций системы SCMA, в которых число передаваемых бит одним пользователем в одном SCMA-блоке равно двум. Но в данной статье мы рассматриваем для сравнения наиболее исследованную конфигурацию (6 пользователей – 4 ресурса), которая встречается во многих работах [1], [2], [6], [7], [9], [11], [13], [14], [17].

Результаты моделирования приведены на Рис. 9 (прием без обратной связи) и Рис. 10 (прием с декодером в обратной связи – турбо обработка).

Из приведённых зависимостей видно, что использование новых созвездий Arrow в SCMA-системе позволяет получить выигрыш 0,75-0,8 дБ (при FER = 1%) с наилучшими результатами для кодовых книг Zhang's и Altera.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложено аналитическое описание многомерных созвездий и исследованы его свойства. На примере известных 4-х точечных материнских созвездий из кодовых книг SCMA проведён их анализ с использованием предложенного описания. а основе анализа свойств обобщённого описания предложен новый вид двумерного созвездия, названный Arrow. Полученные созвездия могут быть использованы как для генерации кодовых книг в системах множественного доступа, так и в качестве самостоятельных созвездий в однопользовательских системах связи для повышения энергетической эффективности. В однопользовательских системах связи их применение позволяет получить выигрыш около 0,4 дБ, по сравнению с квадратными QPSK-созвездиями с кодом Грея. В системах SCMA предлагаемые созвездия позволяют повысить помехоустойчивость на 0,7-0,8 дБ.

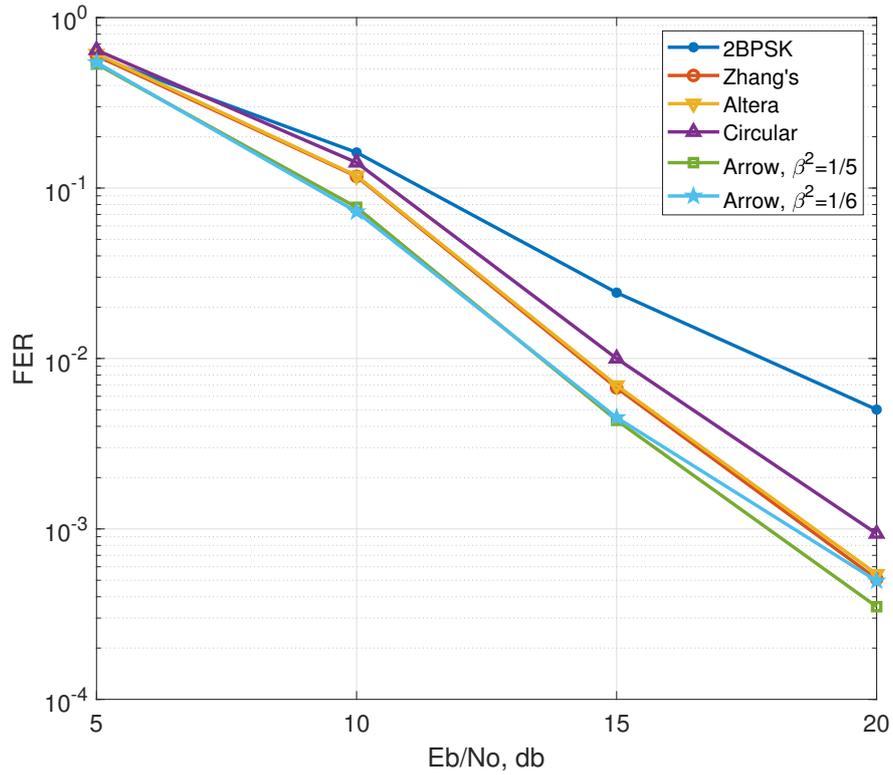


Рис. 9. Зависимости FER от отношения E_b/N_0 для SCMA-системы с разными созвездиями для неитерационного приемника.

