

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.396.946

Фам
Хю Ань

Адаптивная пространственно-временная обработка сигналов в мобильной
системе связи

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-39 80 01 «Радиосистемы и радиотехнологии»

Научный руководитель
Саломатин Сергей Борисович
Доцент кафедры ИРТ, БГУИР
Кандидат технических наук, доцент

Минск 2022

ВВЕДЕНИЕ

Беспроводная связь является одной из наиболее быстро развивающихся технологий в наше время, и почти ежедневно появляются новые великолепные продукты и услуги. Главной технической проблемой в беспроводной связи является замирание, вызванное многолучевым распространением, а именно случайные колебания усиления канала, возникающие из-за рассеяния передаваемых сигналов от объектов, находящихся между передатчиком и приемником.

Поскольку доступный спектр радиочастот ограничен, более высокие скорости передачи данных могут быть достигнуты только за счет разработки более эффективных методов передачи сигналов. Недавние исследования в области теории информации показали, что значительный прирост пропускной способности связи по беспроводным каналам возможен с использованием многоканальной технологии *MIMO*.

Пространственно-временное (П-В) кодирование представляет собой набор практических методов проектирования сигналов, направленных на приближение к теоретико-информационному пределу пропускной способности каналов *MIMO*. П-В коды основаны на введении совместной корреляции в передаваемые сигналы как в пространственной, так и во временной областях. Системы П-В кодов, применение алгоритмов декодирования на приемнике и *MIMO* считаются наиболее вероятными кандидатами на роль будущих систем с высокими помехоустойчивостью и скоростью передачи данных.

В системах *MIMO*, если информация о состоянии канала (*CSI*) известна на передающих антеннах, можно использовать предварительное кодирование (прекодирование) для дальнейшего улучшения эффективности системы на основе различных критериев синтеза алгоритмов прекодирования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Решение задачи повышения пропускной способности перспективных систем передачи информации особенно актуально для сложных условий распространения сигналов.

Релеевские замирания, обусловленные интерференцией большого числа рассеянных сигналов и сильным ослаблением основного сигнала, являются наиболее глубокими и приводят к увеличению вероятности ошибки при приеме сообщений.

Среди различных методов разнесения на передаче перспективным является П-В кодов, реализация которых предполагает не только передачу информационных сигналов через несколько антенн, но и соответствующее их кодирование, что с учетом адекватной обработки их в приемнике по сравнению с некодированной передачей через одну антенну должно обеспечить выигрыш как от разнесения, так и от кодирования.

Степень разработанности проблемы

Беспроводная связь является одной из наиболее быстро развивающихся технологий в наше время. Главной технической проблемой в беспроводной связи является замирание, вызванное многолучевым распространением. Многолучевое рассеяние обычно рассматривается как ухудшение беспроводной связи, его также можно рассматривать как возможность значительно повысить помехоустойчивость системы (уменьшить вероятность ошибки), повысить скорость передачи информации в системе, увеличить зону покрытия, уменьшить требуемую мощность передатчика.

Самым первым П-В кодом для двух передающих антенн был код Аламоути. Код использует алгебру деления с умножением в кольце кватернионов. Поскольку кватернионы образуют алгебру деления, такие матрицы должны быть обратимыми, то есть результирующий П-В код удовлетворяет критерию ранга.

В этой связи представляет интерес разработка и анализ адаптивных кодов для технологий *MIMO* на основе алгебры деления для изменяющихся каналов передачи со сложными условиями распространения сигналов.

Было исследовано, что прирост пропускной способности связи по беспроводным каналам возможен в системах с помощью многоканальной технологии *MIMO*. Среди различных способов использования технологии *MIMO* являются П-В коды, алгоритмы декодирования П-В кодов, и использование *CSI* на передатчике в *MIMO*-системах с обратной связью, так и позволяют получить указанные положительные свойства.

Цель и задачи исследования

Разработка программ П-В кодирования и декодирования алгебраических кодов *MIMO*.

Разработка и анализ эффективности адаптивных П-В кодов систем, позволяющих повысить качество приема в изменяющихся *MIMO*-каналах со сложным распространением сигналов.

Объект исследования

Многоканальные технологии *MIMO*, реализующие передачу кодированной информации с использованием нескольких пространственных каналов.

Предмет исследования

Пространственно-временные алгоритмы кодовых систем кодирования сигналов в *MIMO* структурах передачи и приема.

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты известных исследований белорусских и зарубежных специалистов в области цифровой связи и цифровой модуляции.

Все расчеты и полученные результаты подтверждались результатами моделирования.

Информационная база исследования сформирована на основе литературы, открытой информации, технических нормативно-правовых актов, сведений из электронных ресурсов, а также материалов научных конференций и семинаров.

Научная новизна

1. Полученные числовые характеристики достоинств и недостатков объекта исследования.

2. Полученные разработанные программы моделирования исследуемого П-В кодов, исследуемых алгоритмов кодирования и декодирования на приемнике, и использования *CSI* на передатчике на основе обратной связи.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Алгоритмы, результаты моделирования и сравнительный анализ. Моделирование П-В кодов в среде *MATLAB* и эффективность П-В кодов на основе использования разнесения антенн.

2. Алгоритмы, результаты моделирования и сравнительный анализ. Моделирование П-В кодов в среде *MATLAB* и эффективность П-В кодов на основе алгебраической структуры.

3. Алгоритмы, результаты моделирования и сравнительный анализ. Моделирование алгоритмов декодирования в среде *MATLAB* и эффективность использования алгоритмов декодирования на приемнике в системе *MIMO*.

