

РАДИОТЕХНИКА, РАДИОЛОКАЦИЯ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.396

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МІМО СИСТЕМЫ СВЯЗИ
С ОТНОСИТЕЛЬНЫМ КОДИРОВАНИЕМ
ПРИ НАЛИЧИИ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ****А. Ю. Паршин**, к.т.н., доцент кафедры РТУ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-0110-3645, e-mail: parshin.a.y@rsreu.ru

В. Х. Нгуен, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0009-0007-4515-2111, e-mail: khanhkhankpr@gmail.com

*Изучаются характеристики, и оценивается эффективность системы связи, использующей относительное пространственно-временное блочное кодирование в Райсовском канале. Выполняется анализ пропускной способности канала при распространении сигнала в плотной среде при наличии рассеивателей, расположенных вблизи передающих и приемных устройств. Для оценки изменений амплитуды и фазы сигнала в процессе распространения используется трехмерная модель расположения рассеивателей, соответствующая стандарту COST-259. **Целью исследования** является изучение эффективности системы с использованием относительного блочного кодирования, при котором не требуется оценка канальной матрицы на приемной стороне. Моделирование выполнено при различных соотношениях мощностей прямого луча и диффузионной составляющей. В работе проводится анализ эргодической пропускной способности и вероятности битовой ошибки в зависимости от отношения сигнал-шум при использовании относительного кодирования. Результаты исследования показывают негативное влияние рассеивателей на эффективность канала связи и преимущества относительного кодирования по сравнению с кодированием Аламоути.*

Ключевые слова: Интернет вещей, МІМО, беспроводные сенсорные сети, относительное пространственно-временное блочное кодирование, пропускная способность, рассеиватели, кодирование Аламоути, COST-259, коэффициент Райса.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-89-3-11**Введение**

Широкое применение Интернета вещей (IoT), сопровождающееся значительным увеличением числа устройств, функционирующих в составе беспроводных сетей, приводит к повышению важности внедрения передовых технологий обеспечения связи, таких как МІМО и пространственно-временное блочное кодирование (STBC-Space Time Block Coding) [1]. Применение многоантенных технологий для обеспечения надежной и энергоэффективной связи между устройствами IoT также способствует увеличению пропускной способности, уменьшению задержки сигналов и расширяет возможности цифровой обработки сигналов. Технология МІМО, позволяющая одновременно передавать несколько потоков данных через несколько антенн, позволяет эффективно бороться с замираниями сигналов и увеличить скорость передачи данных. Одним из эффективных методов пространственного кодирования в системе МІМО является ортогональное блочное кодирование [2]. При его применении исходные данные разделяются на блоки символов. Выполняется кодирование по алгоритму, включающему как пространственное разделение излучаемых сигналов, так и временное. На приемной стороне используется информация, полученная от всех антенн, для разделения и декодирования символов. Линейные преобразования, такие как минимизация среднеквадратичной ошибки (MMSE) или максимальное правдоподобие (ML), позволяют восстановить

исходные данные с минимальными ошибками. Во многих случаях применения пространственно-временного кодирования характеристика канала известна только на приемной стороне. В таких системах передатчик отправляет пилотные сигналы, которые приемник использует для оценки состояния канала. Полученные оценки коэффициентов передачи применяются приемником для когерентного декодирования символов данных в течение одного временного интервала. Однако при быстро меняющихся условиях работы приемопередающей системы практически невозможно оперативно выполнять оценку параметров канала связи. В таких случаях необходимо рассмотреть возможность использования методов, которые не требуют оценки канала на передатчике или на приемнике. Для решения этой проблемы в работах [3, 4] представлен метод относительного кодирования, основанный на дифференциальной фазовой модуляции (differential phase-shift keying) и реализуемый с использованием принципов работы систем ММО. Относительное кодирование устраняет необходимость в точной информации о канале, что делает систему более устойчивой к изменяющимся условиям связи. **Целью работы** является анализ пропускной способности и помехоустойчивости системы ММО с относительным кодированием в райсовском канале при наличии рассеивателей вокруг передающей и приемной антенн. Расположение рассеивателей определяется с использованием трехмерной геометрической модели, соответствующей стандарту COST-259.

