

ТЕОРИЯ И ТЕХНИКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.391.1

АНАЛИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ КООРДИНИРОВАННУЮ ПЕРЕДАЧУ С ПОДАВЛЕНИЕМ ВЗАИМНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ НА ПЕРЕДАТЧИКЕ

© 2011 г.

Г.В. Морозов¹, И.А. Болотин², А.В. Давыдов¹

¹Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

²Научно-исследовательский радиофизический институт, Н. Новгород

gregory.v.morozov@gmail.com

Поступила в редакцию 29.06.2011

Рассматривается задача координированной передачи с подавлением взаимной интерференции в современных системах сотовой связи. Подавление интерференции производится на базовых станциях с помощью адаптивного формирования диаграмм направленности на антенных решетках передатчиков. С помощью математического моделирования изучена пропускная способность системы радиосвязи с координированной передачей для модели трафика с конечным буфером данных. Проведено сравнение пропускной способности системы связи без координации и системы с координацией для различных значений загрузки и числа координируемых базовых станций.

Ключевые слова: система сотовой связи, координация передачи, подавление взаимной интерференции на передатчике, адаптивная антенная решетка, пропускная способность, системное моделирование.

Введение

Ограниченность доступного частотного диапазона и высокая плотность абонентов в современных OFDMA системах (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) связи вызывает рост взаимных внутриканальных помех между передающими соседними базовыми станциями (сотами). Это приводит к тому, что помехи от соседних базовых станций являются основным фактором, ограничивающим эффективность работы системы в целом. На практике для борьбы с взаимными помехами может применяться пространственная обработка сигналов с использованием адаптивных антенных решеток (AAR) [1, 2]. В системах сотовой радиосвязи дополнительная пространственная обработка переданных сигналов на AAR может значительно ослабить помеховые сигналы от соседних станций, приходящие на приемник с определенных направлений. В частности, для борьбы с взаимной интерференцией в современных системах связи используется метод координированной передачи с пространственной обработкой на передатчике. В таких системах подавление взаимной интерференции проводится за счет адаптивного формирования диаграммы направленности на AAR передатчика. При этом формирование диаграмм направленности при передаче данных координи-

руется между базовыми станциями и проводится с учетом помех, создаваемых ими для пользователей, обслуживаемых соседними базовыми станциями. Исследования показали, что такая координированная передача с адаптивной пространственной обработкой сигналов позволяет существенно повысить пропускную способность системы связи в целом [3–5].

Следует отметить, что несмотря на значительный интерес характеристики схем передачи с координацией между базовыми станциями, как правило, исследовались для модели трафика с полной загрузкой буфера данных на передатчике [4, 5]. При этом количество данных, передаваемых пользователям, не ограничивалось и определялось только частотно-временными ресурсами (набором поднесущих и OFDM символов), выделяемыми для передачи. В реальных системах связи количество данных, передаваемых пользователям, как правило, ограничено размером запрашиваемого информационного пакета. При этом число частотно-временных ресурсов, выделяемых пользователю для передачи, становится зависимым от размера информационного пакета данных и качества канала между обслуживающей базовой станцией и пользователем. Так, для пользователей, находящихся на границе зоны обслуживания, число