4. Моделирование использования *CSI* на основе обратной связи в среде *MATLAB* и эффективность использования *CSI* на передатчике.

Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на научно-технической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020» БГУИР 28-29 октября 2020 г., Минск; на 58-й научных конференциях студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР; и на международным научно-техническом семинаре «Технологии передачи и обработки информации» БГУИР.

Публикации

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 3 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций. Общий объем публикаций 10 страниц.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четыре главы с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе рассматриваются обзор литературы П-В кодов, критерий синтеза П-В кодов, моделирование П-В кодов и сравнительный анализ эффективности кодирования.

Во второй главе рассматриваются П-В кодов на основе алгебраической структуры, моделирование П-В кодов и сравнительный анализ эффективности кодирования.

В третьей главе рассматриваются алгоритмы декодирования на приемнике, моделирование алгоритмов декодирования и сравнительный анализ эффективности алгоритмов.

В четвертой главе рассматриваются адаптивные системы *MIMO* с обратной связью, использование *CSI* на передатчике, моделирования адаптивных систем *MIMO* и сравнительный анализ эффективности алгоритмов.

Общий объем магистерской диссертации составляет 95 страницы. Из них 70 страниц основного текста, 67 иллюстраций, библиографический список из 59 наименований, список собственных публикаций соискателя из 3 наименований, 3 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводятся обоснование актуальности работы, технология *MIMO*, структурная схема системы цифровой связи *MIMO*.

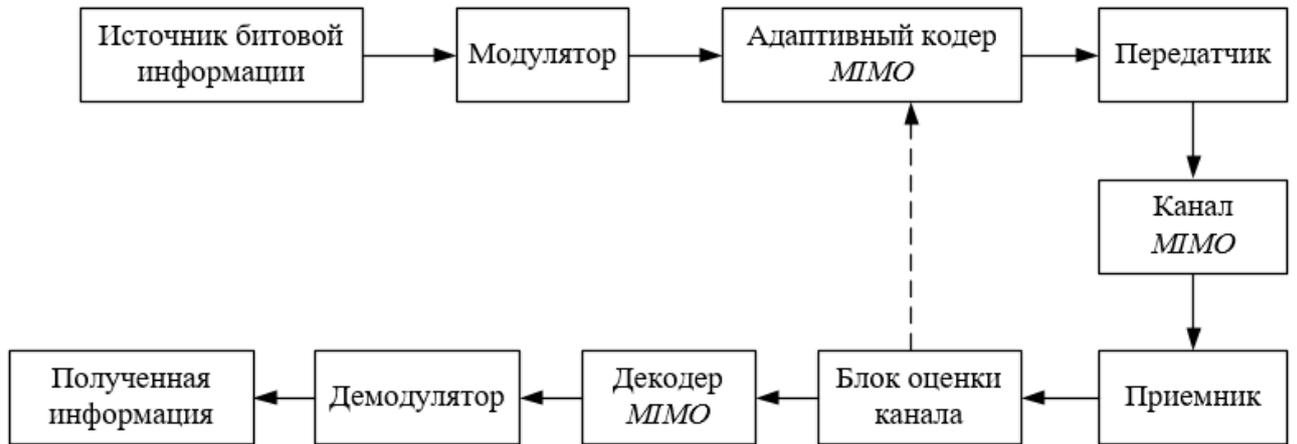


Рисунок 1 – Структурная схема системы цифровой связи *MIMO*.

Адаптивная *MIMO* заключается в использовании П-В кодов, алгоритмов декодирования на приемнике, информации о состоянии канала с помощью обратной связи, критерии синтеза алгоритмов прекодирования: критерий взаимной информации; критерий минимума вероятности попарной ошибки; критерий минимума среднеквадратической ошибки.

В **первой главе** носит обзор характер, в нем даны структурная схема системы *MIMO*, принцип разнесенной передачи по задержкам, схема Аламоути, ортогональные пространственно-временные блочные коды (П-В Б К) и неортогональные П-В Б К.

Система *MIMO* с П-В кодом с N передающими антеннами и M приёмными антеннами.

