

УДК 621.391.1

КООРДИНИРОВАННАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НА БАЗОВЫХ СТАНЦИЯХ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ С АДАПТИВНЫМ ВЫБОРОМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Г. В. Морозов, А. В. Давыдов, А. А. Мальцев

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Рассматривается задача координированной пространственной обработки сигналов на базовых станциях современных высокоскоростных систем сотовой связи, использующих OFDM-модуляцию (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) и адаптивные антенные решётки. В известных OFDM-системах связи с координированной пространственной обработкой сигналов (Coordinated Multi-Point Transmission, CoMP) выигрыш в пропускной способности достигается за счёт понижения уровня взаимных внутриканальных помех путём совместного формирования диаграмм направленности передающих антенн базовых станций. При этом предполагается, что на каждом передатчике используется линейная решётка с антенными элементами, имеющими одинаковую вертикальную поляризацию. В настоящей работе исследуется новый способ пространственной координации с помощью совместного согласования поляризаций сигналов на передающих базовых станциях, антенные решётки которых составлены из пар взаимно ортогональных антенных элементов. В этом случае подавление взаимных внутриканальных помех между базовыми станциями достигается за счёт адаптивного выбора типа поляризации сигнала на каждой передающей антенной решётке. В настоящей работе предлагается алгоритм координированной пространственной обработки сигналов с согласованием поляризаций и проводится анализ пропускной способности системы, использующей предложенную схему CoMP.

ВВЕДЕНИЕ

В современных широкополосных OFDM-системах (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) сотовой связи для повышения спектральной эффективности применяется планирование сети с повторным использованием частот в соседних сотах. В таких системах из-за одновременной передачи сигналов в одном частотном диапазоне в приёмнике пользователя возникают внутриканальные помехи от соседних базовых станций. Эти взаимные помехи становятся основным фактором, ограничивающим скорость передачи данных в системе. Особенно сильно влиянию внутриканальных помех подвержены пользователи, находящиеся на границах зон обслуживания базовых станций.

Для подавления внутриканальных помех в современных OFDM-системах связи широко применяются методы адаптивной пространственной обработки сигналов на многоэлементных приёмных антеннах абонента (пользователя). Хорошо известно, что пространственная обработка позволяет ослабить помехи от соседних станций путём формирования оптимальной диаграммы направленности на приёмной антенне абонента [1]. Однако, в силу небольшого числа антенн у приёмника, эффективность использования такой обработки ограничена. Другим способом борьбы с помехами является координированная пространственная обработка сигналов на передающих антеннах нескольких базовых станций (Coordinated Multi-Point transmission, CoMP) [2]. В схемах CoMP координация осуществляется между соседними базовыми станциями, объединёнными в так называемый кластер с помощью высокоскоростных линий связи. Применение адаптивных антенн и наличие высокоскоростных линий связи между базовыми станциями позволяет проводить предварительную совместную обработку передаваемых сигналов на базовых станциях таким образом, чтобы существенно уменьшить уровень взаимных внутриканальных помех в приёмнике абонента. Как было отмечено выше, понижение уровня внутриканальных помех является особенно важным для пользователей, находящихся на границах зон обслуживания базовых станций.

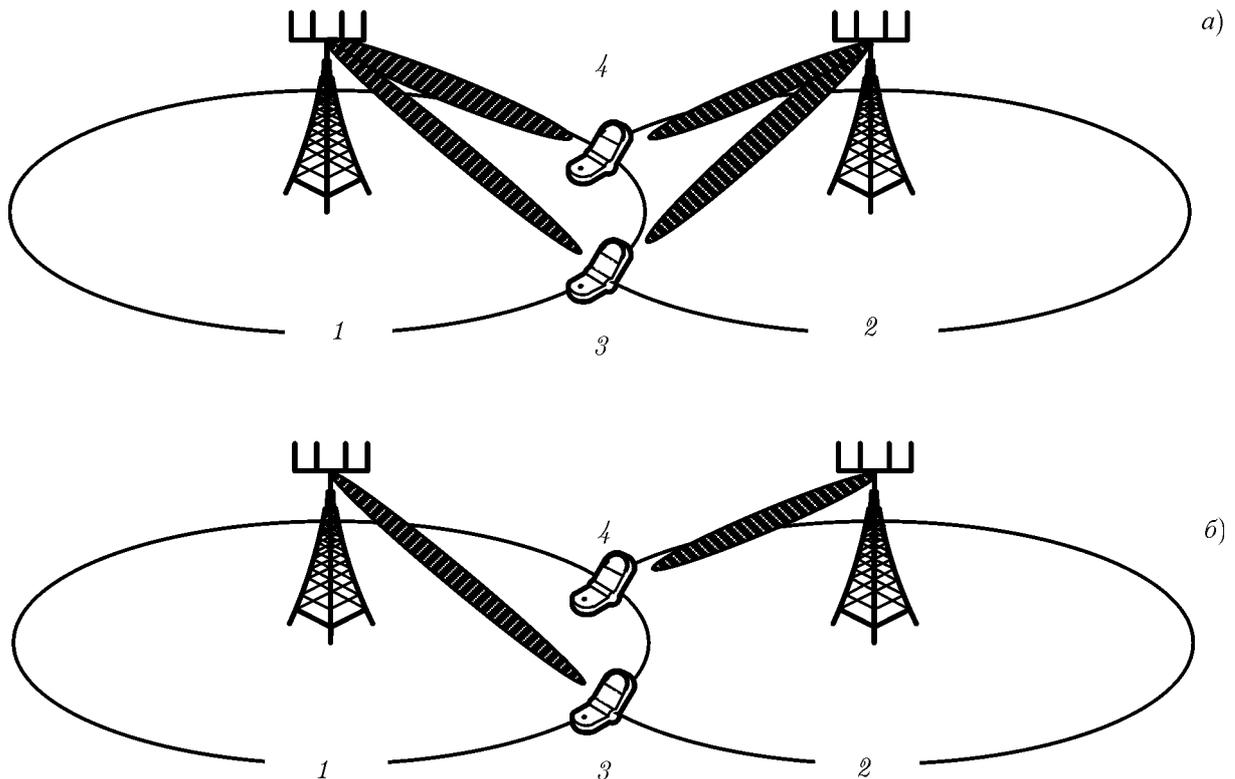


Рис. 1. Схемы координированной пространственной обработки сигналов JT CoMP (а) и CS/CB CoMP (б): 1 — базовая станция 1, 2 — базовая станция 2, 3 — абонент 1, 4 — абонент 2

В современных широкополосных системах сотовой связи использование схем CoMP является одним из наиболее перспективных способов повышения пропускной способности каналов для таких пользователей.