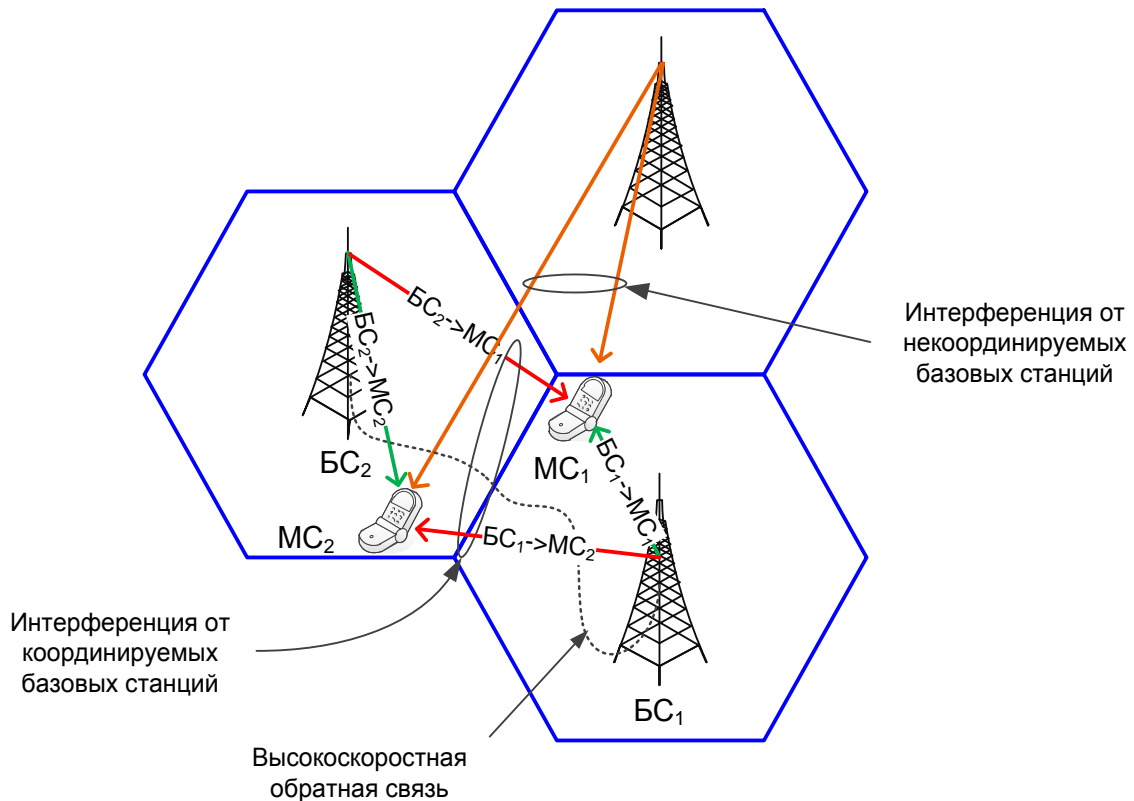


Рис. 1. Модель системы с координацией и подавлением взаимной интерференции

используемых частотно-временных ресурсов для передачи пакета фиксированной длины обычно превышает число частотно-временных ресурсов, выделяемых пользователям, находящимся в центре зоны обслуживания. Анализ пропускной способности систем связи с адаптивной координированной пространственной обработкой сигналов при конечной загрузке буфера данных в известных нам работах не приводился.

Модель координированной передачи с подавлением взаимной интерференции

Задача подавления интерференции внутри одной соты была достаточно хорошо изучена для систем связи с пространственным разделением пользователей [6, 7]. В таких системах пропускная способность, главным образом, ограничена уровнем интерференции от сигналов, передаваемых одной обслуживающей базовой станцией. Эффективность системы в этом случае определяется уровнем подавления интерференции внутри одной соты. В системах с координированной передачей данных возникает более сложная задача подавления помех, создаваемых пользователями в соседних сотах.

Для простоты рассмотрим сначала задачу координации между двумя базовыми станциями – BC_1 и BC_2 , соединенными между собой высокоскоростным (например, оптическим) каналом обратной связи (см. рис. 1). Предположим, что BC_1 и BC_2 при передаче данных могут применять адаптивные методы формирования диаграмм направленности с использованием пространственной обработки сигналов на антенной решетке. При этом пространственная обработка в ААР передатчика первой базовой станции (BC_1) должна обеспечивать оптимальный прием сигналов обслуживаемым ей пользователем MC_1 (максимизировать сигнал на линии $BC_1 \rightarrow MC_1$) с одновременным подавлением излучаемого сигнала на пользователя MC_2 соседней базовой станции BC_2 , и наоборот. Рассмотрим более подробно возможный механизм подавления интерференции на BC_1 (минимизацию интерферирующего сигнала на линии $BC_1 \rightarrow MC_2$). Будем считать, что собственные векторы каналов связи известны на обеих базовых станциях. Обозначим главные собственные векторы каналов между базовой станцией BC_1 и пользователями MC_1 и MC_2 как $\mathbf{v}^{(BC_1 \rightarrow MC_1)}$ и $\mathbf{v}^{(BC_1 \rightarrow MC_2)}$ соответственно. Вектор $\mathbf{v}^{(BC_1 \rightarrow MC_2)}$, описывающий интерферирующий канал, изме-