Алгоритм относительного кодирования

Рассмотрим системы ММО с N_{TX} передающими антеннами и N_{RX} приемными антеннами с применением фазовой модуляции $M - PSK$ (M – позиционность модуляции). Относительное кодирование является методом, при котором информация кодируется путем расчета разности фаз ближайших символов и присвоения кодовой последовательности полученному результату. Таким образом, информация кодируется не в самом символе, а в изменении между текущим и последующим символом. На приемной стороне для декодирования анализируются два последовательно принятых символа. Это позволяет приемнику определить изменение, которое произошло между двумя символами, и соответственно декодировать переданную информацию. Для успешного функционирования канала связи с относительным кодированием одним из ключевых требований является то, что изменения в состоянии канала во время передачи двух последовательных символов фазовой модуляции должны быть незначительными. Порядок модуляции определяется как $m = \log_2 M$. Можно представить созвездие модулирующего сигнала следующим образом [5]:

$$x_k = \frac{1}{\sqrt{N_{TX}}} e^{j \frac{2\pi k j}{M}}, k = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (1)$$

где k – номер сигнала модуляции. В каждый период передачи передаваемая последовательность бит $\mathbf{B} = \{0, 1\}$ размером N_{bl} делится на группы, состоящие из $N_{TX}m$ бит, и отображается сигналами созвездия $x_1, x_2, \dots, x_{N_{TX}}$. Из этих сигналов создается информационная матрица

символов $\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} x_{2i-1} & -x_{2i}^* \\ x_{2i} & x_{2i-1}^* \end{bmatrix}$, $i = 1, 2, \dots, \frac{N_{bl}}{2m}$. Полученная матрица представляет собой ортого-

нальную матрицу пространственно-временного блочного кодирования. Матрицы символов при относительном кодировании передаются путем последовательного перемножения. Тогда для случая $N_{TX} = 2$ матрица символов имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_0 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{S}_1 &= \mathbf{S}_0 \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{S}_2 &= \mathbf{S}_0 \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2 \\ &\dots \end{aligned}$$

$$\mathbf{S}_{\frac{N_{bl}}{2m}} = \mathbf{S}_0 \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2 \dots \mathbf{X}_{\frac{N_{bl}}{2m}}.$$

Обобщенная схема относительного пространственно-временного кодирования представлена на рисунке 1. Заметим, что информационная матрица должна удовлетворять условию ортогональности, значит $\mathbf{X}_i^H \mathbf{X}_i = \mathbf{I}$.

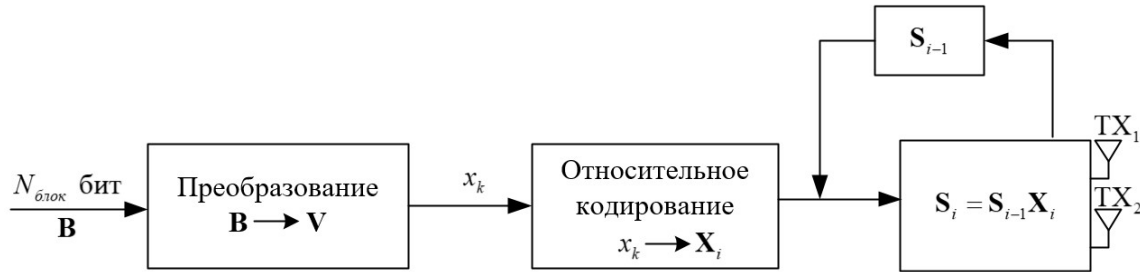


Рисунок 1 – Схема относительного кодирования
Figure 1 – Scheme of differential coding

При распространении сигнал проходит через канал связи, который характеризуется матрицей канальных коэффициентов $\mathbf{H}$, размерность которой определяется числом передающих N_{TX} и приемных N_{RX} антенн. Коэффициенты представляют собой амплитудно-фазовую характеристику канала связи между определенной парой антенн. Тогда принятый сигнал представляется следующим образом [6]:

$$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{q}{N_{TX}}} \mathbf{H} \mathbf{S} + \mathbf{V}, \quad (2)$$

где $\mathbf{V} = \{v_1, v_1, \dots, v_{N_{RX}}\}^T$ – вектор гауссовского шума в приемных антеннах; q – отношение сигнал-шум. Предположим, что за время передачи блока информационных символов свойства канала связи не меняются, следовательно, матрица канальных коэффициентов остается постоянной. Тогда в силу условия относительного кодирования можно преобразовать выражения для принятого сигнала:

$$\mathbf{Y}_i = \sqrt{\frac{q}{N_{TX}}} \mathbf{H} \mathbf{S}_{i-1} \mathbf{X}_i + \mathbf{V} = \mathbf{Y}_{i-1} \mathbf{X}_i + \tilde{\mathbf{V}}, \quad (3)$$