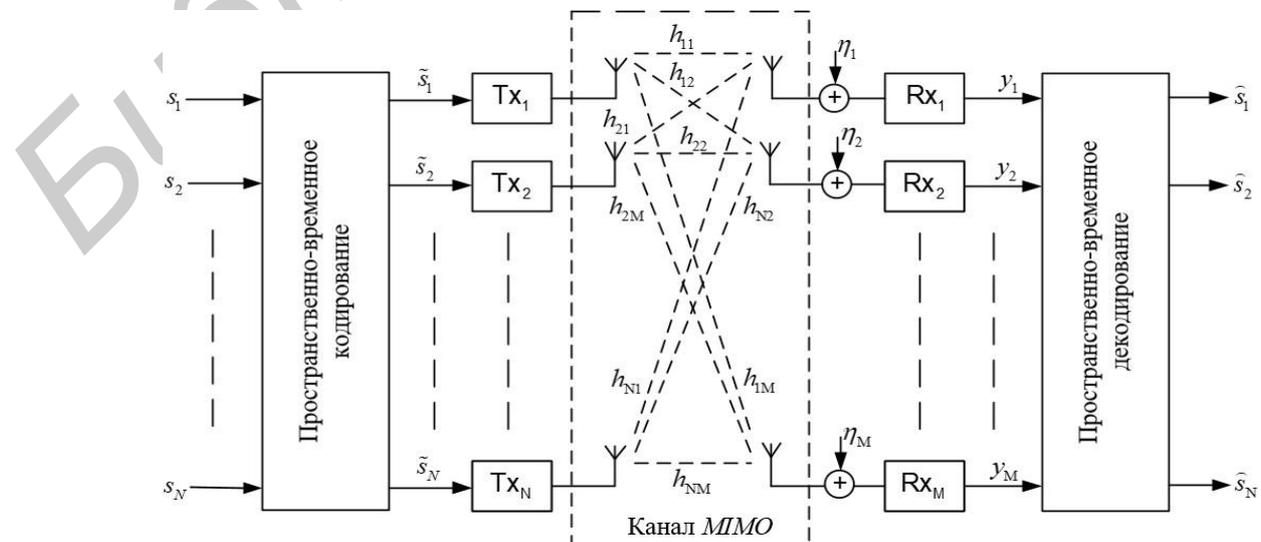


Рисунок 2 – Структурная схема системы *MIMO* с П-В кодом.

Модель принимаемого сигнала на входе приёмника:

$$y = Hs + \eta. \quad (1)$$

где s – передаваемый сигнал размерности $N \times 1$;

H – матрица канала размерности $M \times N$;

η – гауссовый шум с нулевым средним размерности $M \times 1$;

y – принимаемый сигнал размерности $M \times 1$.

Структурная схема П-В кода, использующего схему Аламоути:

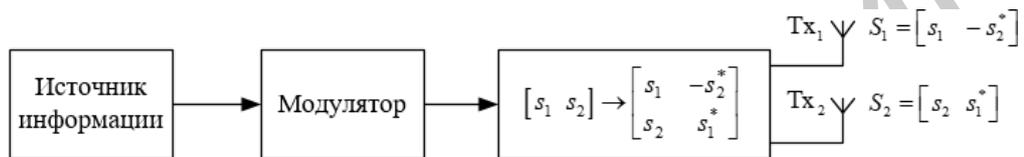


Рисунок 3 – П-В код, использующий схему Аламоути.

Пространственно-временная (П-В) матрица, соответствующая схеме Аламоути, имеет вид:

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Скорость П-В кода есть отношение числа символов k на входе П-В кодера к числу p П-В символов, излучаемых каждой передающей антенной:

$$R = \frac{k}{p}. \quad (3)$$

П-В матрица S должна удовлетворять условию ортогональности:

$$SS^H = S^H S = c \left(|s_1|^2 + |s_2|^2 + \dots + |s_k|^2 \right) I_N, \quad (4)$$

Скорость ортогонального П-В Б К, имеющего максимально возможный порядок разнесения на передаче не может превышать единицу. Неортогональный П-В Б К, имеющий скорость кода больше единицы. Самый простой неортогональный П-В Б К – архитектура пространственного мультиплексирования (*BLAST*).

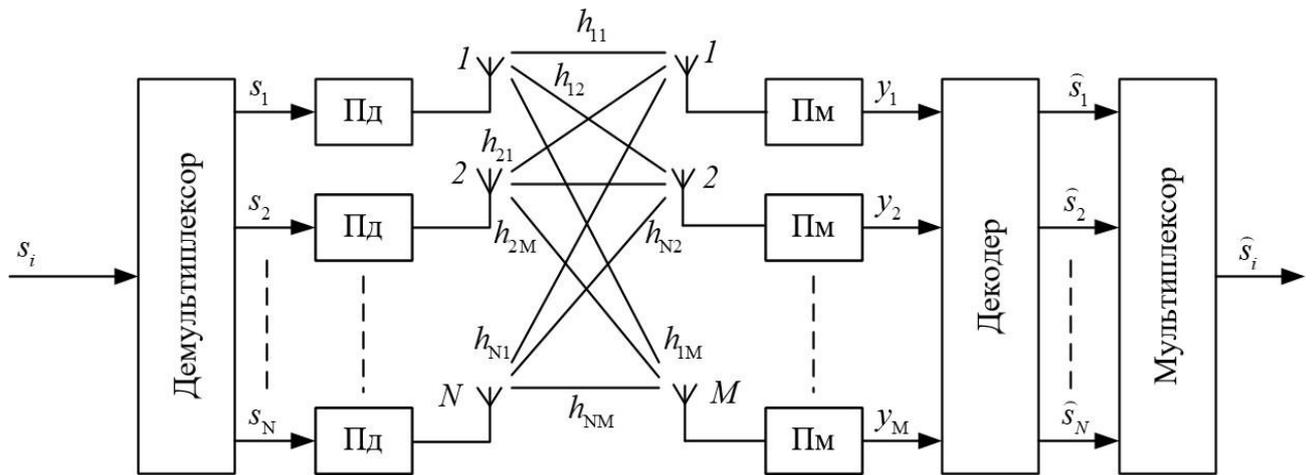


Рисунок 4 – Обобщенная структура системы беспроводной связи, реализующей *BLAST*.

Скорость П-В кода, используемого в системе *BLAST*, численно равна количеству передающих антенн, т. е. $R = N$.

Результат моделирования П-В кодов показан на рисунках 5, 6(а) и 6(б). Разнесение на передаче и на приеме позволяет улучшить помехоустойчивость.

