

## АЛГОРИТМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ СОСТОЯНИЯ КАНАЛА СВЯЗИ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ MIMO

Х.А. ФАМ, С.Б. САЛОМАТИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 28 февраля 2022*

**Аннотация.** В статье рассматриваются алгоритмы линейного предварительного кодирования с использованием информации о состоянии канала на передающей стороне системы MIMO. Рассматривается синтез и эффективность алгоритмов предварительного кодирования, основанные на использовании следующих критериев: взаимной информации, минимума вероятности попарной ошибки, минимума среднеквадратической ошибки.

**Ключевые слова:** система MIMO, информация о состоянии канала – CSI, пространственно-временное кодирование (STC), идеальная CSI, корреляция замираний CSI, динамическая CSI.

### Введение

В современную эпоху беспроводной связи неуклонный рост числа пользователей сотовой связи и их огромные потребности в скорости передачи данных требуют новых достижений в существующей сотовой инфраструктуре. Являясь ключевой технологией для систем беспроводной связи 5-го поколения (5G), технология массового ввода-вывода (MIMO) в настоящее время является одной из привлекательных технологий для будущего беспроводного доступа. Предпосылкой для использования массивного MIMO является то, что базовая станция должна получать информацию о состоянии канала (CSI) канала нисходящей линии связи.

Чтобы удовлетворить требования пользователей сотовой связи, многие методы передачи, такие как битовая загрузка, кодирование, методы предварительного кодирования, адаптивная модуляция, планирование с учетом канала и т.д., должны иметь точную информацию о состоянии канала (CSI) на стороне передатчика, чтобы добиться значительного выигрыша. Кроме того, точная CSI значительно улучшает производительность многих беспроводных технологий, например, множественных входов и множественных выходов (MIMO), сверхнадежных передач, ретрансляции и защиты физического уровня [1–7].

В режиме дуплекса с временным разделением (TDD) базовая станция может получать CSI нисходящей линии связи из канала восходящей линии связи на основе взаимности каналов [2]. В режиме дуплекса с частотным разделением каналов (FDD) взаимность больше не поддерживается, и CSI нисходящей линии связи необходимо оценивать в пользовательском оборудовании на основе пилот-сигнала и возвращать обратно в BS.

Более того, точная CSI позволяет упростить приемник за счет предварительного кодирования MIMO на передатчике, повысить надежность и более высокую пропускную способность канала и т.д. Для получения этих преимуществ без CSI на передатчике не обойтись. Алгоритмы точной CSI, являются альфой и омегой современной инфраструктуры беспроводной связи.

На передающей стороне, двумя основными компонентами обработки MIMO передаваемой информации являются пространственно-временное кодирование и предварительное кодирование (или «прекодирование»). Прекодирование представляет собой метод, использующий информацию о канале, доступную в передатчике. Использование на передающей стороне информации о состоянии канала связи позволяет увеличить скорость передачи

информации, улучшить зону покрытия и уменьшить сложность реализации приемника в беспроводных системах MIMO [1, 2].

В настоящей работе рассматриваются алгоритмы предварительного кодирования, основанные на использовании следующих критериев: взаимной информации, минимума вероятности попарной ошибки, минимума среднеквадратической ошибки. Оценивается эффективность применения предлагаемых алгоритмов.

### Модели предварительного кодирования в беспроводных системах MIMO

Существует множество форм представления информации о состоянии канала на передающей стороне:

- точная информация о состоянии канала в каждый момент времени или идеальная информация о состоянии канала (идеальная CSI);
- часто бывает трудно получить в канале с замираниями – информация о корреляции замираний в канале (корреляционная CSI);
- информация о корреляции замираний и о среднем значении матрицы канал (динамическая CSI).

Разработка прекодирования для беспроводной связи MIMO в последние годы была активной областью исследований в настоящее время находит применение в новых беспроводных стандартах.

Структурная схема системы MIMO связи с прекодированием, приведена на рис. 1. На передающей стороне после кодера, сигнал подвергается линейному преобразованию с помощью матрицы  $F$  и затем поступает в канал связи MIMO с матрицей канала  $H$ . Матрица  $F$  линейного преобразования определяет алгоритм линейного прекодирования.