где $\tilde{\mathbf{V}} = \mathbf{Y}_{i-1} \mathbf{X}_i + \mathbf{V}$ – гауссовский процесс, определяемый действующим шумом в канале связи. Из выражения (3) видно, что при декодировании информационных символов достаточно знать текущие и предыдущие значения вектора наблюдаемого процесса. Декодирование выполняется аналогично схеме Аламути при условии известной матрицы канальных коэффициентов на приемной стороне. В качестве значений матрицы используются значения наблюдаемого процесса на предыдущем этапе наблюдения.

Декодирование основано на алгоритме максимального правдоподобия, который подразумевает выбор такой матрицы информационных символов $\mathbf{X}_i$, при которой достигается минимальное значение выражения $\|\mathbf{Y}_i - \mathbf{Y}_{i-1} \mathbf{X}_i\|^2$. На рисунке 2 показана схема относительного декодирования. В случае модуляции BPSK выбор осуществляется из набора матриц

$$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} x_{2i-1} & -x_{2i}^* \\ x_{2i} & x_{2i-1}^* \end{bmatrix}, \text{ где } x_i \in \{-1, 1\}. \text{ Таким образом, при использовании относительного про-}$$

странственно-временного кодирования на приемной стороне не требуется оценка матрицы канальных коэффициентов. Этот метод особенно полезен в условиях, когда канальные коэффициенты быстро меняются или их трудно точно определить. Например, при движении устройства с высокой скоростью.

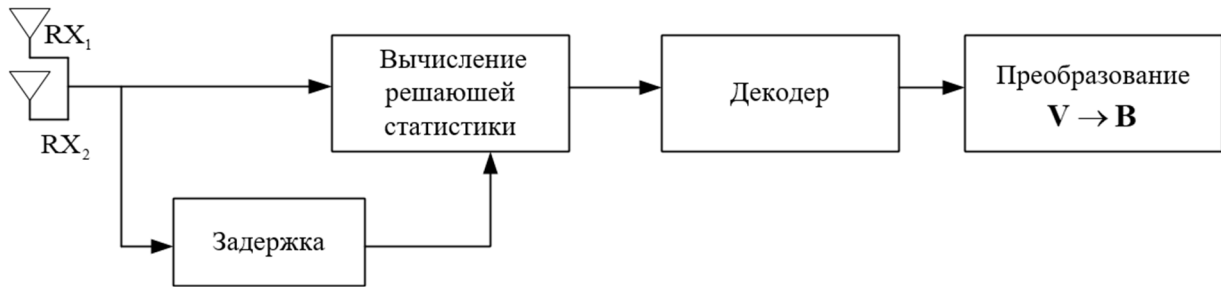


Рисунок 2 – Схема относительного декодирования
Figure 2 – Scheme of differential decoding

Геометрическая трехмерная модель расположения рассеивателей

В многоантенной системе связи важную роль играет многолучевое распространение сигнала, особенно при наличии рассеивателей, распределенных вблизи передающих и приемных устройств. Рассеиватели в системе связи играют важную роль в процессе распространения радиоволн. Они представляют собой объекты или элементы окружающей среды, которые взаимодействуют с радиоволнами. В контексте беспроводной связи рассеиватели могут быть естественными (например, деревья, горы) или искусственными (например, здания, транспорт, объекты в помещении). Они могут вызвать многолучевое распространение, когда радиоволна достигает приемника по нескольким путям, что может привести к ухудшению качества связи. Рассеяние сигнала приводит к искажениям не только амплитуды, но и фазы принимаемого сигнала. Учет расположения и характеристик рассеивателей важен при проектировании и оптимизации беспроводных систем связи. Согласно стандарту COST-259 расположение рассеивателей можно разделить на пять различных сценариев [9], которые обозначаются буквами A, B, C, D и E. Каждый сценарий формирует свою собственную ситуацию распространения сигналов, которая влияет на характеристики канала связи.