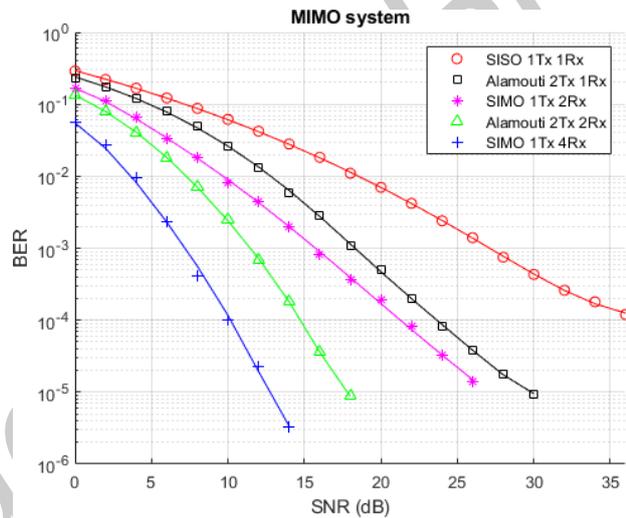
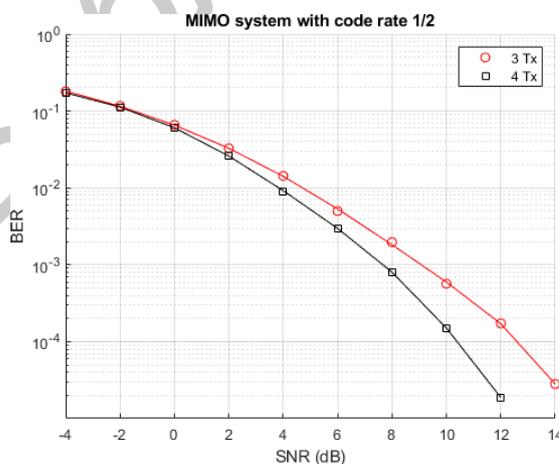
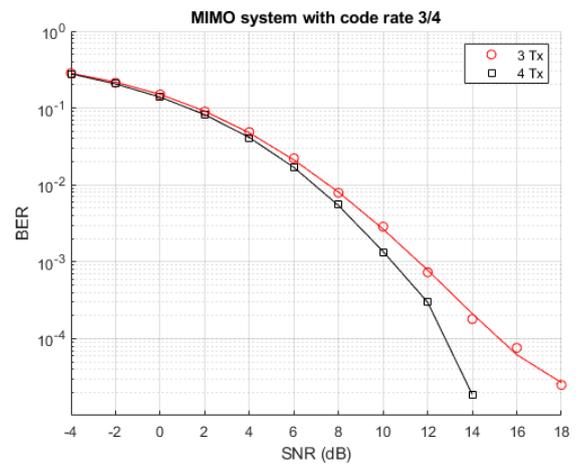


Рисунок 5 – Зависимости вероятности ошибки на бит (*BER*) от отношения сигнал/шум (*SNR*) для разных вариантов систем *MIMO*.



(а)



(б)

Рисунок 6– Зависимости *BER* от *SNR* для системы *MIMO* с ортогональным П-В кодов при различных скоростях кодов.

При одинаковой мощности излучаемого сигнала, разнесение на приеме обеспечивает дополнительный выигрыш чем разнесение на передаче. При одинаковым количестве передающих антенн, П-В коды с меньшей скоростью кода дает больше помехоустойчивости, т. е. меньшая спектральная эффективность может обеспечить большую помехоустойчивость.

Во второй главе посвящено П-В кодом на основе алгебраической структуры. Рассматриваются *Golden code* и *Silver code*, которые имеют больше высокой скорости кода чем известный код Аламоути (со скоростью кода равна единице).

Golden code G_2 , использующий четыре информационных символов $\{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ определяется:

$$G(s_1, s_2, s_3, s_4) = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{bmatrix} s_1 + jrs_4 & rs_2 + s_3 \\ s_2 - rs_3 & jrs_1 + s_4 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $r = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2}$ – числовой коэффициент;
 $j = \sqrt{-1}$.

Silver code S , использующий четыре информационных символов $\{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ определяется:

$$S = \{S = S_A + TS_B \mid s_1, s_2, s_3, s_4 \in \mathbb{Z}[i]\}, \quad (6)$$

где $S_A = S_A(s_1, s_2) = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{pmatrix}$,
 $S_B = S_B(z_1, z_2) = \begin{pmatrix} z_1 & -z_2^* \\ z_2 & z_1^* \end{pmatrix}$, два информационных символа $\{z_1, z_2\}$

определяются таким образом $\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$ с унитарной матрицей

$$U = \frac{1}{\sqrt{7}} \begin{pmatrix} 1+i & -1+2i \\ 1+2i & 1-i \end{pmatrix},$$

скручивающая матрица $T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$.

Результат моделирования системы *BLAST*, *Golden code* и *Silver code* показан на рисунке 7.

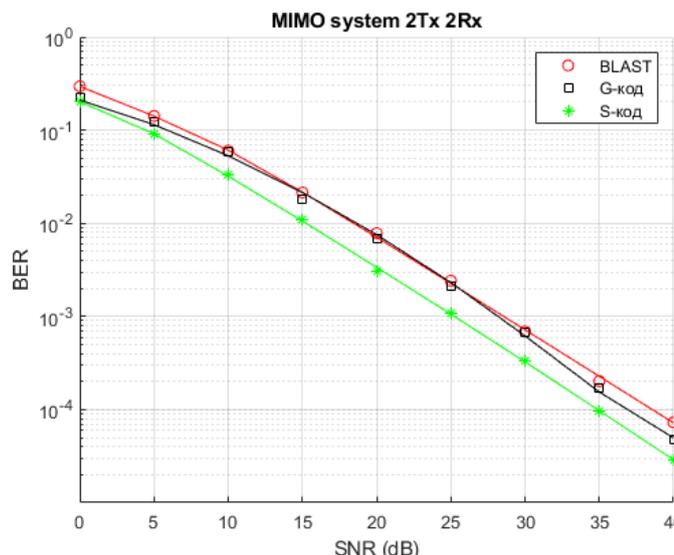


Рисунок 7 – Зависимости BER от SNR для системы $BLAST$, $Golden\ code$ и $Silver\ code$ при использовании алгоритма декодера по критерию МП.