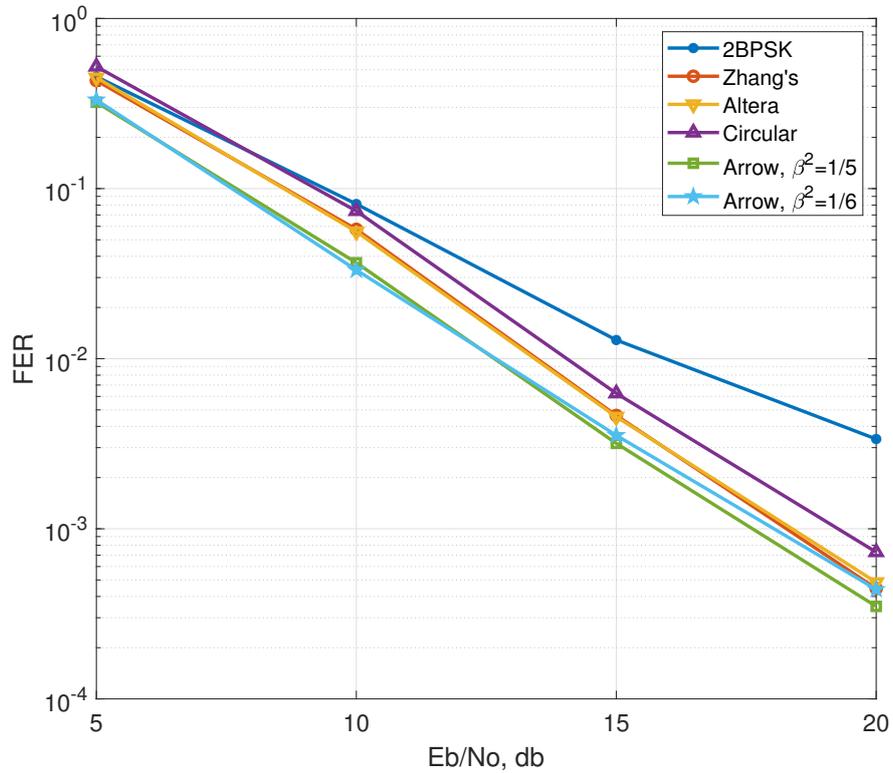


Рис. 10. Зависимости FER от отношения E_b/N_0 для SCMA-системы с разными созвездиями для приемника с декодером в обратной связи (3 итерации).

Наибольший эффект от использования предложенных созвездий достигается в системах связи, использующих итерационный прием с обратной связью, охватывающей демодулятор и декодер, т.е. итерационную турбо обработку.

Предложенный метод описания и анализа модулированных сигналов может быть распространён и на другие виды созвездий с модуляцией с более высокой кратностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikopour H., Baligh H. Sparse code multiple access. *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2013, pp. 332–336.
2. Nikopour H., Baligh M. Systems and methods for sparse code multiple access, *US Patent 9240853B2*, 2016.
3. Chaturvedi S., Liu Z., Bohara V., Srivastava A., Xiao P. A Tutorial on Decoding Techniques of Sparse Code Multiple Access. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 58503–58524, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3178127.
4. Hoshyar R., Wathan F.P., Tafazolli R., Novel low-density signatures for synchronous CDMA systems over awgn channel. *IEEE Transactions on Signal Processing*, April 2008, vol. 56, no. 4, pp. 1616–1626, doi: 10.1109/TSP.2007.909320.
5. Bakulin M.G., Ben Rejeb T.B.K., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. Classification of NOMA Schemes. *Proc. 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2023*, Moscow, 2023.
6. Taherzadeh M., Nikopour H., Bayesteh A., Baligh H. SCMA Codebook Design. In: *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, Vancouver, BC, Canada, 2014, pp. 1–5, doi: 10.1109/VTCFall.2014.6966170.
7. Altera Innovate Asia website, Presentation. *1st 5G Algorithm Innovation Competition-ENV1.0-SCMA*, <http://www.innovateasia.com/5g/en/gp2.html>.
8. Luo Q., Liu Z., Chen G., Ma Y., Xiao P. A novel multi-task learning empowered codebook design for downlink SCMA networks. In: *IEEE Wireless Communications Letters*, June 2022. vol. 11, no. 6, pp. 1268–1272.
9. Zhou Y, Yu Q., Meng W., Li C. SCMA codebook design based on constellation rotation. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France, pp. 1–6, 2017.
10. Mheich Z., Wen L., Xiao P. Maaref A. Design of SCMA Codebooks Based on Golden Angle Modulation. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Feb. 2019, vol. 68, no. 2, pp. 1501–1509, doi: 10.1109/TVT.2018.2886953.
11. Cai D., Fan P., Lei X., Liu Y., Chen D., Multi-Dimensional SCMA Codebook Design Based on Constellation Rotation and Interleaving, *Proc. 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Nanjing, China, 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/VTCSpring.2016.7504356.
12. Yan H., Zhao H., Lv Z., Yang H. A top-down SCMA codebook design scheme based on lattice theory. *Proc. 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Valencia, Spain, 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/PIMRC.2016.7794680.
13. Zhang S., Xiao K., Xiao B., Chen Z., Xia B., Chen D., Ma S. A capacity-based codebook design method for sparse code multiple access systems. *Proc. 2016 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, Yangzhou, China, 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/WCSP.2016.7752620.
14. Metkarunchit T. SCMA codebook design base on circular-QAM, *2017 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, Herndon, VA, USA, 2017, pp. 1–22, doi: 10.1109/ICNSURV.2017.8011992.
15. Bakulin M.G., Ben Rejeb T.B.K., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. Uplink NOMA-MIMO Systems with Rayleigh Power Distribution. *Sensors*. 2022, vol. 22, no. 11, DOI 10.3390/s22114002, EDN SXZTHL.