В данной работе для моделирования многолучевого распространения сигнала используется райсовский канал, который учитывает как рассеяние радиоволн, так и их распространение прямым лучом. Канальная матрица, связанная с прямым лучом, учитывает затухание и время задержки сигнала и имеет вид:

$$\mathbf{H}_{\text{LOS}} = \left\{ a_{\text{LOS}} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} D_{\text{TX}_k, l}}, k=1, \dots, N_{\text{TX}}, l=1, \dots, N_{\text{RX}} \right\},$$

где $D_{\text{TX}_k, l}$ – расстояние между k -й передающей антенной и l -й приемной антенной; a_{LOS} – коэффициент затухания прямого пути. Канальная матрица для рассеянных радиоволн может быть вычислена согласно уравнению [10]:

$$\mathbf{H}_{\text{DIF}} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_{k, l, n} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (D_{\text{TX}_k, l} + D_{\text{RX}_{l, n}})} e^{j \varphi_n}, k=1, \dots, N_{\text{TX}}, l=1, \dots, N_{\text{RX}} \right\},$$

где N – число рассеивателей; $D_{\text{TX}_k, n}$ и $D_{\text{RX}_{l, n}}$ – расстояния между k -й передающей антенной; n -м рассеивателем и l -й приемной антенной; φ_n – смещение фазы при отражении от рассеивающего объекта; λ – длина волны. С учетом прямого и рассеянного лучей при передаче радиоволн общую канальную матрицу можно получить весовым сложением соответствующих матриц $\mathbf{H}_{\text{LOS}}$ и $\mathbf{H}_{\text{DIF}}$:

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{H}_{\text{DIF}} + \sqrt{\frac{K}{K+1}} \mathbf{H}_{\text{LOS}}, \quad (4)$$

где K – коэффициент Райса, который устанавливает соотношение между мощностью прямого луча и рассеянных лучей [11].

Исследование эффективности методов кодирования

Для многоантенной системы связи с использованием пространственно-временного блочного кодирования в работе [7] получено выражение, позволяющее оценить достижимую пропускную способность:

$$C_{\text{MIMO}} = \begin{cases} \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_{RX}} + \frac{q}{N_{TX}} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right] & \text{если } N_{TX} > N_{RX} \\ \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_{TX}} + \frac{q}{N_{RX}} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right) \right] & \text{если } N_{TX} \leq N_{RX} \end{cases}, \quad (5)$$

где q – отношение сигнал-шум. В канале связи с замираниями матрица канальных коэффициентов рассматривается как случайная величина, что делает пропускную способность также случайной величиной. Определим эргодическую пропускную способность канала как среднее значение (4), (5) по набору реализаций $\mathbf{H}$: $C_E = \bar{C}$. Эргодическая пропускная способность системы ММО отражает среднюю скорость передачи данных через канал, учитывая статистическую изменчивость канальных условий. Она является важным показателем, позволяющим оценить эффективность передачи информации в условиях, когда параметры пространства сигнала изменяются во времени или в различных точках пространства. Применение пространственно-временного относительного кодирования может повысить помехоустойчивость системы, однако повышение в спектральной эффективности представляет собой более сложную задачу.

Для оценки качества связи применяется вероятность ошибки на бит (Bit Error Rate, BER), позволяющий сравнивать качество различных систем передачи данных. BER широко используется для определения эффективности передачи информации в цифровых системах. Значение BER вычисляется по следующему уравнению:

$$\text{BER} = \frac{N_{ERR}}{N_{BIT}},$$

где N_{ERR} – количество неправильно принятых бит, а N_{BIT} – общее количество принятых бит в заданном временном интервале.

В ходе исследования проведен анализ влияния расположения и характеристик рассеивателей на пропускную способность и помехоустойчивость системы связи с пространственно-временным кодированием в зависимости от отношения сигнал-шум (SNR) и от соотношения мощностей прямого луча и диффузионной составляющей. Пусть антенные системы передатчика и приемника представлены линейными эквидистантными антенными решетками, состоящими из N_{TX} и N_{RX} элементов соответственно, расположенных на расстоянии $d = \frac{\lambda}{2}$ друг от друга, λ – длина волны. Предполагаем, что в области размещения радиотехнических устройств существует $N=100$ рассеивателей, распределенных на поверхности сферы с радиусом $R = 50\lambda$. Координаты рассеивателей определяются угловым направлением в азимутальной и угломестной плоскости относительно приемника или передатчика по гауссовскому распределению. Допустим, что расстояние между центрами антенных систем передатчика и приемника равно $D = 500\lambda$. Результаты расчета эргодической пропускной способности ММО системы для различных сценариев распределения рассеивателей приведены на рисунке 3.

Сценарий D [9], при котором наблюдается малый угловой разброс рассеивателей для передатчика и приемника, обеспечивает лучшую пропускную способность канала связи по сравнению с другими сценариями.