$Golden\ code$ и $Silver\ code$ дают значительный (2 дБ и 3,8 дБ) энергетический выигрыш по сравнению с схемой $BLAST$ при использовании демодулятора, оптимального по критерию МП. $Golden\ code$ и $Silver\ code$ известны только для случая двух передающих антенн.

В третьей главе посвящено алгоритмам декодирования на приеме системы $BLAST$. Рассматриваются алгоритмы МП, МСКО и ZF , их эффективность на помехоустойчивость системы связи.

Оценка по методу МП определяется:

$$\hat{s}^{МП} = \arg \max_{s \in \Theta'} \|y - Hs\|^2. \quad (7)$$

Структурная схема декодера МП приведена на рисунке 7:

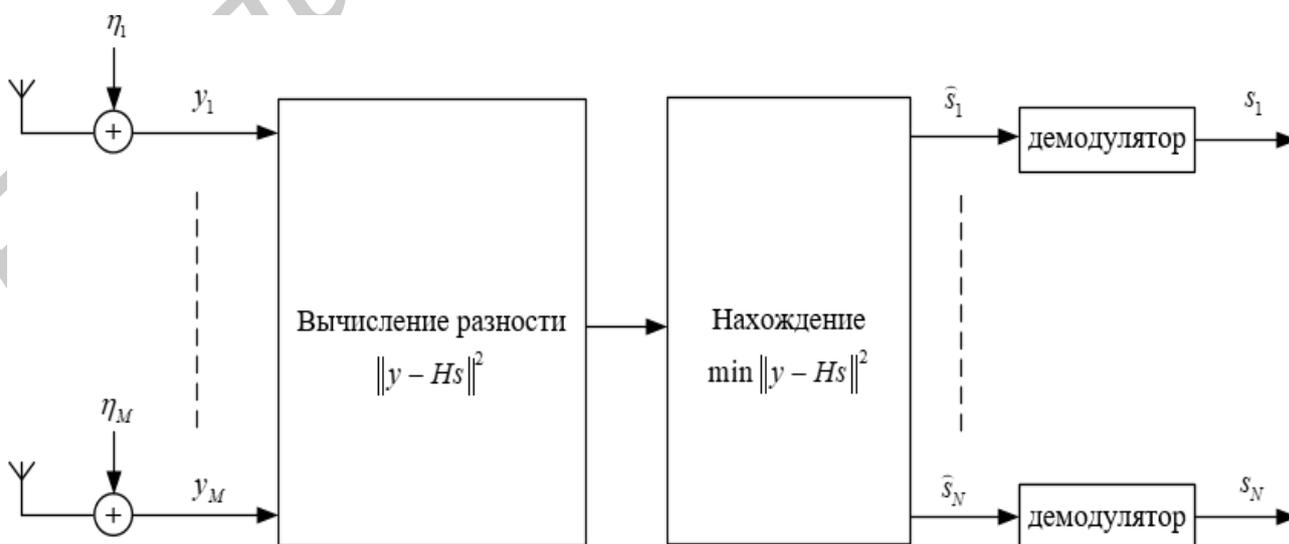


Рисунок 8 – Структурная схема декодера МП.

Поиск точки максимума (или минимума) проводится перебором по всем возможным состояниям (комбинациям) вектора информационных символов s .

Оценка по методу ZF определяется:

$$\hat{s}^{ZF} = W_{ZF} y = (H^H H)^{-1} H^H y, \quad (8)$$

где $W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H$ – матрица линейного преобразования.

Оценка по методу МСКО определяется:

$$\hat{s}^{МСКО} = W_{МСКО} y = (H^H H + 2\sigma_\eta^2 I_N)^{-1} H^H y. \quad (9)$$

Структуры линейных ZF -декодера и МСКО-декодера приведены на рисунках 9 и 10:

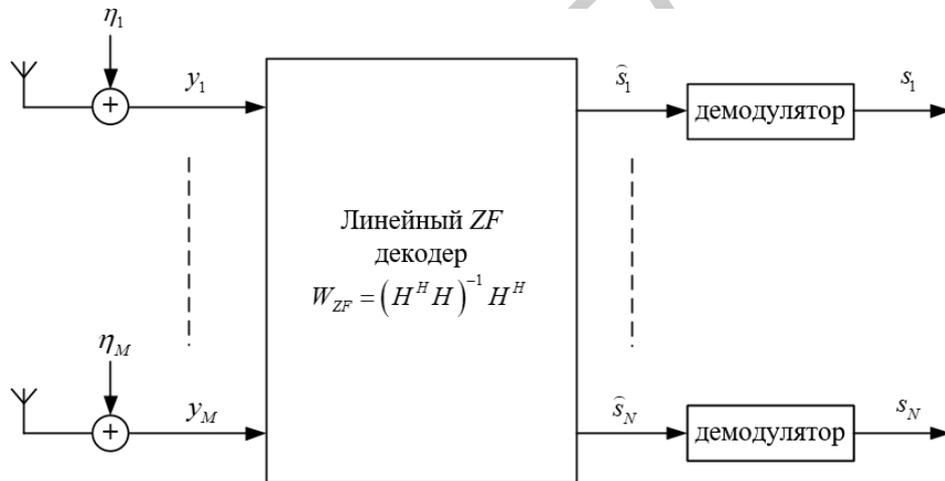


Рисунок 9 – Структурная схема линейного декодера по алгоритму ZF .