В общем случае схемы CoMP можно разделить на две группы [3]: схемы Joint Transmission (JT) CoMP с совместной передачей одинаковых данных одновременно с нескольких базовых станций и схемы Coordinated Scheduling and Coordinated Beamforming (CS/CB) CoMP с координированным планированием ресурсов и формированием диаграмм направленности для параллельной передачи различных данных одновременно нескольким пользователям. В схемах JT CoMP повышение пропускной способности каналов достигается за счёт совместной передачи полезных сигналов одновременно с нескольких базовых станций и их последующего когерентного приёма пользователем (см. рис. 1а). При этом пространственная обработка передаваемых сигналов осуществляется на элементах объединённой адаптивной антенны, географически распределённой по нескольким базовым станциям. Главным недостатком схемы JT CoMP является практическая сложность её реализации, связанная с необходимостью точной синхронизации передающих базовых станций, а также высокие требования к пропускной способности линий связи между базовыми станциями для обмена данными, передаваемыми пользователями. Напротив, схема CS/CB CoMP является менее чувствительной к ошибкам синхронизации, поскольку передача полезного сигнала для абонента осуществляется с одной базовой станцией (см. рис. 1б), а координация для подавления взаимных внутриканальных помех достигается путём подстройки диаграмм направленности передающих антенн соседних базовых станций на основе информации о состоянии перекрёстных (помеховых) каналов. Как следствие, схема CS/CB CoMP представляется более предпочтительной для использования на практике.

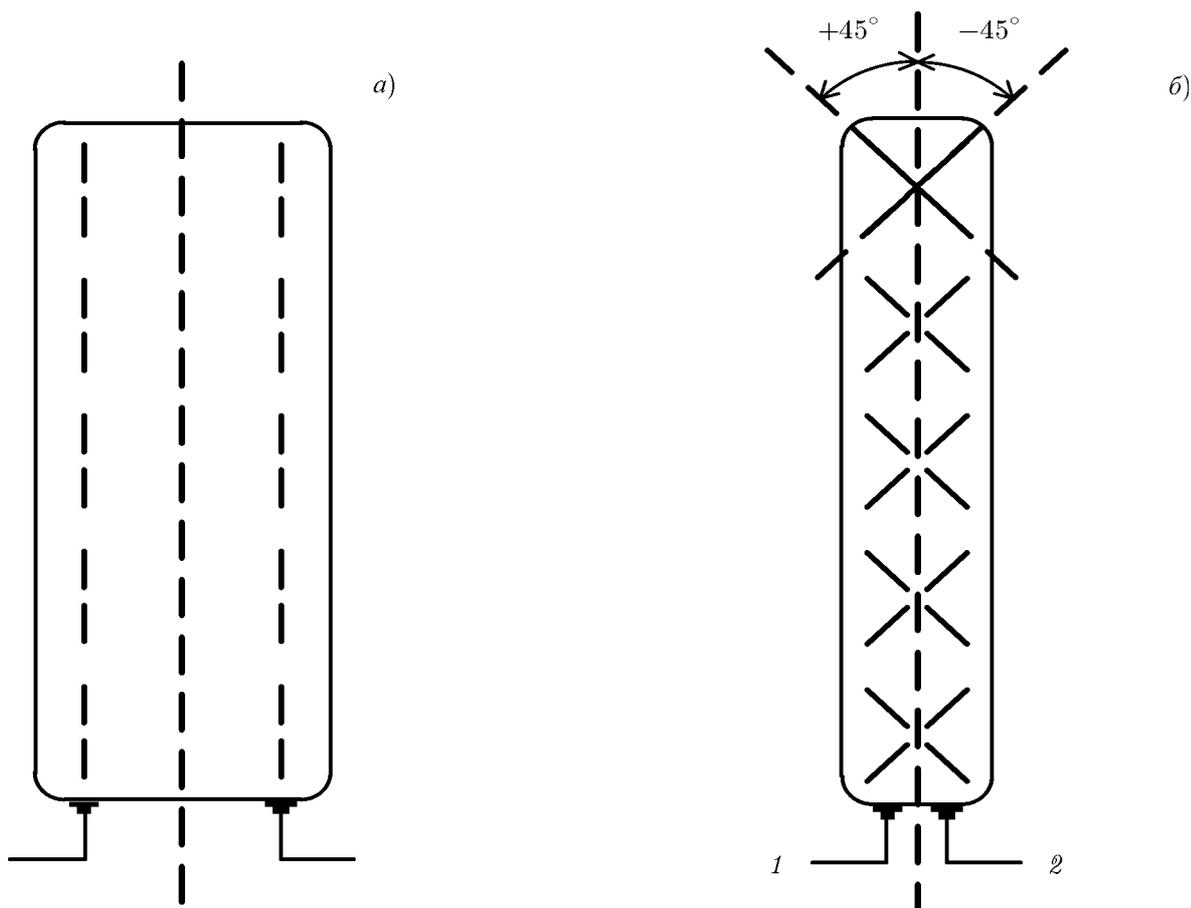


Рис. 2. Антенная конфигурация с вертикальной поляризацией антенных элементов (*a*) и антенная конфигурация с наклонной кросс-поляризацией антенных элементов (*б*); 1 — питание для излучателей с наклоном -45° , 2 — питание для излучателей с наклоном $+45^\circ$

