

СПОСОБЫ МИНИМИЗАЦИИ ОБЪЁМА ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ В ОБРАТНОМ КАНАЛЕ МНОГОАНТЕННЫХ СИСТЕМ MIMO

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-3-17-24

Бакулин Михаил Германович,
МТУСИ, Москва, Россия, m.g.bakulin@gmail.com

Бен Режеб Тауфик Бен Камель,
МТУСИ, Москва, Россия, t.benreheb@mtuci.ru

Крейнделин Виталий Борисович,
МТУСИ, Москва, Россия, vitekrend@gmail.com

Смирнов Алексей Эдуардович,
МТУСИ, Москва, Россия, smirnov.al.ed@gmail.com

Manuscript received 16 November 2020;
Accepted 18 January 2021

Ключевые слова: MIMO, прекодирование, многообразия Грассмана, квантование, метрики

Обработка сигналов в многоантенных системах базируется на наличии на передающей стороне информации о текущем состоянии канала CSIT (Channel State Information of Transmitter), позволяющей максимально адаптировать формируемые на передающей стороне сигналы к постоянно изменяющимся характеристикам радиоканала. В системах мобильной связи LTE-Advanced и в семействе стандартов систем радиодоступа IEEE 802.11 широкое применение получили многоантенные системы MIMO (Multiple Input Multiple Output). В международном стандарте систем мобильной связи пятого поколения 5G New Radio (Release 15) многоантенные системы MIMO регламентированы в качестве фундаментальной технологии нового радиоинтерфейса. Рассмотрены алгоритмы квантования информации о состоянии канала с помощью многообразий Грассмана, позволяющие значительно сжать объём необходимой для передачи служебной информации. Результаты компьютерного моделирования позволяют оценить помехоустойчивость алгоритмов прекодирования на основе грассманианов.

Информация об авторах:

Бакулин Михаил Германович, к.т.н., доцент, МТУСИ, Москва, Россия

Бен Режеб Тауфик Бен Камель, к.т.н., доцент, МТУСИ, Москва, Россия

Крейнделин Виталий Борисович, д.т.н, заведующий кафедрой, профессор, МТУСИ, Москва, Россия

Смирнов Алексей Эдуардович, к.т.н., доцент, МТУСИ, Москва, Россия

Для цитирования:

Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К., Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э. Способы минимизации объёма передаваемой информации в обратном канале многоантенных систем MIMO // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №3. С. 17-24.

For citation:

Bakulin M.G., Ben Rejeb T., Kreyndelin V.B., Smirnov A.E. (2021) Reducing of feedback channel information in multiple antenna MIMO systems. T-Comm, vol. 15, no.3, pp. 17-24. (in Russian)

Введение

Для периодического информирования базовой станции о состоянии канала используется выделенный канал обратной связи, который зачастую может требовать большого количества ограниченных ресурсов [0]. Актуальным направлением исследований является снижение объёма информации, передаваемой по каналу обратной связи. В технических спецификациях 3GPP для систем мобильной связи регламентируется использование алгоритмов предварительного кодирования (прекодирования) на основе кодовых книг Codebook-based precoding (Прекодирование по кодовой книге) [0].

Кодовая книга представляет собой набор кодовых слов (векторов и матриц, в зависимости от антенной конфигурации), заранее известных на стороне базовой станции и абонентской станции.

Наличие кодовой книги позволяет выбрать на основе заданной метрики квантования кодовое слово, наиболее подходящее для текущего состояния канала, для дальнейшей передачи на передающую сторону лишь порядкового номера выбранного кодового слова. Такой подход позволяет значительно минимизировать объём информации, передаваемой по каналу обратной связи.

1. Математическая модель системы MIMO с прекодированием

Рассмотрим модель системы беспроводной связи с технологией MIMO, состоящей из базовой станции с несколькими приёмопередающими антеннами, и абонентской станции, которая также оснащена несколькими приёмопередающими антеннами. Для удобства введем обозначения: N_{tx} – количество антенн базовой станции; N_{rx} – количество приёмопередающих антенн абонентской станции; K_{ch} – количество пространственных потоков между базовой станцией и абонентской станцией; \mathbf{H} – матрица канала между приёмными антеннами абонентской станции и передающими антеннами базовой станции, состоящая из комплексных передаточных коэффициентов канала; \mathbf{W} – прекодирующая матрица размерности $N_{tx} \times N_{rx}$, содержащая весовые коэффициенты для формирования сигнала на стороне базовой станции.

Задачей базовой станции является одновременная передача сигналов для всех K пользователей с помощью одних частотно-временных ресурсов, используя N_{tx} передающих антенн. Матрица прекодирования \mathbf{W} , используемая на стороне базовой станции, вычисляемая на основании информации о состоянии канала \mathbf{H} .

Модель наблюдаемого сигнала на входе приемника абонентской станции можно представить следующим образом [0], [0]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{s} + \boldsymbol{\eta}, \tag{1}$$

где \mathbf{y} — наблюдаемый сигнал на входе приёмника абонентской станции размерности $N_{rx} \times 1$; \mathbf{s} – комплексный вектор переданных символов размерности $N_{tx} \times 1$, компоненты которого являются символами алфавита выбранного метода модуляции; $\boldsymbol{\eta}$ – N_{rx} -мерный комплексный вектор шума

наблюдения в канале, компоненты которого представлены гауссовской случайной величиной, имеющей нулевое математическое ожидание и дисперсию $2\sigma_{\eta}^2$.