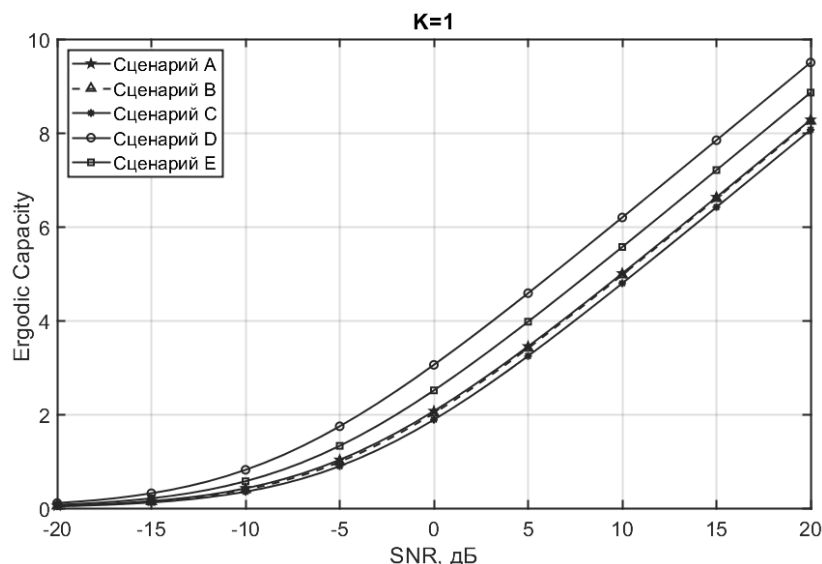


Рисунок 3 – Эргодическая пропускная способность в зависимости от SNR для различных сценариев распределения рассеивателей

Figure 3 – Ergodic capacity depending on SNR for various scenarios of scatterers distribution

Результаты моделирования показывают, что использование относительного пространственно-временного кодирования приводит к снижению спектральной эффективности, особенно заметному в системах с большим количеством антенн. В системе MIMO с пространственно-временным кодированием увеличение коэффициента Райса позволяет системе более эффективно использовать повышение мощности прямого сигнала в сравнении с рассеянными компонентами, что приводит к росту пропускной способности. Величины эргодической пропускной способности системы MIMO 8x8 при значении отношения сигнал/шум, равном 30 дБ, показаны в таблице. Показано, что, несмотря на снижение предельной пропускной способности при увеличении коэффициента Райса, применение пространственно-временного кодирования позволяет несколько увеличить реальную пропускную способность.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

Table 1 – Results of experimental studies

Коэффициент Райса К	0	0,5	1	5	10	100
Предельная пропускная способность	65,9	64,2	61,9	52,2	46,8	29,5
Пропускная способность системы STBC	11,8	12,0	12,3	12,7	12,9	13,0

В дальнейшем подробно рассмотрим сценарий А для нисходящей линии связи, в котором рассеиватели расположены только вблизи приемного устройства. На рисунке 4 представлена пропускная способность для сценария А при различном количестве передающих и приемных антенн в зависимости от отношения сигнал/шум (рисунок 4, а) и от коэффициента Райса (рисунок 4, б). Результаты моделирования сравниваются с предельной пропускной способностью. Полученные графики показывают преимущество системы связи с большим числом антенн, а также подтверждают небольшой рост пропускной способности при увеличении значения коэффициента Райса при использовании пространственно-временного кодирования.

Для сравнения помехоустойчивости относительного кодирования и кодирования Аламоути на рисунках 5 и 6 приведены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал-шум и от коэффициента Райса для систем MISO 2x1 и MIMO 2x2 в случае двоичной фазовой модуляции (BPSK).