Для совместного формирования диаграмм направленности в схеме CS/CB CoMP предполагается, что передатчики используют линейные антенные решетки с антенными элементами, имеющими вертикальную поляризацию (см. рис. 2*a*). На практике, однако, возможны и другие более сложные конфигурации антенн. Так, например, для повышения помехоустойчивости передачи служебных сообщений на базовых станциях применяются антенны с наклонной кросс-поляризацией [4]. Конструкция таких антенн представляет собой две независимые подсистемы излучателей, образующих решетку из пар взаимно ортогональных антенных элементов, расположенных симметрично вдоль вертикальной оси антенны и ориентированных под углами $+45^\circ$ и -45° к ней (см. рис. 2*б*). Данная конструкция существенно упрощает размещение антенны на базовой станции, а также позволяет улучшить её технические характеристики, т. е. достичь высокого коэффициента усиления антенны, низкого уровня боковых лепестков и т. д. [5]. К сожалению, в системах с кросс-поляризацией антенн применение адаптивного формирования диаграммы направленности для подавления помех с помощью схемы CS/CB CoMP не всегда возможно. Например, для антенны данного типа, состоящей из двух ортогональных подсистем излучателей (см. рис. 2*б*), адаптивное формирование азимутальной диаграммы направленности невозможно из-за отсутствия пространственного разнесения между антенными элементами в горизонтальной плоскости.

В данной работе рассматривается новый способ координированной пространственной обра-

ботки сигналов в широкополосных системах сотовой связи, использующих антенны с наклонной кросс-поляризацией. Координированная передача и, как следствие, понижение уровня внутри-канальных помех, в таких системах достигается за счёт адаптивного согласования поляризаций сигналов на антенных решётках нескольких базовых станций.

1. КООРДИНИРОВАННАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В АДАПТИВНЫХ АНТЕННАХ С НАКЛОННОЙ КРОСС-ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрим OFDM-систему сотовой связи, образованную из базовых станций, объединённых в несколько кластеров с помощью высокоскоростных линий связи. Будем считать, что в каждом кластере между базовыми станциями с помощью центрального процессора осуществляется координация параметров передачи сигналов, т. е. модуляции, скорости помехоустойчивого кодирования, весовых коэффициентов антенных решёток и т. д. Пусть OFDM-система связи функционирует в условиях частотно-селективных замираний. В этом случае для определения оптимальных параметров передачи для каждой базовой станции кластера центральный процессор должен обладать информацией о состоянии беспроводных каналов связи обслуживаемых абонентов для каждой поднесущей OFDM-частоты. В OFDM-системах связи эта информация, как правило, может быть получена на стороне пользователя на основе измерений параметров каналов и отправлена на обслуживающую базовую станцию с помощью служебных сообщений. Далее информация о состоянии каналов передаётся по высокоскоростным линиям связи в центральный процессор кластера для координации параметров передачи сигналов.

Предположим, что некоторый кластер состоит из N координируемых базовых станций, имеющих N_t передающих антенн, и M обслуживаемых абонентов, каждый из которых имеет N_r приёмных антенн. Передаточные функции канала для i -го абонента и j -й базовой станции на каждой поднесущей частоте описываются комплексными матрицами $\mathbf{H}_{ij}(l)$ размерности $N_r \times N_t$, где l — индекс рассматриваемой поднесущей OFDM-частоты. Абонент может определить матрицу $\mathbf{H}_{ij}(l)$, принимая от базовой станции известные опорные (пилотные) сигналы. Допустим, что абонент на основе найденной таким образом матрицы $\mathbf{H}_{ij}(l)$ вычисляет главный собственный вектор \mathbf{v}_{ij} и отношение сигнал/(шум плюс помеха) γ_{ij} , соответствующие j -й базовой станции. При этом для эффективной (экономной) передачи на обслуживающую базовую станцию вычисленных значений \mathbf{v}_{ij} используется векторное квантование по кодовой книге \mathbf{C} , преобразующее вычисленный главный собственный вектор в ближайший квантованный вектор \mathbf{p}_{ij} из кодовой книги. Отношение сигнал/(шум плюс помеха) вычисляется абонентом в соответствии с выражением

$$\gamma_{ij} = \sigma_{ij}^2 / \left(\sigma_0^2 + \sum_{k=1, k \neq j}^N \sigma_{ik}^2 \right). \quad (1)$$

Здесь σ_{ij}^2 — мощность сигнала, принятого i -м пользователем от рассматриваемой базовой станции j , σ_{ik}^2 — мощность принятого сигнала от базовой станции k , принадлежащей к тому же кластеру, что и j -ая базовая станция, σ_0^2 — суммарная мощность сигналов, принятых от базовых станций, расположенных вне рассматриваемого кластера, и аддитивного шума приёмного тракта абонента.

В обычных системах связи без координации значения \mathbf{p}_{ij} и γ_{ij} вычисляются приёмником абонента только для обслуживающей базовой станции, при этом \mathbf{p}_{ij} , как правило, используется в качестве весового вектора в адаптивной антенной решётке передатчика, а γ_{ij} применяется для

выбора оптимального по помехоустойчивости формата передачи, т. е. модуляции и скорости кодирования. При этом обмен информацией о состоянии канала пользователей между соседними базовыми станциями в обычных системах связи не проводится. В рассматриваемых системах CoMP канальная информация γ_{ij} и \mathbf{p}_{ij} может быть вычислена приёмником пользователя для мешающих, т. е. помеховых, базовых станций, создающих наиболее сильные внутриканальные помехи данному пользователю. Далее эта информация отправляется на обслуживающую базовую станцию и, благодаря наличию линий связи между базовыми станциями и центральным процессором кластера, используется центральным процессором для координации передачи между базовыми станциями одного кластера. Для подавления взаимных помех между базовыми станциями внутри кластера центральный процессор проводит расчёт оптимальных весовых векторов каждой базовой станции кластера методом минимизации среднеквадратичной ошибки. В соответствии с этим методом значение весового вектора \mathbf{p}_{ij} диаграммы направленности базовой станции j для обслуживаемого пользователя i в схеме CS/CB CoMP модифицируется следующим образом [6]:

$$\mathbf{w}_{ij} = \left(\sum_{m \in \mathbf{S}} \gamma_{mj} \mathbf{p}_{mj} \mathbf{p}_{mj}^H + \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{p}_{ij}, \quad (2)$$

где \mathbf{S} — множество активных абонентов, обслуживаемых соседними базовыми станциями, \mathbf{p}_{mj} и γ_{mj} — информация о состоянии канала между абонентом m , обслуживаемым соседней базовой станцией, и рассматриваемой базовой станцией j , верхний индекс H означает операцию эрмитова сопряжения и \mathbf{I} — единичная матрица с размерностью $N_t \times N_t$.