2. Методы получения передатчиком информации о состоянии канала

Основной задачей предварительного кодирования является адаптация сигналов, передаваемых абонентам, к постоянно изменяющимся характеристикам беспроводного канала связи. Адаптация сигналов или вычисление прекодирующей матрицы, определяющей весовые коэффициенты, выполняется на основе информации о состоянии канала. В иностранной литературе принято обозначение CSIR (Channel State Information on Receiver side) для информации о состоянии канала на стороне приемника и обозначение CSIT для информации на передающей стороне. Наличие канала обратной связи необходимо для передачи информации о состоянии канала с приемной на передающую сторону.

Необходимо учитывать, что оценка канала на приемной стороне производится с некоторой погрешностью $\mathbf{H}_k^{err} = \mathbf{H}_k^{est} - \mathbf{H}_k$, где \mathbf{H}_k^{est} – оценка матрицы канала, произведенная k -ой абонентской станцией, \mathbf{H}_k^{err} – матрица погрешностей, состоящая из гауссовских комплексных случайных величин с нулевым средним и с заданной дисперсией, зависящей от точности оценивания канала.

Передача информации о состоянии канала на передающую сторону может быть обеспечена двумя способами, в зависимости от выбранного дуплексного режима связи между базовой станцией и абонентской станцией. В случае систем связи с временным дуплексом становится возможным использование принципа взаимности (рис. 1).

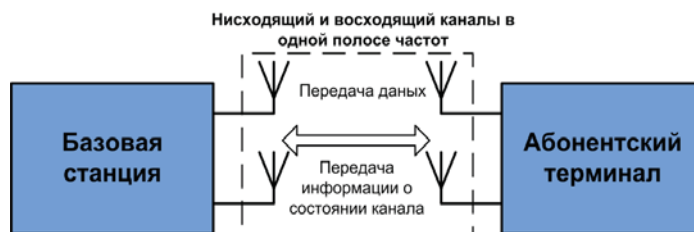


Рис. 1. Иллюстрация принципа взаимности в системах с временным дуплексом

При использовании принципа взаимности предполагается, что справедливо следующее соотношение между информацией о состоянии канала на приёмной и передающей стороне [0], [0]:

$$\mathbf{H}_{BC \rightarrow AT} = \mathbf{H}_{AT \rightarrow BC}^T, \tag{2}$$

где $\mathbf{H}_{BC \rightarrow AT}$ – информация о состоянии «нисходящего» канала, $\mathbf{H}_{AT \rightarrow BC}$ – информация о состоянии «восходящего» канала.

Реализация принципа взаимности возможна при условии, что «нисходящий» и «восходящий» каналы организованы в одной частотной полосе. Кроме того, временное рассогласование Δ между передачей информации по «нисходящему» и «восходящему» каналам должно быть намного меньше интервала корреляции замираний $\tau_{\text{согг}}$ [0]:

$$\Delta_f \ll \tau_{\text{corr}} \quad (3)$$

В частотной области рассогласование по частоте Δ_f между «нисходящим» и «восходящим» каналами должно быть много меньше ширины полосы частотной когерентности F_c канала связи [0]:

$$\Delta_f \ll F_c \quad (3)$$

В случае, когда используется частотный дуплекс, становится необходимым наличие выделенного канала обратной связи по причине большой разности частотных характеристик «нисходящего» и «восходящего» каналов (рис. 2).



Рис. 2. Организация отдельного канала обратной связи для передачи информации о состоянии канала

Абонентская станция при детектировании сигнала, принятого от базовой станции, производит оценку канала, результатом чего является появление оценки CSIR. Полученная оценка должна быть передана на сторону базовой станции для дальнейшей обработки сигналов с помощью выделенного канала обратной связи, для организации которого требуется выделенные ресурсы частотного спектра.

Производительность канала обратной связи должна быть достаточной для обеспечения периодической передачи информации о состоянии канала. Кроме того, временная задержка в канале обратной связи должна быть относительно невелика по сравнению с интервалом корреляции замираний в канале передачи данных.

Передача информации о состоянии канала на передающую сторону является обязательной процедурой для реализации прекодирования, поэтому актуальным направлением исследований является поиск способов минимизации объёма информации, передаваемой по каналу обратной связи информации для экономии ресурсов (временных или частотных) [0], [0].

3. Применение кодовых книг для квантования CSI

В актуальных на сегодняшний день стандартах беспроводной связи регламентируется использование алгоритмов прекодирования на основе кодовых книг [0], [0].

Кодовая книга представляет собой набор кодовых слов (векторов и матриц, в зависимости от антенной конфигурации), заранее известных на стороне базовой станции и абонентской станции.

Наличие кодовой книги позволяет выбрать наиболее подходящее кодовое слово для квантования текущего состояния канала и в дальнейшем осуществлять передачу на сторону базовой станции лишь порядкового номера выбранного кодового слова вместо полной матрицы канала. Такой подход позволяет значительно минимизировать объём информации, передаваемой по каналу обратной связи.