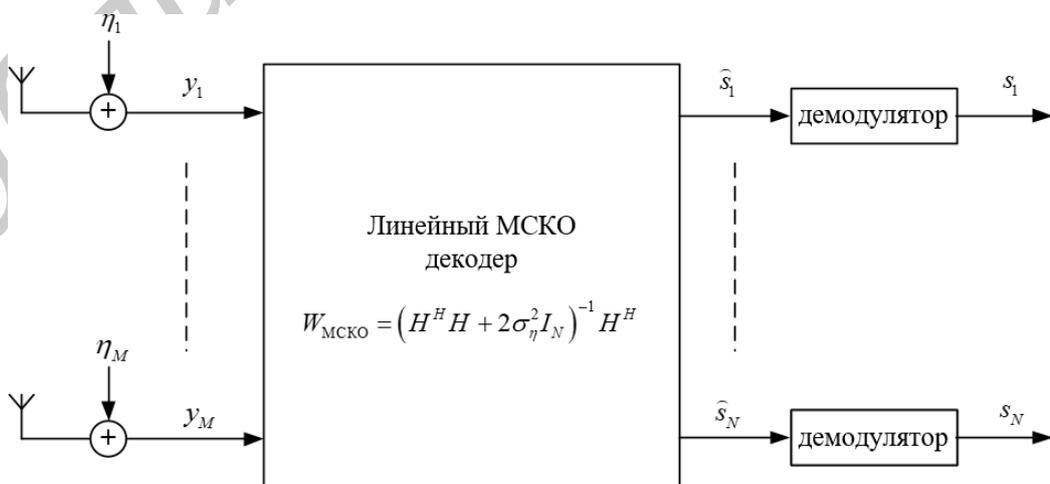


Рисунок 10 – Структурная схема линейного декодера по алгоритму МСКО.

На рисунке 11 приведен результат моделирования алгоритмов декодирования для системы $BLAST$.

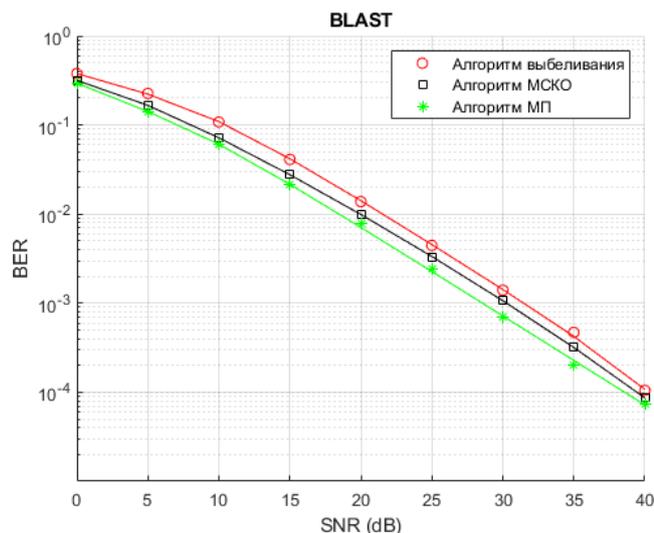


Рисунок 11 – Зависимость BER от SNR на входе приемника для схемы $BLAST$.

Наилучшими свойствами помехоустойчивости обладает алгоритм МП. Алгоритм МСКО обладает меньшей вычислительной сложностью по сравнению с алгоритмом МП и не уступает другим алгоритмам по характеристике помехоустойчивости.

В четвертой главе посвящено адаптивным системам $MIMO$ с обратной связью. Рассматриваются несколько форм CSI на передатчике и критерии синтеза алгоритмов прекодирования для соответствующих форм CSI .

Канал измеряется в приемнике во время передачи по прямой линии связи (от передатчика до приемника), и информация отправляется на передатчике по обратной линии связи. Структурная схема системы $MIMO$ связи с прекодированием приведена на рисунке 12.