В схеме CS/CB CoMP, в отличие от обычной схемы без координации, i -й пользователь оценивает отношение сигнал/(шум плюс помеха) для j -й базовой станции без учёта мощности помех от других станций кластера:

$$\gamma_{ij} = \sigma_{ij}^2 / \sigma_0^2, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

Это необходимо для последующего перерасчёта (подстройки) отношения сигнал/(шум плюс помеха) для i -го пользователя центральным процессором кластера. Оценка отношения сигнал/(шум плюс помеха) (3) осуществляется пользователем для каждой базовой станции кластера при помощи специальных опорных сигналов, свободных от помех, создаваемых другими базовыми станциями рассматриваемого кластера.

Можно показать [6], что в минимизации среднеквадратичной ошибки (2) осуществляется поворот исходного весового вектора \mathbf{p}_{ij} в пространство, образованное векторами обратной ковариационной матрицы помехи. Этот поворот осуществляется таким образом, чтобы уровень внутриканальной помехи от базовой станции j пользователю m , обслуживаемому соседней базовой станцией кластера, стал сравнимым с уровнем внешних, т. е. неконтролируемых помех, характеризуемых значением отношения сигнал/(шум плюс помеха) γ_{mj} (3). Тем самым достигается понижение уровня внутриканальных помех, создаваемых пользователями соседних базовых станций.

В схемах CoMP центральный процессор кластера после вычисления весовых векторов \mathbf{w}_{ij} обслуживающей и мешающих базовых станций может осуществить перерасчёт отношения сигнал/(шум плюс помеха) в соответствии с новой помеховой обстановкой, а также учесть искажение весового вектора \mathbf{p}_{ij} передатчика базовой станции из-за применения (2). Например, перерасчёт отношения сигнал/(шум плюс помеха) $\hat{\gamma}_{ij}$ для пользователя можно выполнить, используя значе-

ния γ_{ik} и \mathbf{p}_{ik} , соответствующие k -й помеховой базовой станции, с помощью выражения

$$\hat{\gamma}_{ij} = \frac{|\mathbf{p}_{ij}^H \mathbf{w}_{ij}|^2 \sigma_{ij}^2}{\sigma_0^2 + \sum_{k=1, k \neq j}^N |\mathbf{p}_{ik}^H \mathbf{w}_{ik}|^2 \sigma_{ik}^2} = \frac{|\mathbf{p}_{ij}^H \mathbf{w}_{ij}|^2 \gamma_{ij}}{1 + \sum_{k=1, k \neq j}^N |\mathbf{p}_{ik}^H \mathbf{w}_{ik}|^2 \gamma_{ik}}. \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет предсказать мгновенное отношение сигнал/(шум плюс помеха) на приёмнике i -го абонента на основе информации о весовых векторах координируемых базовых станций \mathbf{w}_{ik} для последующего адаптивного выбора модуляции и скорости помехоустойчивого кодирования.

Заметим, что в традиционных системах без координированной пространственной обработки сигналов такое предсказание невозможно из-за отсутствия информации о состоянии канала мешающих станций, т. е. величинах γ_{ik} и \mathbf{p}_{ik} , и весовых векторах \mathbf{w}_{ik} , используемых на соседних базовых станциях. При этом эффективность работы обычной системы связи, использующей быструю адаптацию формата передачи данных к мгновенной реализации канала, является невысокой из-за непредсказуемости уровня внутриканальных помех, создаваемых мешающими базовыми станциями.

Стоит отметить, что передача сигнала от обслуживающей базовой станции и подавление помех от координируемых базовых станций в схемах CoMP происходят одновременно. В этом случае выбор квантованного вектора \mathbf{p}_{ij} из кодовой книги для координируемых базовых станций, т. е. квантование главного собственного вектора, должен осуществляться абонентом в предположении одинаковой пространственной обработки сигналов от базовых станций на приёмнике. Поэтому вектор \mathbf{p}_{ik} для помеховой базовой станции k должен быть вычислен на приёмнике абонента i следующим образом:

$$\mathbf{p}_{ik} = \arg \max_{\mathbf{c} \in \mathbf{C}} \sum_l |\mathbf{u}_{ij}(l) \mathbf{H}_{ik}(l) \mathbf{c}|^2, \quad (5)$$

где $\mathbf{u}_{ij}(l)$ — весовой вектор адаптивной антенны приёмника i -го абонента на поднесущей частоте l , вычисленный для обслуживающей базовой станции j , \mathbf{c} — весовой вектор из кодовой книги \mathbf{C} .

Рассмотрим далее координированную пространственную обработку сигналов на примере антенной решётки, состоящей из двух подсистем излучателей (рис. 2). Для антенной конфигурации с наклонной кросс-поляризацией (см. рис. 2б) такая решётка состоит из пар ортогональных антенных элементов. Каждый элемент при этом имеет наклонную поляризацию $+45^\circ$ или -45° относительно вертикальной оси решётки. Для квантования собственных векторов канальной матрицы обслуживающей и мешающих базовых станций будем использовать кодовую книгу современного стандарта широкополосной связи 3GPP LTE-Advanced [7], приведённую в табл. 1 (здесь $j^2 = -1$). Данная кодовая книга состоит из четырёх векторов, кодируемых с помощью служебного сообщения с длиной 2 бита, каждый из которых имеет размерность 2×1 .