Абонентская станция передает на сторону базовой станции определенный индикатор, содержащий порядковый номер выбранного кодового слова и представленный с помощью B бит. Количество бит B зависит от размера кодовой книги C , а именно, от количества кодовых слов, содержащихся в ней.

Абонентской станции доступна полная информация о состоянии канала CSIR, представленная вектором или матрицей комплексных коэффициентов канала. С помощью известной на стороне базовой станции кодовой книги абонентская станция производит выбор наиболее близкого к значениям коэффициентов матрицы канала \mathbf{H}_k кодового слова C_k и использует его в дальнейшем в качестве квантованной оценки канала.

Кодовую книгу можно представить в виде матрицы C , состоящей из L кодовых слов, являющихся вектором или матрицей, в зависимости от выбранной антенной конфигурации [0].

Представим кодовую книгу абонентского терминала как матрицу F размерности $LN_{rx} \times N_{tx}$, состоящую из L векторов, являющихся кодовыми словами:

$$C = [C_1 \ C_2 \ \dots \ C_L], L = 2^B, \quad (4)$$

где $L = 2^B$, B — количество бит для представления порядкового номера кодового слова, l — порядковый номер кодового слова. Структура кодовой книги отражена на рис. 3.

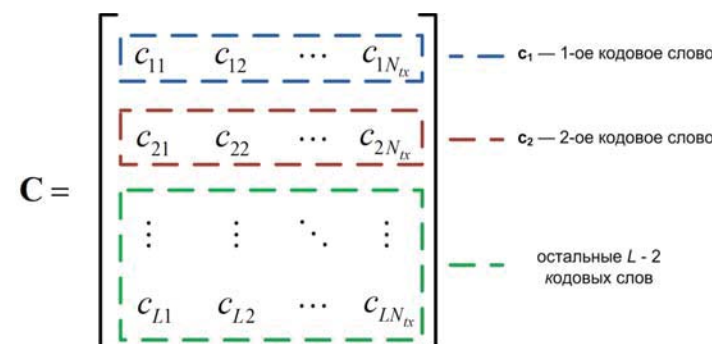


Рис. 3. Структура кодовой книги абонентских терминалов

Кодовая книга абонентской станции является матрицей размерности $LN_{rx,ms} \times N_{tx}$, состоящей из кодовых слов размерности $N_{rx,ms} \times N_{tx}$. Каждое кодовое слово используется абонентской станцией как квантованное значение информации о состоянии канала. Размерность кодовой книги абонентской станции напрямую зависит от количества бит B , с помощью которых представлен передаваемый по каналу обратной связи управляющий индикатор. Кодовая книга высокой размерности позволяет квантовать оценку матрицы канала с более частым шагом квантования, но требует большего количества бит B обратной связи и более производительного канала обратной связи, что не всегда представляется возможным.

На рисунке 4 приведена иллюстрация процедуры квантования матрицы канала абонента.

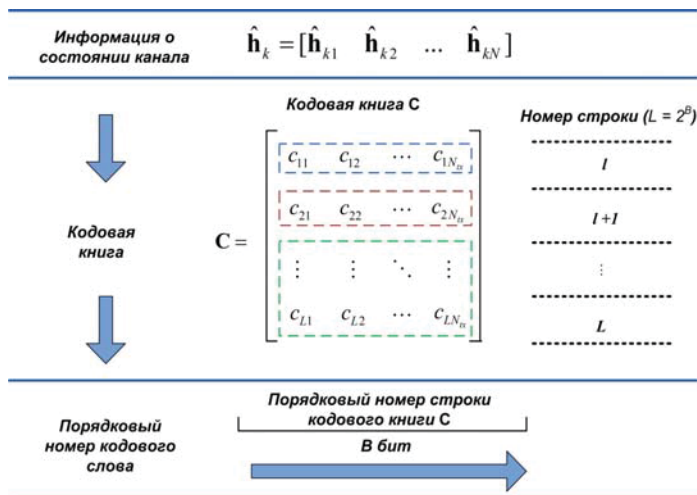


Рис. 4. Процедура квантования информации о состоянии канала

При квантовании информации о состоянии канала можно выделить два основных подхода [0], [0]:

Подход №1. Вычисление общей прекодирующей матрицы на стороне базовой станции на основе полученных от абонентских станций индикаторов кодовых слов.

Такой подход подразумевает сбор на стороне базовой станции индикаторов выбранных кодовых слов от всех абонентских станций и дальнейшее вычисление на основе квантованных оценок общей прекодирующей матрицы базовой станции. Каждая абонентская станция производит выбор кодового слова \mathbf{C}_l с помощью выбранной метрики квантования. Для такого подхода в стандарте LTE предусмотрен индикатор CDI (Channel Direction Information). Такой подход к квантованию может использоваться как в однопользовательских, так и в многопользовательских системах.

Подход №2. Вычисление прекодирующей матрицы на стороне абонентской станции, ее квантование и дальнейшая передача на сторону базовой станции

При таком подходе вычисление прекодирующей матрицы производится на стороне абонентской станции, базовая станция не участвует в процедуре вычисления прекодирующей матрицы. Далее вычисленная прекодирующая матрица проходит процедуру квантования с помощью кодовой книги и выбранный индикатор порядкового номера кодового слова передается по каналу обратной связи на сторону базовой станции. Для такого подхода в стандарте LTE предусмотрен индикатор PMI (Precoding matrix indicator). Такой подход может быть применен только в однопользовательских системах.