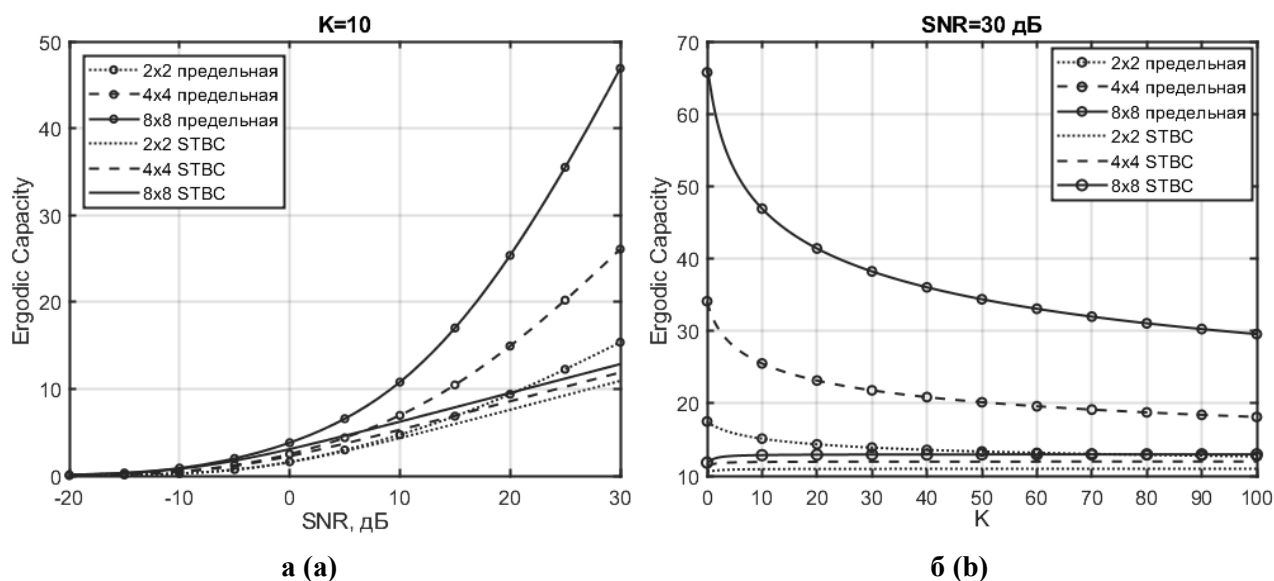


Рисунок 4 – Эргодическая пропускная способность системы MIMO с использованием STBC
а – в зависимости от SNR; б – в зависимости от коэффициента Райса

Figure 4 – Ergodic capacity of MIMO system using STBC
a – depending on SNR; b – depending on Rician factor

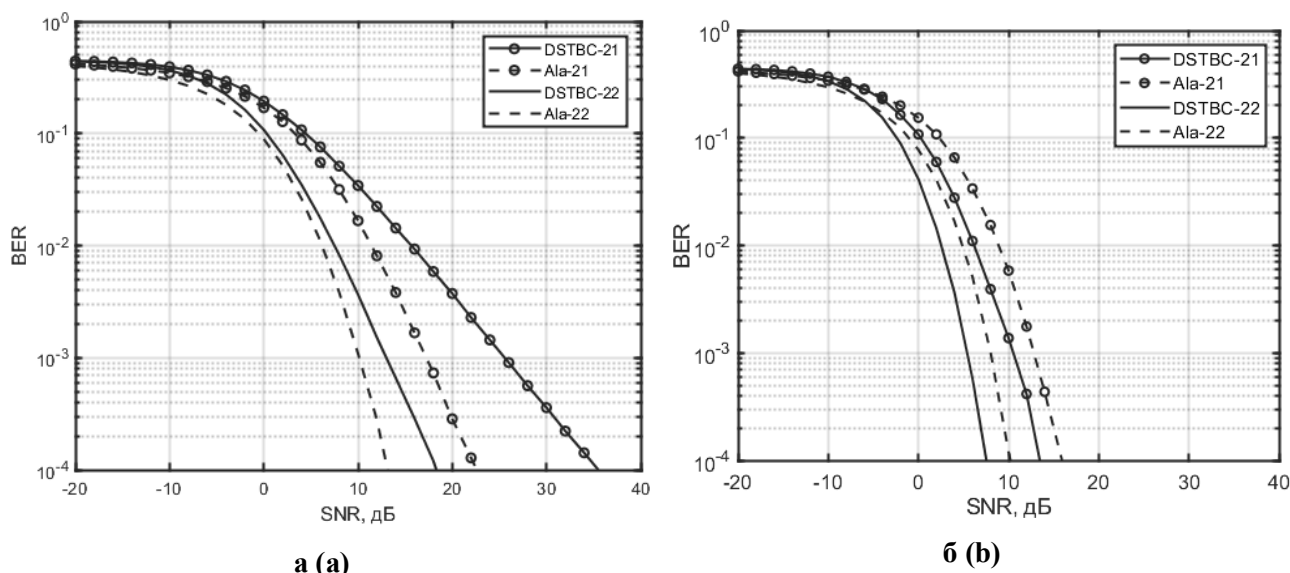


Рисунок 5 – Зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум
при разных значениях коэффициента Райса: а – $K=0$; б – $K=5$

Figure 5 – Error probability dependence on signal-to-noise ratio
at different values of Rice factor: а – $K=0$; б – $K=5$

Можно увидеть, что при увеличении коэффициента Райса эффективность относительно-го кодирования становится выше, чем для кодирования Аламоути. Причина этого заключается в том, что относительное кодирование лучше справляется с многолучевыми условиями, которые обычно присутствуют при высоких значениях коэффициента Райса. Увеличение числа антенн также позволяет снизить вероятность битовой ошибки.