Заметим, что для конфигурации антенн с вертикальной поляризацией элементов (см. рис. 2а), весовой вектор \mathbf{p}_{ij} , полученный из кодовой книги, определяет диаграмму направленности передатчика базовой станции в горизонтальной плоскости. В случае же конфигурации антенны с наклонной кросс-поляризацией (см. рис. 2б) данный весовой вектор \mathbf{p}_{ij} определяет поляризацию передаваемого сигнала — вертикальную, горизонтальную, левую круговую или правую круговую. В силу различных физических механизмов

Таблица 1. Весовые векторы кодовой книги

| \mathbf{c}_1 | \mathbf{c}_2 | \mathbf{c}_3 | \mathbf{c}_4 |
|---|--|---|--|
| $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ | $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$ | $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix}$ | $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix}$ |

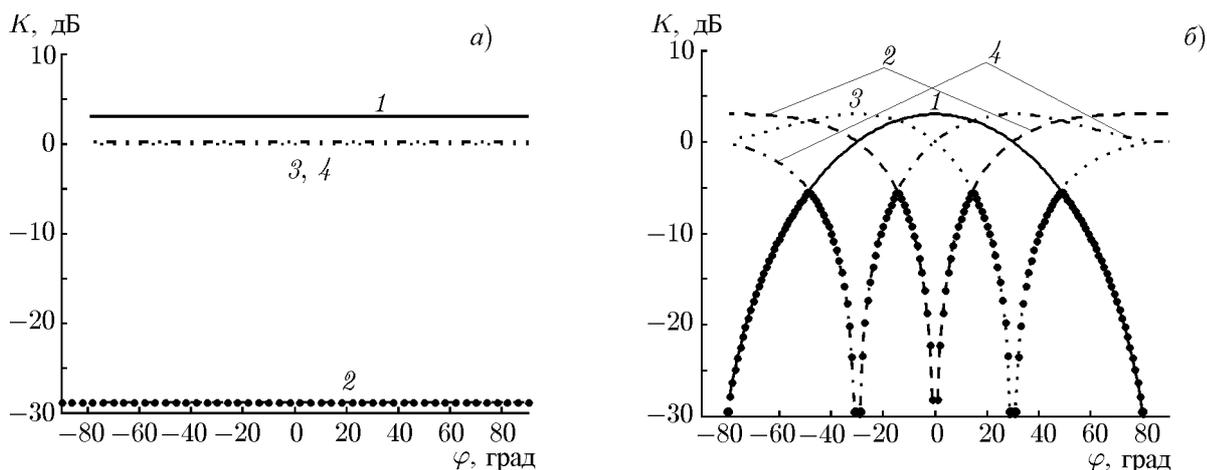


Рис. 3. Эффективность подавления помех на передатчике базовой станции с адаптивным выбором типа поляризации (наклонная кросс-поляризация передающих антенн) (а) и эффективность подавления помех на передатчике базовой станции с адаптивным формированием диаграммы направленности (вертикальная поляризация передающих антенн) (б). Здесь K — коэффициент усиления, φ — азимутальное положение пользователя. Сплошная линия отвечает весовому вектору c_1 , пунктирная — c_2 , точечная — c_3 , штрихпунктирная — c_4 , кружки — оптимальному подавлению. На панели (а) пунктир совпадает с кружками, а точки — с штрихпунктиром

адаптации передачи сигнала эффективность подавления внутриканальных помех на передатчике базовой станции будет зависеть от конфигурации антенн. Так, для антенной конфигурации с вертикальной поляризацией уровень подавления помехи изменяется в зависимости от азимутального положения пользователя. Напротив, для антенной конфигурации с кросс-поляризацией данная зависимость не наблюдается.

Проиллюстрируем зависимость эффективности подавления помехи пользователю от его азимутального положения. Для этого рассмотрим абонента, приёмник которого оснащён адаптивной антенной из двух элементов с ортогональными линейными поляризациями. Пусть весовые коэффициенты приёмной антенны абонента выставлены для оптимального приёма вертикально поляризованного сигнала. Будем считать, что центральный процессор адаптивно выбирает для мешающей базовой станции весовой вектор из кодовой книги (см. табл. 1) таким образом, чтобы минимизировать уровень создаваемой помехи. Из рис. 3а легко видеть, что для базовой станции с кросс-поляризацией антенных элементов подавление внутриканальной помехи с помощью согласования поляризации сигналов на передатчике приводит к равномерному подавлению помехи вне зависимости от азимутального положения пользователя относительно физической нормали передающей антенной решётки. При этом максимальное подавление (-30 дБ) достигается, когда для мешающей базовой станции выбирается весовой вектор, формирующий горизонтальную поляризацию передаваемого сигнала. Для сравнения на рис. 3б точками показан уровень остаточной помехи, который может обеспечить мешающая базовая станция, если она оборудована передающей антенной решёткой с вертикальной поляризацией излучателей. В этом случае подавление помехи в направлении на пользователя происходит за счёт адаптивной подстройки диаграммы направленности на передатчике с помощью весовых векторов кодовой книги из табл. 1. Из рисунка видно, что в зависимости от азимутального положения пользователя эффективность подавления внутриканальной помехи существенно меняется. Так, для азимутального положения пользователя 50° обеспечивается подавление помехи -5 дБ, в то время как для азимутального положения 80° подавление достигает -30 дБ.

2. ПРИМЕР АДАПТАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ПОЛЯРИЗАЦИЙ ПЕРЕДАВАЕМЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМЕ СВЯЗИ С ДВУМЯ БАЗОВЫМИ СТАНЦИЯМИ

В исследуемых в настоящей работе системах CoMP с кросс-поляризованными антеннами подавление взаимных внутриканальных помех при передаче сигналов достигается путём согласования поляризаций на передатчиках соседних базовых станций. Для иллюстрации механизма такого согласования поляризаций рассмотрим кластер, состоящий только из двух базовых станций. Предположим, что антенные решётки базовых станций состоят из двух подсистем передающих антенных элементов с наклонной кросс-поляризацией (см. рис. 2б), а каждый пользователь имеет антенну из двух элементов с ортогональными линейными поляризациями. При этом будем считать, что центральный процессор кластера осуществляет обработку сигналов согласно уравнениям (2) и (4).