Помимо изложенных выше подходов к квантованию существуют также несколько основных критериев выбора квантованного кодового слова [0], [0].

1) Критерий минимальных собственных значений SC-MSV:

$$\mathbf{C}_k = \arg \max_{\mathbf{C}_l \in \mathbf{C}} \lambda_{\min} \{ \mathbf{H}_k \dot{\mathbf{C}}_l \}, \quad (5)$$

где k – номер абонентского терминала, \mathbf{C}_k – выбранное кодовое слово, $\dot{\mathbf{C}}_l$ – кодовое слово кандидат на квантование

согласно выбранной метрике, $\lambda_{\min} \{ \}$ – оператор вычисления минимального собственного числа.

2) Критерий минимума среднеквадратичной ошибки SC-MSE (Selection Criterion Mean-Squared Error)

$$\mathbf{C}_k = \arg \min_{\mathbf{C}_l \in \mathbf{C}} \text{tr} \left(E_s \left(\mathbf{I}_{N_{rx,us}} + \frac{E_s}{N_0} \dot{\mathbf{C}}_l \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k \dot{\mathbf{C}}_l \right)^{-1} \right), \quad (6)$$

где $\text{tr}(\cdot)$ – операция вычисления следа матрицы, E_s – энергия сигнала, N_0 – спектральная плотность мощность шума в канале.

3) Критерий максимальной пропускной способности SC-Capacity (Selection criterion capacity):

$$\mathbf{C}_k = \arg \max_{\mathbf{C}_l \in \mathbf{C}} \left(\log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_{rx,us}} + \frac{E_s}{N_0} \dot{\mathbf{C}}_l \mathbf{H}_k \mathbf{H}_k \dot{\mathbf{C}}_l \right) \right), \quad (7)$$

Из области обработки изображений известен метод случайного векторного квантования RVQ (Random Vector Quantization) [0]. Метод случайного векторного квантования может быть применен и для квантования информации о состоянии канала в случае, если производится построчное квантование матрицы канала или если в рассматриваемой антенной конфигурации абонентские станции оснащены одной приемопередающей антенной. При использовании метода RVQ каждое кодовое слово кодовой книги \mathbf{C} является случайным вектором, компоненты которого являются независимыми случайными величинами. Каждый вектор кодовой книги является единичным нормированным вектором: $\mathbf{c}_{l,norm} = \frac{\mathbf{c}_l}{|\mathbf{c}_l|}, |\mathbf{c}_{l,norm}| = 1$:

Квантование информации о состоянии канала абонента происходит путем поочередного поиска наиболее соответствующего кодового слова из кодовой книги \mathbf{c}_k согласно условию минимального расстояния:

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \mathbf{c}_l, \mathbf{c}_l = \arg \max_{\mathbf{c}_l \in \mathbf{C}} |\mathbf{h}_k \dot{\mathbf{c}}_l^H|, \quad (8)$$

где $\hat{\mathbf{h}}_k$ – квантованная матрица канала k -ой абонентской станции, представленная кодовым словом \mathbf{c}_l . Порядковый номер l выбранного вектора \mathbf{c}_l передается по каналу обратной связи для вычисления прекодирующей матрицы.

4. Использование многообразий Грассмана для квантования CSI

Кодовые слова используются абонентскими терминалами как квантованные значения информации о состоянии канала. Размер кодовой книги абонентской станции зависит от количества бит B , передаваемых по каналу обратной связи от абонентской станции к базовой станции. Соответственно, кодовая книга высокой размерности, позволяющая обеспечить квантование информации о состоянии канала с более частым шагом квантования, потребует большего значения B , а значит и более скоростного канала обратной связи, что не всегда возможно.

Каждое кодовое слово из кодовой книги представляет собой вектор, состоящий из комплексных случайных величин, совпадающий по размерности с вектором канала поль-

зователя. При наличии квантованных оценок состояния канала на стороне абонентских станций становится возможным вычисление или выбор прекодирующей матрицы, в зависимости от выбранного подхода к квантованию, способа организации канала обратной связи и количества абонентов.

В работах [0], [0], [0] предлагается составлять кодовые книги абонентских терминалов на основе грассманианов. Грассманиан $\mathbb{G}_{K,N}$ или многообразии Грассмана представляет собой набор K -мерных пространств в N -мерном комплексном пространстве. В случае грассманиана размерности (K, N) кодовую книгу одноантенной абонентской станции, состоящую из векторов можно представить как набор линий в N -мерном пространстве. Использование грассманианов удобно возможностью геометрического представления векторов и матриц различной размерности в заданном многомерном пространстве. В случае рассмотрения кодовой книги как грассманиана, появляется возможность упорядочить кодовые слова, представленные подпространствами в многомерном пространстве с помощью различных метрик [0].

Для составления кодовой книги абонентской станции необходимо сгенерировать набор комплексных векторов, расположенных на минимальном расстоянии друг от друга в N -мерном пространстве.