На рисунке 6 приведены графики вероятности битовой ошибки в зависимости от коэффициента Райса, которые показывают преимущество относительных методов кодирования при сильной многолучевости. В свою очередь, при малом коэффициенте Райса более эффективны методы блочного пространственно-временного кодирования.

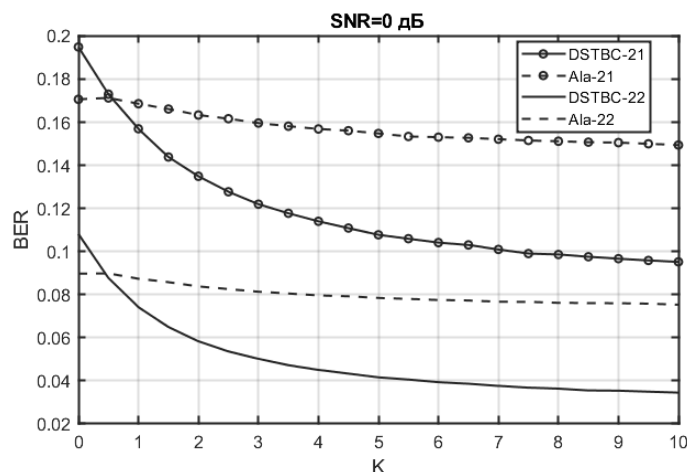


Рисунок 6 – Зависимости вероятности ошибки от коэффициента Райса

Figure 6 - Error probability dependence on Rice factor

Заключение

Результаты исследований, проведенных в настоящей работе, показывают, что использование относительного пространственно-временного кодирования не даёт выигрыша по спектральной эффективности. Однако в райсовском канале с рассеивателями при преобладании прямого луча этот метод может обеспечить выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с блочным кодированием Аламоути. Кроме того, применение относительного кодирования не требует наличия знания характеристик канала на приёмной стороне, что позволяет применять его в каналах с быстрыми замираниям. Рассматриваемый метод заслуживает особого внимания при разработке и оптимизации систем беспроводной связи, в том числе для плотных сред с переменными параметрами среды, в которых может происходить быстрое изменение как расположения рассеивателей, так и характеристик распространения сигнала.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант РНФ 24-29-00850, <https://rscf.ru/en/project/24-29-00850/> в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Саломатин С.Б. Кодирование информации в сетях подвижной связи. Минск: БГУИР, 2017. 78 с.
2. Vucetic B., Yuan J. Space-time coding. John Wiley & Sons Ltd, 2003, 352 p.
3. Hughes B.L. Differential space-time modulation. IEEE Transactions on Information Theory. 2000. Vol.16. No.7. Pp. 2567-2578.
4. Токарь М.С., Рябов И.В. Метод дифференциального пространственно-временного блочного кодирования для применения в системах подвижной радиосвязи с использованием технологии ММО // Журнал Радиоэлектроники. 2021. № 6.
5. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 244 с.
6. Паршин Ю.Н. Пространственно-временная обработка сигналов и компенсация помех. М.: КУРС, 2021. 200 с.
7. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Елохин А.В. Пространственная обработка сигналов в ММО системах сотовой связи. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2020. 134 с.
8. Нгуен В.Х., Паршин А.Ю. Оценка эффективности демодуляции сигналов ММО системы связи при трехмерном моделировании расположения рассеивателей // 26-я международная конференция по цифровой обработке сигналов и ее приложениям (DSPA). 2024. С. 1-4.
9. Паршин А. Ю., Нгуен В.Х. Разработка модели и классификация ММО каналов связи в трехмерной системе координат // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 4. С. 41-46.
10. Нгуен В.Х., Паршин А.Ю. Эффективность относительного пространственно-временного кодирования при наличии рассеивателей // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXX МНТК. 2024. Т. 4. С. 361-366.