16. Ben Rejeb T.B.K., Bakulin M.G., Kreyndelin, V.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. Performance Analysis of Uplink Non-orthogonal Multiple Access (NOMA). *Proc. 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022*. Moscow, 2022, DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744088, EDN BAOMPS.
17. Huang C., Su B., Lin T., Huang Y., Downlink SCMA Codebook Design With Low Error Rate by Maximizing Minimum Euclidean Distance of Superimposed Codewords. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, May 2022, vol. 71, no. 5, pp. 5231–5245, doi: 10.1109/TVT.2022.3155627.
18. Bakulin M.G., Ben Rejeb T.B.K., Kreyndelin V.B., Pankratov D.Y., Smirnov A.E. Turbo Demodulation Algorithm for NOMA Systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2022, 67 (Suppl 2), pp. S255-S266.
19. Choi J.W., Singer A.C., Lee J., Cho N.I., Improved linear soft-input soft-output detection via soft feedback successive interference cancellation. In: *IEEE Transactions on Communications*, March 2010, vol. 58, no. 3, pp. 986–996, doi: 10.1109/TCOMM.2010.03.080469.
20. Bakulin M., Kreyndelin, V., Rog A., Petrov D., Melnik S. A New Algorithm of Iterative MIMO Detection and Decoding Using Linear Detector and Enhanced Turbo Procedure in Iterative Loop. *2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Moscow, Russia, 2019, pp. 40–46, doi: 10.23919/FRUCT.2019.8711962.
21. Бакулин М.Г. Турбо обработка: теория и приложения. *Научно-технические технологии*, 2003, № 3. стр. 18–26.
22. Pfletschinger S., Navarro M. A Low Complexity MIMO System Based on BICM with Iterative Decoding. *13th IST Mobile and Wireless Communications Summit. Lyon (France)*, 2004. June 27–30.
23. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. *Технологии в системах радиосвязи на пути к 5G*. М.: Горячая линия – Телеком, 2018.
24. Прокис Дж. *Цифровая связь*. М.: Радио и связь, 2000.

A new kind of mother constellations for SCMA systems

M.G. Bakulin, T.B.K. Ben Rejeb, V.B. Kreyndelin, D.Y. Pankratov, A.E. Smirnov

Sparse Code Multiple Access (SCMA) is a variation of non-orthogonal multiple access (NOMA) technology. SCMA communication systems use codebooks based on multidimensional constellations, which are generated using original mother constellations. The properties of these constellations largely determine the efficiency of the SCMA communication systems.

This article proposes new mother constellations for use in SCMA systems. The synthesis of the proposed constellations was carried out using a new analytical method for describing tabular functions in the form of a functional dependence of the signal on the vector of binary variables. This representation made it possible to reveal some patterns and determine the characteristics of constellations that affect the efficiency of their use. In particular, a new type of two-dimensional constellations with a parametric description, called Arrow constellations, is proposed. The proposed constellations belong to the class of multidimensional constellations and can be used both independently and in codebook synthesis in SCMA systems. The best effect from using these constellations is observed in SCMA systems with turbo receiver, in which both the demodulator and the decoder are being operated with the same feedback.

KEYWORDS: SCMA, NOMA, mother constellation, QPSK, Gray code, non-orthogonal multiple access, digital communication systems