Существует большое количество метрик расстояний между кодовыми словами, но для случая абонентских станций, оснащенных одной антенной, кодовая книга будет состоять из линий грассманиана, т.е. из одномерных подпространств (векторов). В таком случае применима метрика расстояния:

$$d_{line}(\hat{\mathbf{c}}_l, \hat{\mathbf{c}}_m) = \sqrt{\left(1 - |\hat{\mathbf{c}}_m^H \hat{\mathbf{c}}_l|^2\right)}, \quad (9)$$

где знак (^) указывает на приведение к форме единичного нормированного вектора.

Для многоантенных абонентских станций представим кодовую книгу как матрицу \mathbf{C} размерности $L \times N$, состоящую из L/M_k матриц размерности $M_k \times N$, являющихся кодовыми словами:

$$\mathbf{C} = [\mathbf{C}_1 \quad \mathbf{C}_2 \quad \dots \quad \mathbf{C}_L], L = 2^B, \quad (10)$$

где $L = 2^B$, l — порядковый номер кодового слова. Структура кодовой книги абонентской станции показана на рис. 5.

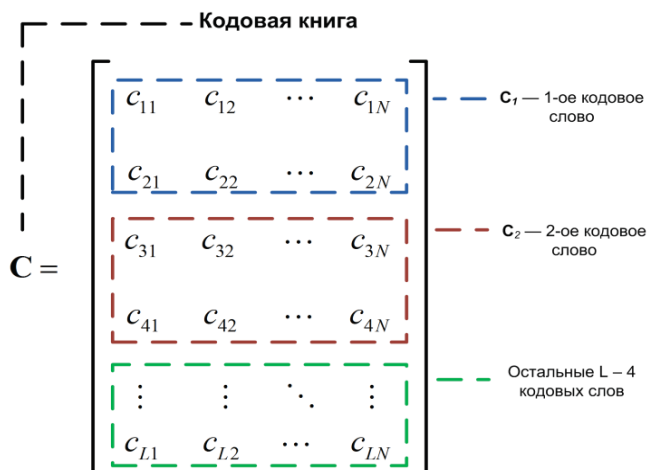


Рис. 5. Структура матричной кодовой книги

Каждое кодовое слово из кодовой книги представляет собой матрицу, состоящую из комплексных случайных величин, совпадающую по размерности с оценкой канала на стороне абонентской станции. При наличии квантованных оценок состояния канала на стороне абонентской станции становится возможным вычисление или выбор прекодирующей матрицы, в зависимости от выбранного подхода.

Согласно первому подходу к квантованию, для выбора наиболее подходящего кодового слова на приемной стороне используется метрика разности между матрицами:

$$\mathbf{F}_l = \arg \max_{\mathbf{F}_l \in \mathcal{F}} \|\mathbf{H}\tilde{\mathbf{F}}_l\|_F \quad (11)$$

где обозначение $\|\cdot\|_F$ указывает на операцию вычисления нормы Фробениуса, \mathbf{H} — оценка матрицы канала на стороне абонентского терминала размерности $N_{rx} \times N_{tx}$, \mathbf{F}_l — l -е кодовое слово, представленное матрицей размерности $N_{rx} \times N_{tx}$.

На рисунке 6 изображена функциональная схема процесса передачи данных по «нисходящему» каналу с прекодированием на основе квантованных оценок канала.

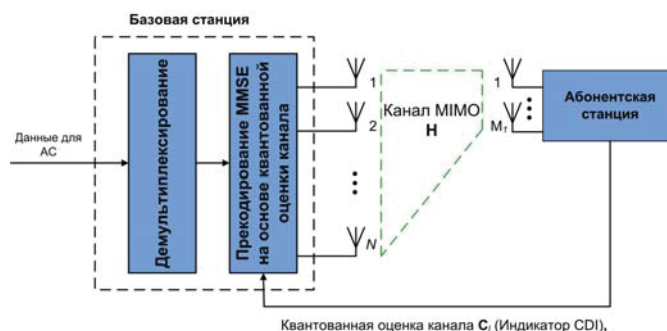


Рис. 6. Система MIMO с прекодированием на основе квантованных оценок канала

Для генерирования матричных кодовых книг на основе многообразий Грассмана возможно применение следующих метрик [0]:

- метрика Фубини-Штуди:

$$d_{FS}(\mathbf{F}_l, \mathbf{F}_m) = \arccos \left| \det(\mathbf{F}_m^H \mathbf{F}_l) \right|, \quad (12)$$

- метрика хордового расстояния:

$$d_{ch}(\mathbf{F}_l, \mathbf{F}_m) = \frac{1}{\sqrt{2}} \|\mathbf{F}_l \mathbf{F}_l^H - \mathbf{F}_m \mathbf{F}_m^H\|_F. \quad (13)$$

Алгоритм синтеза кодовой книги на основе грассманиана пошагово можно описать следующим образом.

<p>Начальные условия: l — порядковый номер кодового слова в кодовой книге ($l = 1, 2, \dots, L$), \mathbf{c}_l — первое кодовое слово кодовой книги F, d_{line} — метрика расстояния между кодовыми словами.</p> <p>Шаг 1. Генерирование l-го случайного вектора \mathbf{c}_l, элементы которого являются независимыми случайными комплексными числами с нулевым средним и единичной дисперсией.</p> <p>Шаг 2. Генерирование следующего $(l+1)$-го кодового слова с помощью генератора случайных векторов. Нормировка вектора \mathbf{c}_{l+1} к виду вектора с единичной нормой.</p>	(14)
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

Шаг 3. Вычисление расстояния между сгенерированным на шаге 2 вектором и всеми уже имеющимися в кодовой книге векторами с помощью метрики d_{line} .