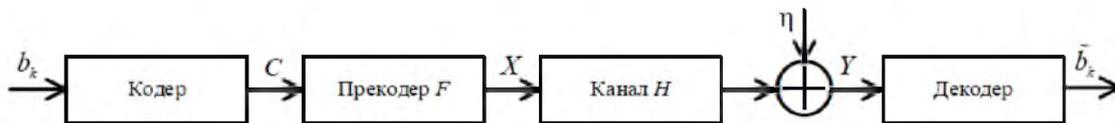


Рис. 1. Структурная схема системы MIMO связи с прекодированием

Кодер содержит блок канального кодирования и отображения символов, который доставляет векторные символы в прекодер. Модель принимаемого сигнала в системе связи MIMO с линейным прекодированием (приведенная на рис. 1) может быть записана в следующем выражении [3–7]:

$$Y = \sqrt{E_s} H F C + \eta, \quad (1)$$

где  $E_s$  – мощность передаваемого сигнала,  $\eta$  – аддитивный белый гауссовский шум.

Рассматривается синтез следующих алгоритмов прекодирования, основанный на использовании известных критериев: критерий взаимной информации, критерий минимума вероятности попарной ошибки, критерий минимума среднеквадратической ошибки.

1. Сингулярное разложение прекодирующей матрицы  $F$  описывается следующим выражением [3–7]:

$$F = U_F D V_F^H. \quad (2)$$

2. Прекодирование для случая, когда на передающей стороне имеется идеальная CSI. При идеальном CSI канал MIMO использует сингулярное разложение матрицы  $H$  [3–7]:

$$H = U_H \sum V_H^H, \quad (3)$$

оптимальные направления лучей – представление канала связи MIMO в виде совокупности параллельных каналов, путем левые сингулярные векторы прекодирующей матрицы  $F$ , определяющие направления лучей, должны соответствовать правым сингулярным векторам матрицы  $H$ , то есть  $U_F = V_H$ .

3. Прекодирование для случая, когда на передающей стороне имеется корреляция замираний CSI. Предполагаем, что в канале MIMO имеет корреляция на передающей стороне, а корреляция на приеме отсутствует. Матрица  $H$  в этом случае описывается как [3–7]:

$$H = H_{\omega} R_t^{1/2}, \quad (4)$$

оптимальные направления лучей, для всех критериев синтеза алгоритмов прекодирования, совпадают с собственными векторами корреляционной матрицы  $R_t : U_F = U_t$ , где матрица  $U_t$  входит в сингулярное разложение корреляционной матрицы  $R_t : R_t = U_t \Lambda_t U_t^H$ .

4. Прекодирование для случая, когда на передающей стороне имеется динамическая CSI. Матрица канала  $H$  данного случая описывается следующим выражением [3–7]:

$$H = \bar{H} + H_{\omega} R_t^{1/2}, \quad (5)$$

где  $\bar{H} = E[H]$  – среднее значение матрицы  $H$ .

Решая квазиоптимальных направлений лучей получаем:  $U_F = U_R$ , где матрица  $U_R$  входит в сингулярное разложение матрицы  $\bar{H}^H \bar{H} + M R_t$ :

$$\bar{H}^H \bar{H} + M R_t = U_R \Lambda_R U_R^H. \quad (6)$$

Моделирование приведенных выше алгоритмов позволило получить следующие графики зависимостей вероятности ошибки на бит (BER) от отношения сигнал/шум (SNR).

### Результаты моделирования

На рис. 2 продемонстрированы эффективности вероятности появления ошибки, когда на передающей стороне имеется идеальная CSI. Алгоритмы прекодирования обеспечивают значительный выигрыш, измеренный как в некодированном, так и в кодированном режиме. В некодированном режиме, при вероятности  $10^{-6}$  выигрыш 4 дБ; в кодированном режиме, при вероятности  $10^{-5}$  выигрыш 2 дБ.