11. **Parshin Y.N., Parshin A.Y., Grachev M.V.** Influence of Signal and Interference Spatial Correlation on the MIMO Communication System's Channel Capacity // 24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications. 2022. Pp.1-5.

UDC 621.396

PERFORMANCE ANALYSIS OF MIMO COMMUNICATION SYSTEM WITH DIFFERENTIAL CODING IN THE PRESENCE OF SCATTERERS

A. Yu. Parshin, Ph.D. (Tech.), associate professor, Department of Radio Engineering Devices, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-0110-3645, e-mail: parshin.a.y@rsreu.ru

V. Kh. Nguyen, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia.

orcid.org/0009-0007-4515-2111, e-mail: kxanhkxanhkpr@gmail.com

This paper studies the characteristics and performance of a communication system using differential space-time block coding in Rice channel. Channel capacity is analyzed in the presence of scatterers located in the region where transmitting and receiving devices are installed. A three-dimensional COST-259 compliant model of scatterer locations is used to estimate the changes in signal amplitude and phase during propagation. The aim of the study is to study system performance using differential block coding, which requires no estimation of channel matrix at a receiving end for different power ratios of direct beam and diffusion component. This work analyzes ergodic capacity and bit error probability as a function of signal-to-noise ratio when using differential coding. The results show the negative effect of scatterers on link efficiency and the advantages of differential coding with Alamouti coding.

Keywords: Internet of Things, MIMO, wireless sensor networks, differential space-time block coding, capacity, scatterers, Alamouti coding, COST-259, Rice factor.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-89-3-11

References

1. **Salomatin S.B.** Kodirovanie informacii v setjah podvizhnoj svyazi (Information coding in mobile communication networks). Minsk: BGUIR. 2017, 78 p. (in Russian).
2. **Vucetic B., Yuan J.** Space-time coding. John Wiley & Sons Ltd. 2003, 352 p.
3. **Hughes B.L.** Differential space-time modulation. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2000, vol.16, no.7, p.2567-2578.
4. **Tokar M.S., Rjabov I.V.** Metod differencial'nogo prostranstvenno-vremennogo blochnogo kodirovanija dlja primeneniya v sistemah podvizhnoj radiosvyazi s ispol'zovaniem tehnologii MIMO. *Zhurnal Radioelektroniki*. 2021, no 6. (in Russian).
5. **Bakulin M.G., Varukina L.A., Krejndelin V.B.** Tehnologija MIMO: principy i algoritmy (MIMO technology: principles and algorithms). Moscow: Gorjachaja linija – Telekom. 2014, 244 p. (in Russian).
6. **Parshin Yu.N.** Prostranstvenno-vremennaja obrabotka signalov i kompensacija pomeh (Spatial and time signal processing and interference compensation). Moscow: KURS. 2021, 200 p. (in Russian).
7. **Ermolaev V.T., Flaksman A.G., Elohin A.V., Sorokin I.S.** Prostranstvennaja obrabotka signalov v MIMO sistemah sotovoj svyazi (Spatial signal processing in MIMO cellular communication systems). Nizhny Novgorod: Izd-vo NNGU im. N.I. Lobachevskogo. 2020, 134 p. (in Russian).
8. **Nguyen V.K., Parshin A.Yu.** Ocenka jeffektivnosti demoduljacji signalov MIMO sistemy svyazi pri trehmernom mode-lirovanii raspolozhenija rasseivatelej. 26-ja mezhdunarodnaja konferencija po cifrovoj obrabotke signalov i ee prilozhenijam (DSPA). 2024, pp. 1-4. (in Russian).
9. **Parshin A. Yu., Nguyen V. K.** Razrabotka modeli i klassifikacija MIMO kanalov svyazi v trehmernoj sisteme koordinat. *Cifrovaja obrabotka signalov*. 2023, no. 4, pp. 41-46. (in Russian).
10. **Nguyen V.K., Parshin A.Yu.** Jeffektivnost' otnositel'nogo prostranstvenno-vremennogo kodirovanija pri nalichii rasseivatelej. *Radiolokacija, navigacija, svjaz: sbornik trudov XXX MNTK*. 2024, vol. 4, pp. 361-366. (in Russian).
11. **Parshin Y.N., Parshin A.Y., Grachev M.V.** Influence of Signal and Interference Spatial Correlation on the MIMO Communication System's Channel Capacity. 24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications. 2022, pp. 1-5.