Шаг 4. Повторение шага 2 и шага 3 с целью случайного поиска вектора \mathbf{c}_{l+1} в пространстве, отклоненного от вектора \mathbf{c}_m ($m = 1 \dots L, m \neq l$) на минимальное расстояние согласно метрике d_{line} .

Шаг 5. Выбор по результатам шага 4 вектора, максимизирующего минимальное расстояние согласно метрике d_{line} .

Шаг 6. Переход к шагу 2. В случае $l = L$ кодовая книга заполнена.

5. Результаты компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование системы MIMO с частотным дуплексом позволяет оценить эффективность квантования и потери при передаче частичной информации о состоянии канала.

Параметры моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры моделирования

Канал связи	MIMO
Замирания в канале	Рэлеевские некоррелированные
Антенная конфигурация	2x2
Архитектура	V-BLAST
Размер кодовой книги	128 кодовых слов
Метод модуляции	QAM-4
Количество экспериментов	10000

Для сравнения помехоустойчивости различных алгоритмов прекодирования в системе с антенной конфигурацией 2x2 была выбрана кодовая книга абонентской станции, состоящая из 128 кодовых слов, что требует передачи по каналу обратной связи всего 7 бит служебной информации и индикатора отношения сигнал/шум (SINR). С учетом того, что для представления одного комплексного коэффициента канала требуется 16 бит, передача полной матрицы канала требуется 64 бита ($M \times N \times 16, M = 2, N = 2$), не считая отдельно передаваемого индикатора SINR.

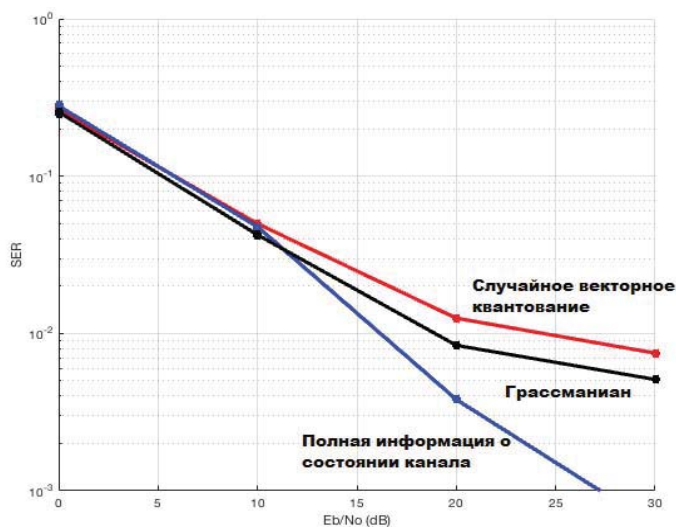


Рис. 7. Результаты сравнения алгоритмов квантования информации о состоянии канала

Из результатов компьютерного моделирования видно, что квантование с помощью грассманова многообразия приводит к меньшим энергетическим потерям по сравнению со случайным векторным квантованием RVQ.

Рассмотрим эффективность применения квантования информации о состоянии канала связи. Компьютерное моделирование системы MIMO позволяет оценить помехоустойчивость системы связи на стороне абонентской станции. Результаты моделирования иллюстрируют зависимости коэффициента ошибок на бит Bit-Error-Rate (BER) от среднего отношения сигнал/шум на входе одной приемной антенны для системы MIMO с прекодированием, использующим векторное квантование информации о состоянии канала с помощью векторов грассманиана различной размерности: 6 бит (64 вектора), 7 бит (128 вектора), 8 бит (256 вектора), 9 бит (512 вектора). Параметры моделирования приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры моделирования

Канал связи	MIMO
Замирания в канале	Рэлеевские некоррелированные
Антенная конфигурация	4x4
Архитектура	V-BLAST
Алгоритмы прекодирования	MMSE
Количество бит обратной связи для кодовой книги (количество состояний в кодовой книге)	6 бит (64 вектора) 7 бит (128 вектора) 8 бит (256 вектора) 9 бит (512 вектора)
Метод модуляции	QAM-4
Количество экспериментов	100000

На рисунке 8 приведены результаты сравнения помехоустойчивости без помехоустойчивого кодирования для известного алгоритма прекодирования MMSE на основе полной информации о состоянии канала на передающей стороне и на основе квантованной информации о состоянии канала на передающей стороне с помощью грассманианов.