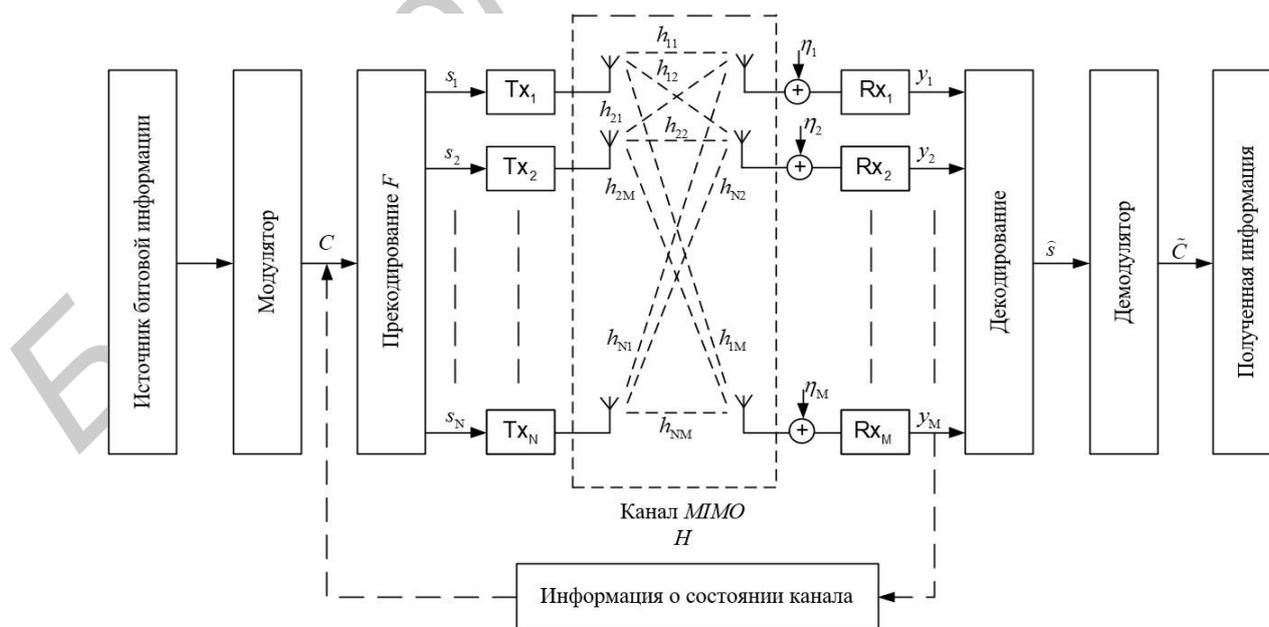


Рисунок 12 – Структурная схема системы $MIMO$ связи с прекодированием.

На передающей стороне после кодера, сигнал подвергается линейному преобразованию с помощью прекодирующей матрицы F и затем поступает

в канал связи *MIMO* с матрицей канала H . Прекодирующая матрица F линейного преобразования, оптимальная по всем критериям, определяет алгоритм линейного прекодирования.

Сингулярное разложение прекодирующей матрицы F описывается:

$$F = U_F D V_F^H. \quad (10)$$

Когда на передатчике имеется идеальная *CSI*, левые сингулярные векторы прекодирующей матрицы F , определяющие направления лучей, должны соответствовать правым сингулярным векторам матрицы H :

$$U_F = V_H, \quad (11)$$

где V_H – матрица V_H входит в сингулярное разложение матрицы H :

$$H = U_H \Sigma V_H^H. \quad (12)$$

Когда на передатчике имеется корреляция замираний *CSI*, т. е. матрица канала $H = H_\omega R_t^{1/2}$. Левые сингулярные векторы прекодирующей матрицы F должны совпадать с собственными векторами корреляционной матрицы R_t :

$$U_F = U_t, \quad (13)$$

где U_t – матрица U_t входит в сингулярное разложение корреляционной матрицы R_t :

$$R_t = U_t \Lambda_t U_t^H. \quad (14)$$

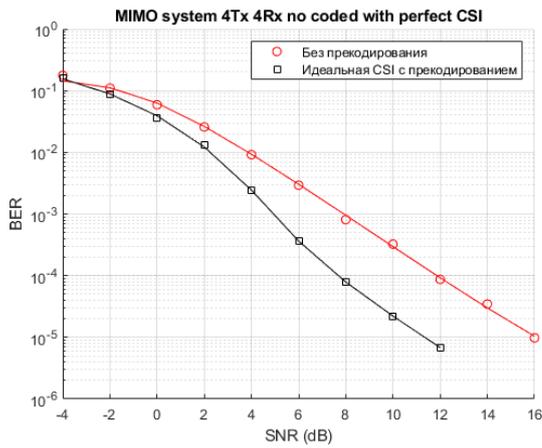
Когда на передатчике имеется динамическая *CSI*, т. е. матрица канала $H = \bar{H} + H_\omega R_t^{1/2}$. Левые сингулярные векторы прекодирующей матрицы F должны совпадать с собственными векторами матрицы $\bar{H}^H \bar{H} + MR_t$:

$$U_F = U_R, \quad (15)$$

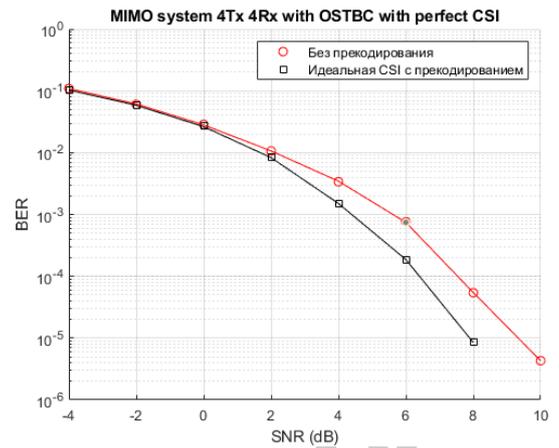
где U_R – матрица U_R входит в сингулярное разложение матрицы $\bar{H}^H \bar{H} + MR_t$:

$$\bar{H}^H \bar{H} + MR_t = U_R \Lambda_R U_R^H. \quad (16)$$

На рисунках 13(а), 13(б), 14(а), 14(б), 15(а), 15(б) приведены результаты моделирования алгоритмов прекодирования для системы *MIMO*.