Рассмотрим одного пользователя, обслуживаемого базовой станцией № 1. Тогда для него базовая станция № 2 является мешающей. Допустим, что в качестве оптимальных весовых векторов базовой станции № 1 пользователь выбирает первый кодовый вектор кодовой книги стандарта LTE-Advanced (см. табл. 1), формирующий вертикальную поляризацию. При этом для повышения помехоустойчивости весовые коэффициенты $\mathbf{u}_{ij}(l)$ адаптивной антенны приёмника абонента будут согласованно выбраны таким образом, чтобы обеспечить оптимальный приём сигнала, имеющего вертикальную поляризацию. Очевидно, что в этом случае сигналы мешающих станций с вертикальной поляризацией будут создавать наиболее сильную помеху рассматриваемому пользователю. Поэтому абонент, согласно выражению (5), выберет для мешающей базовой станции № 2 весовой вектор, соответствующий вертикальной поляризации, поскольку при таком весовом векторе антенной системы станции № 2 создаётся наиболее сильная помеха абоненту. Для уменьшения уровня внутриканальных помех и согласования поляризации сигнала значения весовых коэффициентов базовой станции № 2 необходимо модифицировать с помощью выражения (2). Легко показать, что при высоком уровне помех ($\gamma_{ik} \gg 1$) модифицированные весовые векторы базовой станции № 2 будут соответствовать горизонтальной поляризации. Таким образом, поскольку вертикальная и горизонтальная поляризации являются ортогональными, процедура (2) будет обеспечивать существенное подавление внутриканальных помех на приёмнике рассматриваемого абонента.

Динамика выбора поляризаций, полученная путём численного моделирования рассматриваемой системы из двух базовых станций (обслуживаемой и мешающей) показана на рис. 4. На нём приведены зависимости индексов весовых векторов кодовой книги из табл. 1 от номера кадра для обычной системы без координации (рис. 4а) и системы CoMP с согласованием поляризации (рис. 4б). Из сравнения графиков можно видеть, что комбинация ортогональных, т. е. вертикальной и горизонтальной, поляризаций наиболее часто используется для системы с координированной передачей. Это объясняется процедурой согласования поляризаций сигнала (2), проводимой для передатчиков базовых станций в системах связи CoMP.

Помимо согласования поляризаций, схема CoMP позволяет проводить корректировку отношения сигнал/(шум плюс помеха) в зависимости от выбранных весовых векторов \mathbf{w}_{ik} на мешающих станциях, см. выражение (4). Данная корректировка предсказывает мгновенный уровень внутриканальных помех на приёмнике абонента и, как следствие, позволяет центральному процессору кластера наиболее точно выбрать формат передачи данных для текущей помеховой обстановки. Для иллюстрации точности предсказания рассмотрим зависимость выбора формата передачи, т. е. индекса комбинации модуляции и скорости кодирования, от номера кадра, для случая обычной системы без координации (рис. 5а) и системы CoMP с согласованием поляризаций (рис. 5б).

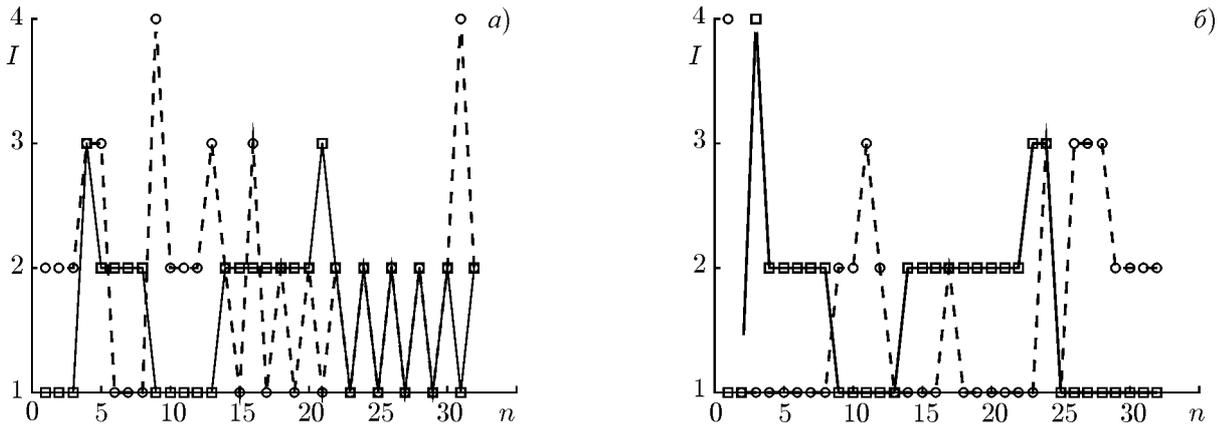


Рис. 4. Зависимость используемой поляризации сигнала на базовой станции от номера кадра для обычной системы без координации (а) и то же для системы CoMP (б). Квадратики отвечают обслуживающей базовой станции, кружки — мешающей базовой станции, I — индекс весового вектора s_I , n — номер кадра

