

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.

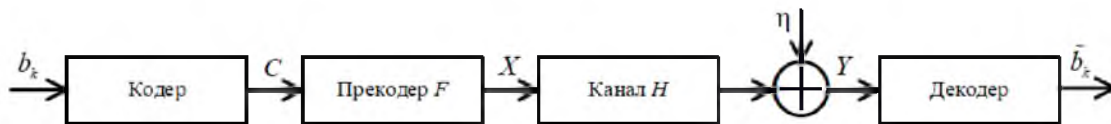


Рис. 1. Структурная схема системы MIMO связи с прекодированием

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, η – 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.

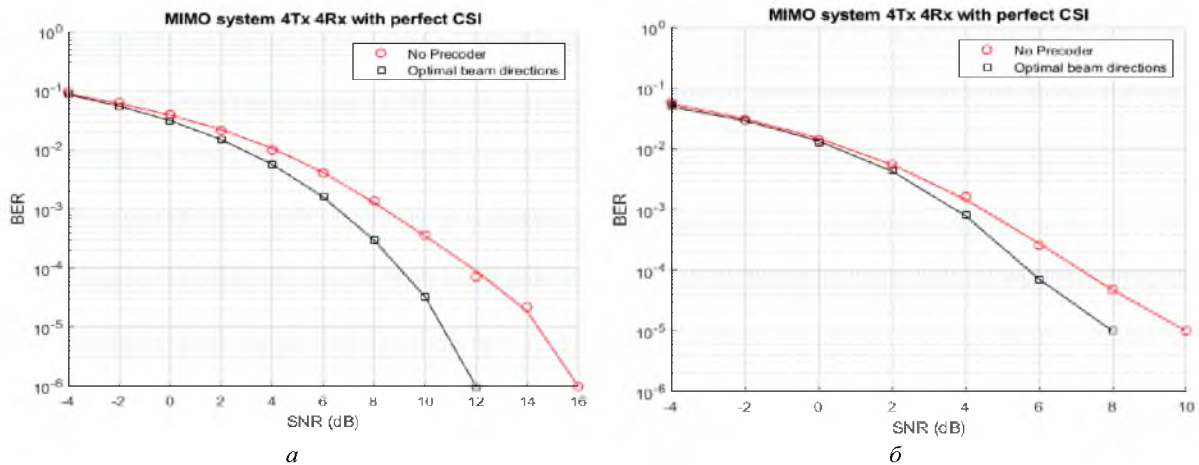


Рис. 2. Эффективность прекодирования в случае на передающей стороне имеет идеальную CSI:
 a – без кодирования; b – с пространственно-временным кодированием

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.

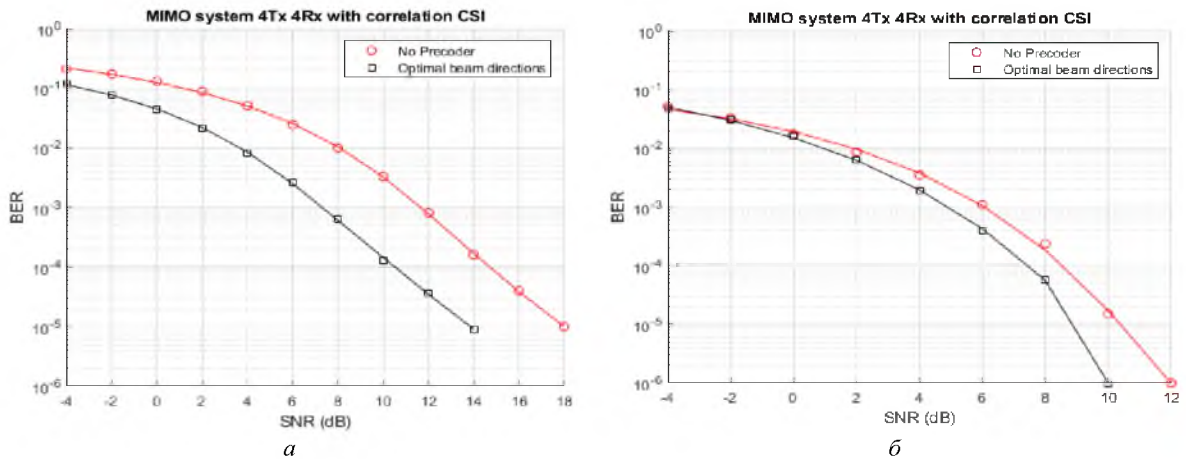


Рис. 3. Эффективность прекодирования в случае на передающей стороне имеет корреляционную CSI: a – без кодирования; b – с пространственно-временным кодированием

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.

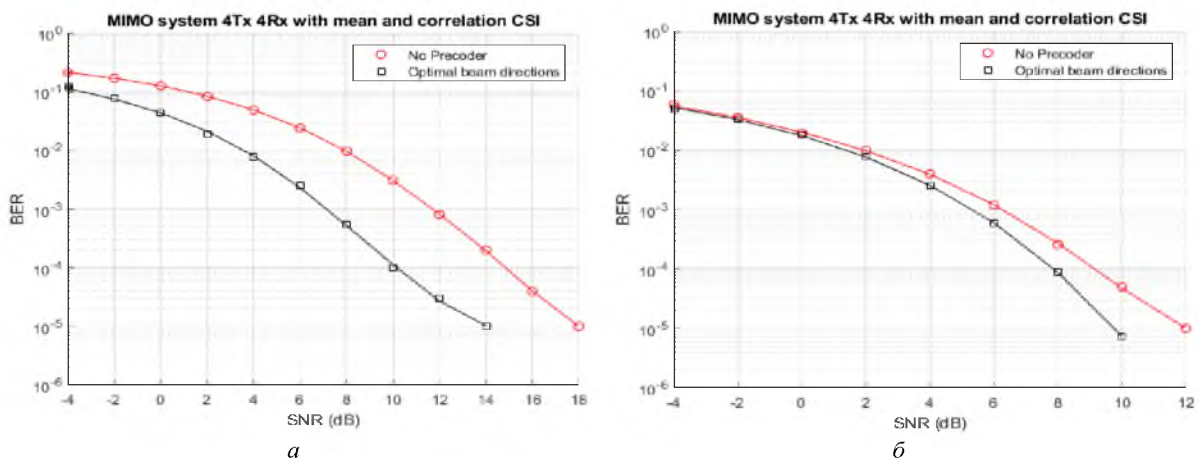


Рис. 4. Эффективность прекодирования в случае на передающей стороне имеет динамическую CSI: a – без кодирования; b – с пространственно-временным кодированием

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.