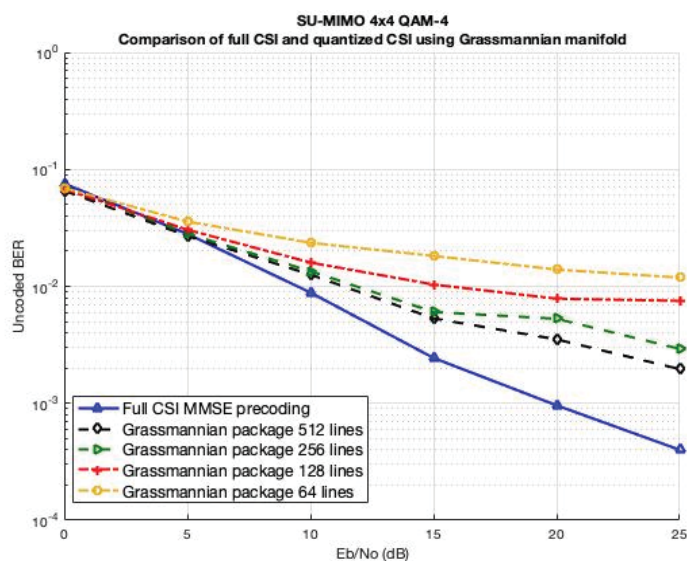


Рис. 8. Сравнение помехоустойчивости алгоритма прекодирования MMSE на основе полной информации о состоянии канала и квантованной с помощью векторного грассманиана

Результаты моделирования показывают, что векторное квантование информации о состоянии канала позволяет без потерь в помехоустойчивости на низких отношениях сигнал/шум до 5 дБ уменьшить объем данных передаваемых данных по каналу обратной связи до 6 бит. Для более высоких отношений сигнал/шум минимальные потери в помехоустойчивости обеспечивает кодовая книга из 512 векторов, требующая передачи по каналу обратной связи 9 бит. При этом потери составляют 2 дБ при уровне BER 10^{-2} .

Результаты моделирования на рисунке 9 показывают эффективность применения матричного квантования информации о состоянии канала. В качестве кодовой книги выступает грассманиана, состоящий из матриц размерности $N_{tx} \times N_{rx}$.

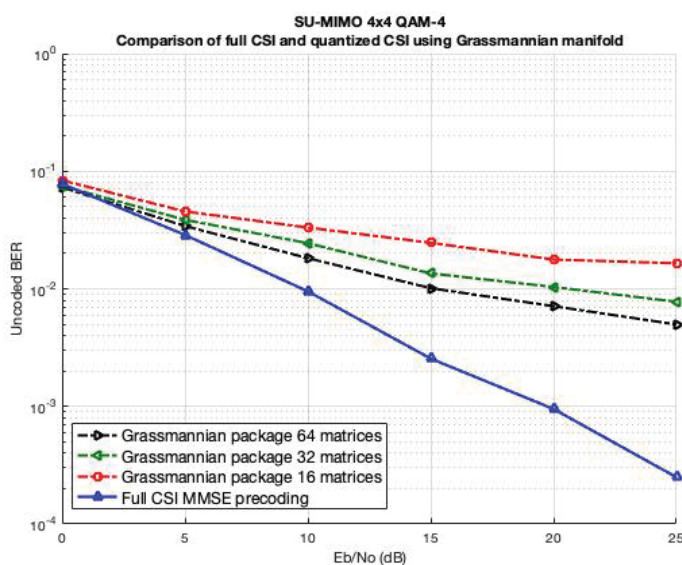


Рис. 9. Сравнение помехоустойчивости алгоритма прекодирования MMSE на основе полной информации о состоянии канала и квантованной с помощью матричного грассманиана

Применение матричного грассманиана позволяет еще больше снизить необходимое количество бит для представления информации о состоянии канала. Из результатов моделирования видно, что при отношениях сигнал/шум выше 5 дБ наблюдается значительное ухудшение характеристик помехоустойчивости.

Выводы

Процедура прекодирования, широко применяемая в системах MIMO, используется для максимальной адаптации к характеристикам радиоканала при формировании сигналов на передающей стороне. При этом процедура прекодирования наиболее необходима на низких отношениях сигнал/шум в канале. Результаты компьютерного моделирования показывают, что на низких уровнях отношений сиг-

нал/шум рассмотренные методы квантования информации о состоянии канала с помощью грассманианов позволяет достаточно эффективно (в несколько раз) минимизировать объем информации, передаваемый по каналу обратной связи.

Работа подготовлена на основе научных исследований, выполненных при финансовой поддержке Федерального агентства связи в рамках государственного контракта № ПЗЗ-1-26/13 «Развитие технологии MIMO для систем подвижной связи».

Литература

1. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 244 с.
2. Kreyndelin V., Smirnov A., Ben Rejeb T. Effective precoding and demodulation techniques for 5G communication systems // Proc. Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2018. P. 1-6.
3. Quoc-Tuong N. Généralisation des précodeurs MIMO basés sur la distance euclidienne minimale // Signal and Image processing. Université Rennes 1. 2012. 176 p.
4. Björnson E., Ntonin K. and Ottersten B. Channel quantization design in multiuser MIMO systems: Asymptotic versus practical conclusions // 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Prague. 2011. P. 3072-3075.
5. Куликов В.С. Геометрия Грассманиана G(2,4) // Московский государственный университет печати имени Ивана Федорова. Вестник МГУП им. Ивана Федорова. 2013. №2. С. 7-31.
6. Kreyndelin V.B., Ben Rejeb T.B.K. Nonlinear iterative precoding algorithm for MIMO multiuser systems // Radioelectronics and Communications Systems. 2017. Vol. 60, № 10. P. 449-457.
7. Love D.J., R. W. Heath, Jr., and T. Strohmer. Grassmannian Beamforming for Multiple-Input Multiple-Output Wireless Systems // IEEE Trans. on Info. Theory special issue on MIMO Communication. 2003. Vol. 49. P. 2735-2747.
8. Medra A., Davidson T. Flexible codebook design for limited feedback downlink systems via smooth optimization on the grassmannian manifold // IEEE 13th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). 2012. P. 50-54.
9. Brown III D.R., Love D.J. MIMO Nullforming with RVQ Limited Feedback and Channel Estimation Errors // Proceedings of the 48th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. 2014. P. 983-987.
10. Brijesh Kumbhani Rakesh Singh Kshetrimayum. MIMO Wireless Communications over Generalized Fading Channels – USA, NW, CRC Press 2017. 290 p.
11. Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э., Бен Режеб Т.Б.К. Эффективность методов обработки сигналов в системах MU-MIMO высоких порядков // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Том 10. №12. С. 24-30.
12. Athanasios G. Kanatas, Konstantina S. Nikita, Panagiotis Mathiopoulos. New Directions in Wireless Communications Systems. From Mobile to 5G – USA, NW, CRC Press 2018. 563 p.