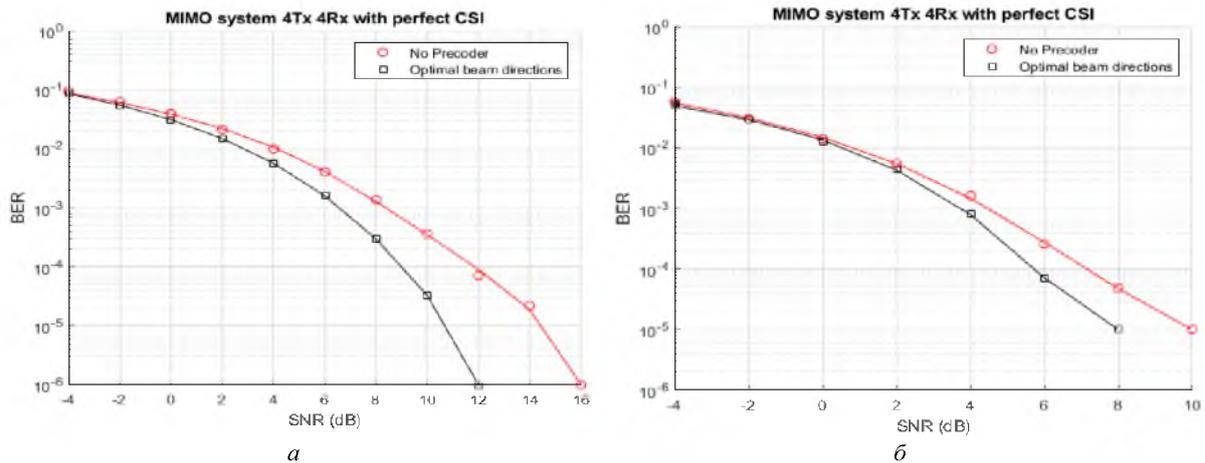


Рис. 2. Эффективность прекодирования в случае на передающей стороне имеет идеальную CSI:  
 $a$  – без кодирования;  $b$  – с пространственно-временным кодированием

На рис. 3 продемонстрированы эффективности вероятности появления ошибки, когда на передающей стороне имеется корреляционная CSI. Прекодирования обеспечивают значительный выигрыш, измеренный как в некодированном, так и в кодированном режиме. В некодированном режиме, при вероятности  $10^{-5}$  выигрыш 4 дБ; в кодированном режиме, при вероятности  $10^{-6}$  выигрыш 2 дБ.

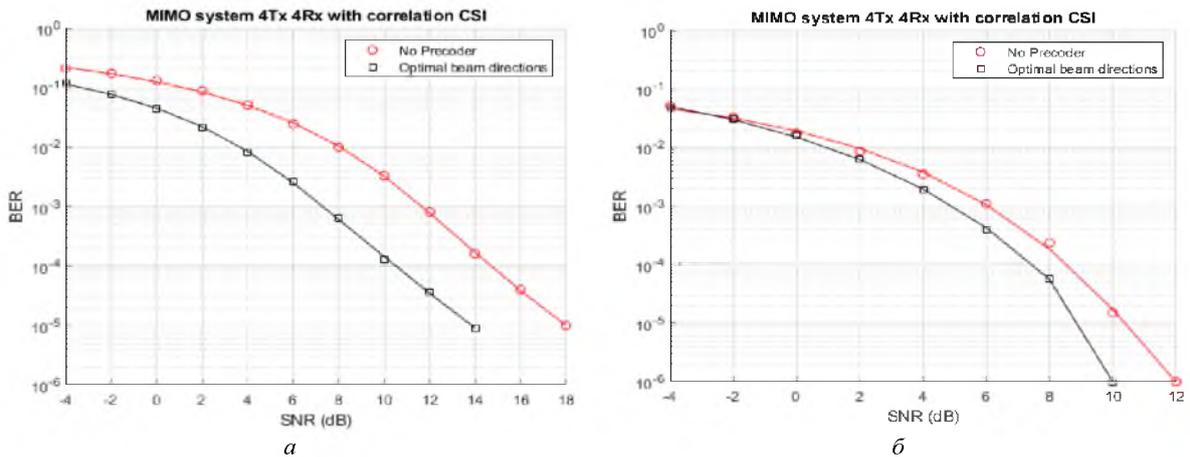


Рис. 3. Эффективность прекодирования в случае на передающей стороне имеет корреляционную CSI:  $a$  – без кодирования;  $b$  – с пространственно-временным кодированием

На рис. 4 продемонстрированы эффективности вероятности появления ошибки, когда на передающей стороне имеется динамическая CSI. Прекодирования обеспечивают выигрыш, измеренный как в некодированном, так и в кодированном режиме. В некодированном режиме, при вероятности  $10^{-5}$  выигрыш 4 дБ; в кодированном режиме, при вероятности  $10^{-5}$  выигрыш 2 дБ.