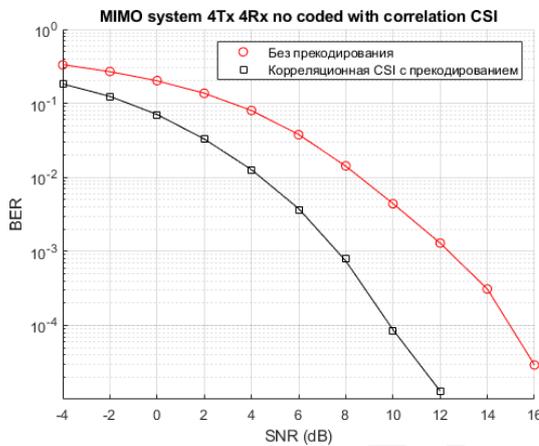


(a)

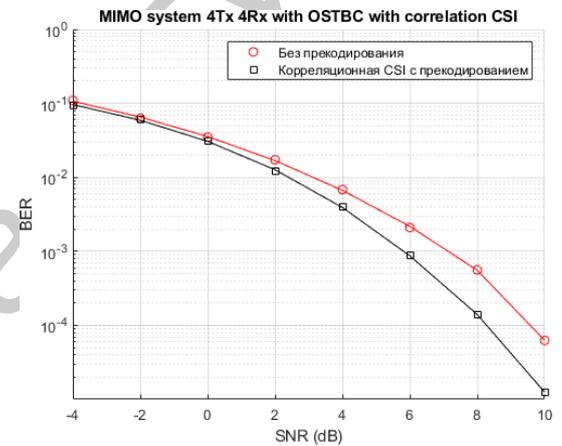


(б)

Рисунок 13 – Эффективность прекодирования в случае, когда на передающей стороне имеется идеальная *CSI*: (а) без кодирования; (б) с П-В кодом.

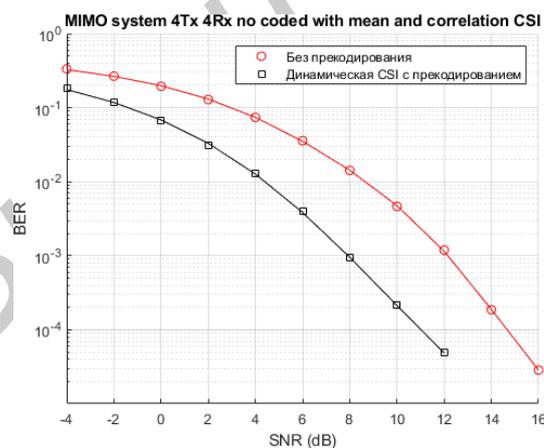


(a)

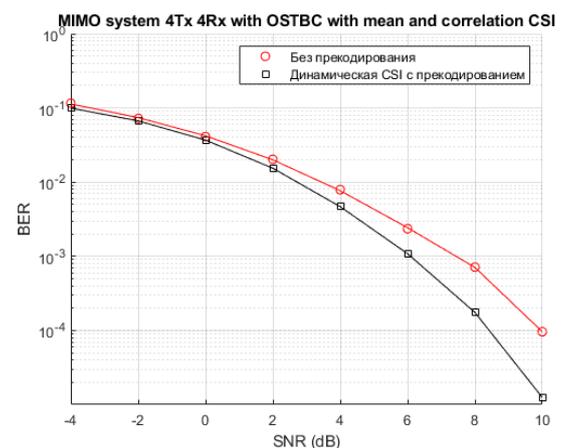


(б)

Рисунок 14 – Эффективность прекодирования в случае, когда на передающей стороне имеется корреляционная *CSI*: (а) без кодирования; (б) с П-В кодом.



(a)



(б)

Рисунок 15 – Эффективность прекодирования в случае, когда на передающей стороне имеется динамическая *CSI*: (а) без кодирования; (б) с П-В кодом.

Прекодирование для системы *MIMO* обеспечивает значительный выигрыш, измеренный как в некодированном, так и в кодированном режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование П-В кодов, т. е. разнесение на передаче и с увеличением числа антенн на передаче дают значительно выигрыш (12 дБ) по помехоустойчивости. С увеличением числа антенн на приеме, т. е. разнесение на приеме с помощью метода оптимального коэффициента сложения выдается больше выигрыша (2,4 дБ) чем разнесение на передаче. При одинаковой мощности на передаче, уменьшение скорости кода дает большую помехоустойчивость систем.

Golden code и *Silver code* дают значительный (2 дБ и 3,8 дБ) энергетический выигрыш по сравнению с схемой *BLAST* при использовании алгоритма декодирования, оптимального по критерию МП. *Silver code* имеет низкую сложность декодирования и дает большую помехоустойчивость по сравнению с *Golden code*. *Golden code* и *Silver code* известны только для случая двух передающих антенн.

Наилучшими свойствами помехоустойчивости обладает алгоритм МП (при $BER = 10^{-3}$ требуется $SNR = 27$ дБ), алгоритм МСКО обладает меньшей вычислительной сложностью по сравнению с алгоритмом МП и не уступает другим алгоритмам по характеристике помехоустойчивости.

Выигрыш от прекодирования значителен как в некодированном (5 дБ), так и в кодированном режиме (1,5 дБ). Усиление зависит от *CSI*, количества антенн, конфигурации системы и отношения сигнал/шум. Выигрыш прекодирования обычно увеличивается с увеличением количества антенн.

СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Тезисы конференций

1–А. Фам, Х. А. Анализ эффективности системы связи с использованием технологии ММО и методов пространственно-временного кодирования // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020 : материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, 28-29 октября 2020 г. / – Минск : БГУИР, 2020. – С. 17-20.

2–А. Фам, Х. А., Саломатин, С. Б. Оптимальные прекодирования с учетом состояния канала связи для пространственно-временного кодирования в беспроводных системах ММО // Международный научно-технический семинар «Технологии передачи и обработки информации», 30 марта - 25 апреля 2022 года / – Минск : БГУИР, 2022. (в печати).

3–А. Фам, Х. А. Эффективность декодирования пространственно-временных алгебраических кодов в случайных каналах передачи // Радиотехника и электроника : сборник тезисов докладов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, апрель 2022 года / Минск : БГУИР, 2022. (в печати).