REDUCING OF FEEDBACK CHANNEL INFORMATION IN MULTIPLE ANTENNA MIMO SYSTEMS

Mikhail G. Bakulin, Ph.D., MTUCI, Moscow, Russia, m.g.bakulin@gmail.com

Taoufik Ben Rejeb, MTUCI, Moscow, Russia, t.benrejeb@mtuci.ru

Vitaly B. Kreyndelin, Dr.Sc., MTUCI, Moscow, Russia, vitkrend@gmail.com

Aleksei E. Smirnov, MTUCI, Moscow, Russia, smirnov.al.ed@gmail.com

Abstract

Multiple antenna systems MIMO (Multiple input multiple output) are widely used in LTE-Advanced mobile systems and in the IEEE 802.11 radioaccess standards. In the international standard of 3GPP for mobile communication systems 5G New Radio (Release 15), MIMO systems are regulated as a fundamental technology of the new Air interface. In this paper, we consider algorithms for quantization of information about the channel state using Grassmann manifolds, which significantly reduce the amount of channel state information required for transmission. The results of computer simulation allow to evaluate the noise immunity of precoding algorithms based on Grassmannian manifold quantization.

Keywords: MIMO, precoding, Grassmannian manifold, quantization, metrics.

References

1. M.G. Bakulin, L.A. Varukina, V.B. Kreyndelin (2014). MIMO technology: principles and algorithms. Moscow: Hotline – Telecom. 244 p.
2. V. Kreyndelin, A. Smirnov, T. Ben Rejeb (2018). Effective precoding and demodulation techniques for 5G communication systems. *Proc. Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. P. 1-6.
3. Q N. Quoc-Tuong (2012). Ganaralisation des procodateurs MIMO basis sur la distance euclidienne minimale. *Signal and Image processing. University Rennes I*. 176 p.
4. E. Bjornson, K. Ntontin and B. Ottersten (2011). Channel quantization design in multiuser MIMO systems: Asymptotic versus practical conclusions. *2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Prague. P. 3072-3075.
5. V.S. Kulikov (2013). Geometry of the Grassmannian $G(2,4)$. *Ivan Fedorov Moscow State University of Printing Arts. Bulletin of MGUP im. Ivana Fedorov*. No.2. P. 7-31.
6. V.B. Kreyndelin, T.B.K. Ben Rejeb (2017). Nonlinear iterative precoding algorithm for MIMO multiuser systems. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol. 60. No. 10. P. 449-457.
7. D.J. Love, R.W. Heath, Jr., and T. Strohmer (2003). Grassmannian Beamforming for Multiple-Input Multiple-Output Wireless Systems. *IEEE Trans. on Info. Theory special issue on MIMO Communication*. Vol. 49. P. 2735-2747.
8. A. Medra, T. Davidson (2012). Flexible codebook design for limited feedback downlink systems via smooth optimization on the grassmannian manifold. *IEEE 13th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. P. 50-54.
9. D.R. Brown III, D.J. Love (2014). MIMO Nullforming with RVQ Limited Feedback and Channel Estimation Errors. *Proceedings of the 48th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. P. 983-987.
10. Brijesh Kumbhani Rakhesh Singh Kshetrimayum, MIMO Wireless Communications over Generalized Fading Channels. USA, NW, CRC Press 2017. 290 p.
11. V.B. Kreyndelin, A.E. Smirnov, T.B.K. Ben Rejeb (2016). Efficiency of Signal Processing Techniques in High Order MU-MIMO Systems. *T-Comm*. Vol 10. No.12. P. 24-30.
12. Athanasios G. Kanatas, Konstantina S. Nikita, Panagiotis Mathiopoulos (2018). New Directions in Wireless Communications Systems. From Mobile to 5G - USA, NW, CRC Press. 563 p.

Information about authors:

Mikhail G. Bakulin, Ph.D., associate prof., MTUCI, Moscow, Russia

Taoufik Ben Rejeb, Ph.D., associate prof., MTUCI, Moscow, Russia

Vitaly B. Kreyndelin, Dr.Sc., head of department, professor, MTUCI, Moscow, Russia

Aleksei E. Smirnov, Ph.D., associate prof., MTUCI, Moscow, Russia