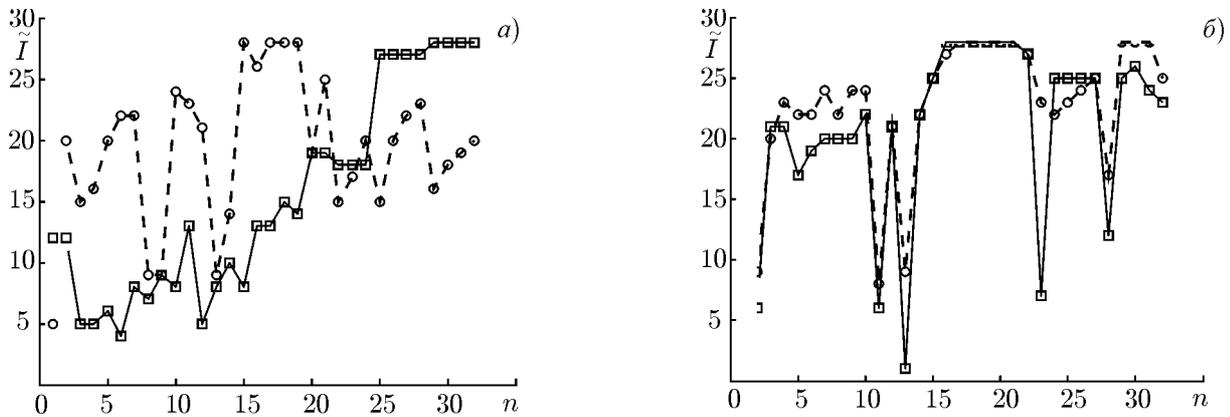


Рис. 5. Зависимость используемого формата передачи, т. е. индекса комбинации модуляции и скорости кодирования \tilde{I} , от номера кадра n для обычной системы без координации (а) и то же для системы CoMP (б). Квадратики отвечают индексу \tilde{I} сообщения обслуживающей станции, кружки — оптимальному \tilde{I}

В качестве опорных кривых на графиках приведены индексы оптимальных комбинаций модуляции и скорости кодирования, обеспечивающих вероятность пакетной ошибки не более 10 %. Легко видеть, что для систем CoMP с согласованием поляризаций формат передачи наиболее близок к оптимальному.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ СВЯЗИ CoMP НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА 3GPP LTE-ADVANCED С СОГЛАСОВАНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИЙ НА БАЗОВЫХ СТАНЦИЯХ

Для оценки эффективности применения предложенной схемы CoMP в системах с наклонной кросс-поляризацией антенн и адаптивным согласованием поляризаций было разработано специальное программное обеспечение для численного моделирования работы сотовой системы связи на основе стандарта 3GPP LTE-Advanced, использующего OFDM-модуляцию. Моделируемая система представляла собой неоднородную сеть, состоящую из двух типов базовых станций: макростанций с высокой мощностью передаваемого сигнала и микростанций с малой мощностью пе-

редаваемого сигнала. Передача сигнала в реализованной модели системы связи осуществлялась в полосе частот 10 МГц (1024 поднесущих OFDM-частот, 600 из которых использовались для передачи сигналов [7]) с 19-ти базовых макростанций, расположенных в узлах плоской гексагональной решётки [8]. Каждая базовая макростанция с помощью трёхсекторных антенн разделяла зону обслуживания на три области. Для повышения пропускной способности системы, в зоне обслуживания каждого сектора размещались 4 базовые микростанции, использующие антенные решётки из всенаправленных антенных элементов [9]. Исследовались два типа расположения пользователей в зоне обслуживания — равномерное и неравномерное. В случае равномерного типа расположения пользователи случайным образом равномерно размещались в зоне обслуживания каждого сектора. При этом, в силу различия передаваемой мощности для различных станций, среднее число абонентов, обслуживаемых базовой макростанцией, существенно превышало среднее число пользователей, обслуживаемых базовой микростанцией. При неравномерном типе расположения число пользователей, обслуживаемых базовыми микростанциями, возрастало из-за дополнительной группы абонентов, случайно вбрасываемой равномерно в радиусе 40 м вокруг каждой базовой микростанции.

Для сценария CoMP с координированной передачей, т. е. согласованием поляризацій, базовые станции объединялись в кластер, состоящий из 3-х секторов одной базовой макростанции и 12-ти базовых микростанций, расположенных в зоне обслуживания базовой макростанции. Каждый пользователь, принимающий сигнал в режиме координации, сообщал информацию о состоянии канала для группы из 60 поднесущих частот для обслуживающей станции, т. е. величины \mathbf{p}_{ij} и γ_{ij} , и для не более, чем двух мешающих станций кластера, т. е. значения \mathbf{p}_{ik} и γ_{ik} , $k \neq j$. При этом информация о канале мешающей станции вычислялась пользователем только в том случае, если мощность принимаемого сигнала от данной станции была выше 10 % от мощности обслуживающей станции. В противном случае считалось, что базовая станция не участвует в координации передачи для рассматриваемого пользователя и мощность её внутриканальной помехи учитывалась в значении σ_0^2 (3). В этих условиях для пользователей базовых микростанций, расположенных на границах зон обслуживания, наиболее сильным источником помех, как правило, являлась ближайшая базовая макростанция.

Для передачи данных использовалась однопользовательская схема MIMO (Multiple Input Multiple Output) [7, 8] с полным буфером очереди трафика. Планирование, т. е. назначение, частотно-временных ресурсов осуществлялось централизованно для всех пользователей, обслуживаемых базовыми станциями одного кластера, с помощью «жадного» алгоритма пропорциональной очерёдности выполнения [10]. На каждом этапе его выполнения частотно-временной ресурс базовой станции назначался пользователю, повышающему суммарное значение пропускной способности кластера и имеющему максимальное значение метрики PF_i , определяемой выражением

$$PF_i = F(\hat{\gamma}_{ij}) / T_i, \quad (6)$$

где F — функция преобразования мгновенного отношения сигнал/(шум плюс помеха) $\hat{\gamma}_{ij}$ в текущую пропускную способность пользователя, а T_i — средняя пропускная способность для i -го пользователя в некотором временном интервале (при моделировании системы этот интервал брался равным 100 кадрам). При этом согласование поляризацій (2), корректировка мгновенного отношения сигнал/(шум плюс помеха) (4) и вычисление значения метрики (6) осуществлялись для пользователей базовых станций кластера на основе решения, полученного в результате выполнения предыдущего этапа алгоритма. Другие параметры системы, используемые при моделировании, приведены в табл. 2.