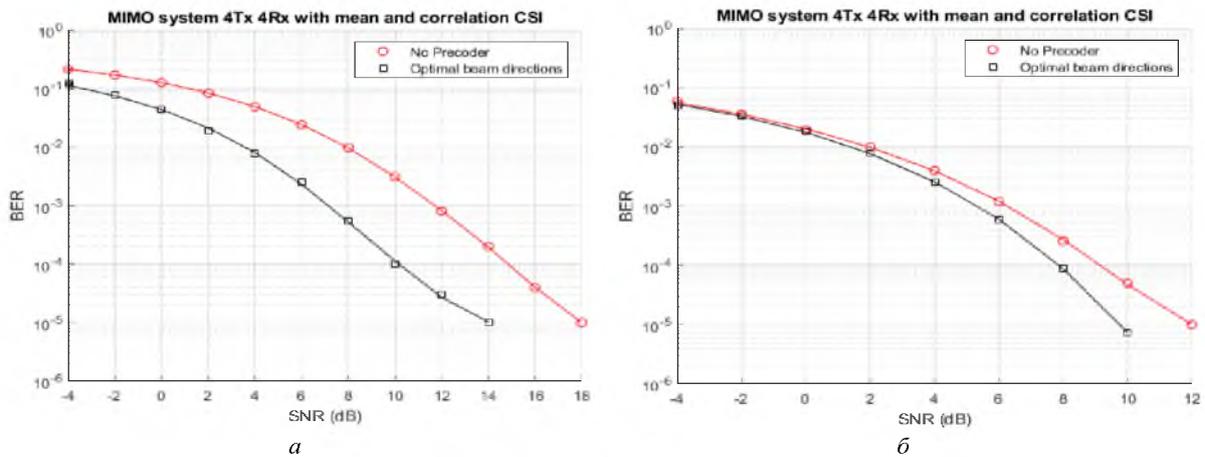


Рис. 4. Эффективность прекодирования в случае на передающей стороне имеет динамическую CSI:  $a$  – без кодирования;  $b$  – с пространственно-временным кодированием

## Заключение

В работе рассмотрены алгоритмы предварительного кодирования в системе MIMO с использованием в схеме обратной связи информации о состоянии канала (CSI) канала.

Анализ моделирования алгоритмов прекодирования для различных форм CSI приводит к следующим результатам. Применение алгоритмов прекодирования позволяет получить достаточно большой выигрыш. Существует зависимость как от CSI, так и от количества антенн, конфигурации системы и отношения сигнал/шум. Выигрыш прекодирования обычно увеличивается с увеличением количества антенн. Когда CSI идеальна, прекодеры также обеспечивают дополнительный выигрыш от разнесения.

Выигрыш от прекодирования значителен как в некодированной, так и в кодированной областях. Выигрыш зависит от CSI, количества антенн, конфигурации системы и отношения сигнал/шум. Выигрыш прекодирования обычно увеличивается с увеличением количества антенн. Когда CSI идеальна, прекодеры обеспечивают дополнительный выигрыш от разнесения.

Прекодирующие матрицы, оптимальные по критериям взаимной информации и минимума среднеквадратической ошибки, имеют одни и те же правые сингулярные векторы. Эти векторы

определяют направления пространственных лучей, которые зависят от имеющейся на передающей стороне CSI.

Прекодирующие матрицы, оптимальные по всем описанным критериям и предназначенные для использования в условиях различного объема информации на передающей стороне о свойствах канала связи MIMO, имеют одни и те же правые сингулярные векторы. Из этих векторов составляется оптимальная прекодирующая матрица, которая согласована с корреляционной матрицей  $Q$  пространственно-временного кода.

## PRE-CODING ALGORITHMS CONSIDERING COMMUNICATION CHANNEL STATE FOR WIRELESS MIMO SYSTEMS

H.A. FAM, S.B. SALOMATIN

**Abstract.** The article deals with linear precoding algorithms using channel state information on the transmitting side of a MIMO system. The synthesis and efficiency of precoding algorithms based on the use of the following criteria are considered: mutual information, minimum pairwise error probability, minimum mean square error.

*Keywords:* MIMO system, channel state information – CSI, space-time coding (STC), ideal CSI, CSI fading correlation, dynamic CSI.

### Список литературы

1. Jankiraman M. Space-Time Codes and MIMO systems. USA, 2004.
2. Jafarkhani H. Space-Time Coding. Theory and practice. UK, 2005.
3. Tarokh V., Jafarkhani H., Calderbank A.R. // IEEE J. Select. Areas Commun. 1999. Vol. 17, No 3. P. 451–460.
4. Тыртышников Е.Е. Матричный анализ и линейная алгебра. М., 2007.
5. Visotsky E., Madhow U. // IEEE Trans. Inform. Theory. 2001. Vol. 47, No. 6. P. 2632–2639.
6. Kuo C.-C.J. [et al.] Precoding Techniques for Digital Communication Systems. USA, 2008.
7. Oesges C., Clerckx B. MIMO Wireless Communications. From real-world propagation to space-time code design. UK, 2007.