Результаты моделирования для обычной системы без координации и системы CoMP, использующей координируемую передачу, представлены в табл. 3. В ней приведены зависимости средней

Таблица 2. Параметры моделирования

| | |
|---|----------|
| Расстояние между базовыми макростанциями | 500 м |
| Модель распространения сигнала от базовой макростанции к пользователю | ITU UMa |
| Модель распространения сигнала от базовой микростанции к пользователю | ITU UMi |
| Скорость пользователя | 3 км/ч |
| Мощность передатчика базовой макростанции | 46 дБм |
| Мощность передатчика базовой микростанции | 30 дБм |
| Коэффициент усиления антенны пользователя | 0 дБ |
| Шум-фактор приёмника абонента | 9 дБ |
| Спектральная плотность мощности теплового шума | -174 дБм |
| Диапазон частот | 2 ГГц |
| Полоса передачи | 10 МГц |
| Число передающих антенн базовой станции | 2 |
| Число приёмных антенн пользователя | 2 |
| Целевая вероятность пакетной ошибки | 10 % |
| Задержка передачи обратной информации | 10 мс |

Таблица 3. Результаты моделирования

| Сценарий | Расположение пользователей | Средняя пропускная способность базовой станции, Мбит/с | 5-процентная пропускная способность пользователя, кбит/с |
|----------------------------------|----------------------------|--|--|
| Передача данных без координации | Равномерное | 16,3 (0 %) | 230 (0 %) |
| Координированная передача данных | Равномерное | 15,9 (-2 %) | 360 (57 %) |
| Передача данных без координации | Неравномерное | 19,8 (0 %) | 350 (0 %) |
| Координированная передача данных | Неравномерное | 19,1 (-4 %) | 620 (77 %) |

пропускной способности базовых станций и средней пропускной способности пользователей на границе зоны обслуживания от сценариев передачи данных и различных расположений абонентов. Пропускная способность пользователя на границе зоны обслуживания определяется как значение, соответствующее 5-процентному уровню в интегральной функции вероятности пропускной способности всех пользователей сети. В табл. 3 для каждого варианта расположения пользователей также указан относительный выигрыш в пропускной способности от применения предложенной координированной пространственной обработки сигналов на базовых станциях. В качестве опорных значений для сравнения используются результаты для сценариев передачи данных без координации. Представленные в таблице результаты получены путём статистического усреднения по многим независимым реализациям расположения пользователей, а также беспроводных каналов между пользователями и базовыми станциями. Число реализаций было достаточным для достижения погрешности измерения средней пропускной способности менее 5 %. Из представленных результатов видно, что использование схемы CoMP с согласованием поляризации приводит к

существенному увеличению пропускной способности пользователей на границах зон обслуживания без значительного изменения средней пропускной способности базовых станций, т. е. системы связи в целом. При этом максимальный выигрыш (77 %) от координации наблюдается в случае неравномерного расположения пользователей, когда передача сигналов с использованием схемы CoMP выполняется для большого числа пользователей.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследован новый способ координированной пространственной обработки сигналов в широкополосных системах сотовой связи, на базовых станциях которых используются антенны с наклонной кросс-поляризацией. Рассмотренная пространственная обработка сигналов основана на адаптивном согласовании поляризаций передаваемых сигналов на антенных решётках базовых станций. Показано, что использование такой координированной передачи обеспечивает существенный выигрыш в пропускной способности для пользователей, находящихся на границах зон обслуживания, при незначительном понижении суммарной средней пропускной способности системы связи в целом. Высокая эффективность предложенной схемы CoMP объясняется тем, что согласование поляризаций на базовых станциях приводит к значительному понижению уровня взаимных помех вне зависимости от азимутального положения абонентов и позволяет выбирать оптимальный формат передачи данных, т. е. модуляцию и скорость помехоустойчивого кодирования, для текущей помеховой обстановки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов А. В., Мальцев А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 6. С. 474.
2. US Patent 7912014. Method and apparatus for reducing interference in multiple-input-multiple-output (MIMO) systems/ Molisch A. F., Clark M. V., Dai H., et al.
3. Sawahashi M., Kishiyama Y., Morimoto A., et al. // Wireless Communications. IEEE, 2010. No. 3. P. 26.
4. Gibson J. D. The mobile communications handbook. CRC Press, 1999. P. 720.
5. Johannisson B., Derneryd A. // Proc. Antenna Applications Symposium. 1999. P. 98.
6. Patcharamaneepakorn P., Armour S., Doufexi A. // Communications Lett. IEEE, 2012. V. 16, No. 7. P. 1034.
7. 3GPP TS 36.211. V10.3.0. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Physical channels and modulation: Release 10. 2011. P. 103.
8. 3GPP TR 36.814. V9.0.0. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects: Release 9. 2010. P. 107.
9. 3GPP TS 36.819. V11.1.0. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects: Release 11. 2011. P. 69.
10. Lau V. // IEEE GLOBECOM'02. 2002. P. 763.

Поступила в редакцию 30 июля 2012 г.; принята в печать 30 августа 2012 г.

**COORDINATED SPATIAL SIGNAL PROCESSING AT THE BASE STATIONS
OF THE CELLULAR COMMUNICATION SYSTEMS WITH ADAPTIVE
POLARIZATION CHOICE**

G. V. Morozov, A. V. Davydov, and A. A. Mal'tsev

We consider the problem of the coordinated spatial processing of signals at the base stations of modern high-throughput wireless cellular systems using Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and adaptive antenna arrays. In the existing OFDM systems with Coordinated Spatial Transmission (CoMP), the user throughput improvement is achieved via co-channel interference mitigation by means of coordinated transmit beamforming at the base stations. For such schemes, it is assumed that each base station transmitter is equipped with linear antenna array comprising a set of elements with the same vertical polarization. In this paper, a new approach to spatial coordination is studied using the joint coordination of the signal polarizations at the transmitting base stations whose antenna arrays are made of the pairs of the mutually orthogonal antenna elements. In this case, co-channel interference mitigation between the base stations is achieved via the adaptive choice of the signal polarization at each transmitting antenna array. An algorithm of coordinated spatial processing with polarization selection is proposed in this work and the analysis of the system throughput is conducted for the proposed CoMP scheme.