руется MC_2 и возвращается через обслуживающую его базовую станцию BC_2 на первую базовую станцию BC_1 через высокоскоростной канал обратной связи. Базовая станция BC_1 на основе вектора $\mathbf{v}^{(BC_1 \rightarrow MC_1)}$, полученного от собственного пользователя MC_1 , и вектора $\mathbf{v}^{(BC_1 \rightarrow MC_2)}$, полученного от соседней координирующей станции BC_2 , находит матрицу диаграммообразующих векторов (ДОВ) для ААР на BC_1 , понижающую интерференцию для пользователя MC_2 . Например, матрица диаграммообразующих векторов базовой станции BC_1 может быть сформирована с помощью выражения [4]

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1^{(BC_1 \rightarrow MC_1)} \quad \mathbf{w}_2] = \mathbf{V}(\mathbf{V}^H \mathbf{V})^{-1}, \quad (1)$$

где матрица $\mathbf{V} = [\mathbf{v}^{(BC_1 \rightarrow MC_1)} \quad \mathbf{v}^{(BC_1 \rightarrow MC_2)}]$ является объединением главных собственных векторов каналов между пользователями MC_1 , MC_2 и базовой станцией BC_1 , $(\cdot)^H$ – операция эрмитова сопряжения матрицы. Матрица диаграммообразующих векторов $\mathbf{w}_1^{(BC_1 \rightarrow MC_1)}$ базовой станции BC_1 в этом случае соответствует первым столбцам матрицы \mathbf{W} в уравнении (1). Поскольку BC_1 не обслуживает пользователей соседней базовой станции BC_2 , матрица \mathbf{w}_2 не используется для передачи данных. Легко проверить, что полученная таким образом матрица диаграммообразующих векторов $\mathbf{w}_1^{(BC_1 \rightarrow MC_1)}$ является ортогональной к главным собственным векторам интерферирующего канала:

$$\mathbf{v}^{(BC_1 \rightarrow MC_2)H} \mathbf{w}_1^{(BC_1 \rightarrow MC_1)} = 0. \quad (2)$$

В этом случае диаграмма направленности ААР базовой станции BC_1 , определяемая матрицей ДОВ $\mathbf{w}_1^{(BC_1 \rightarrow MC_1)}$, имеет ноль в направлении на пользователя MC_2 соседней базовой станции.

Очевидно, что подавление интерференции BC_1 на пользователей соседних базовых станций может приводить к уменьшению коэффициента усиления диаграммы направленности антенны на обслуживаемого пользователя MC_1 . В реальности из-за наличия интерференции от соседних базовых станций, не участвующих в

координации, идеальное подавление интерференции у пользователя MC_2 не требуется. Путем добавления регуляризационного параметра в уравнение для вычисления матрицы ДОВ можно достичь подавления интерференции у пользователя до уровня суммарной внешней интерференции от соседних базовых станций, при этом минимизировать негативное влияние на обслуживаемого пользователя MC_1 . В этом случае уравнение для вычисления матрицы ДОВ записывается следующим образом:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1^{(BC_1 \rightarrow MC_1)} \quad \mathbf{w}_2] = \mathbf{V} \left(\mathbf{V}^H \mathbf{V} + \begin{pmatrix} \gamma_1^{-1} & 0 \\ 0 & \gamma_2^{-1} \end{pmatrix} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где γ_i – регуляризационные параметры, определяемые отношением уровня интерференции от координирующей станции к суммарной интерференции от остальных базовых станций.

Модель трафика с конечной загрузкой буфера данных

Реализуемые на практике системы передачи данных характеризуются конечной загрузкой буфера данных информационными пакетами. Это приводит к неравномерной загрузке ресурсов передающей базовой станции. Поскольку буфер данных в течение некоторого интервала времени может не содержать данных для передачи обслуживаемым пользователям, интерференция в системе, как правило, является нестационарной. Для моделирования неравномерной интенсивности потока данных, возникающей в реальных системах, в данной работе рассматривается модель трафика, соответствующая протоколу файловой передачи данных FTP (File Transfer Protocol), см. [8]. Согласно модели FTP трафика появление пакетов длины (размера) S мегабайт описывается с помощью пуассоновского процесса. Пуассоновский процесс задается параметром λ , характеризующим среднюю частоту появления пакетов для передачи пользователям в соте. Рис. 2 иллюстрирует рассматриваемую модель FTP трафика.

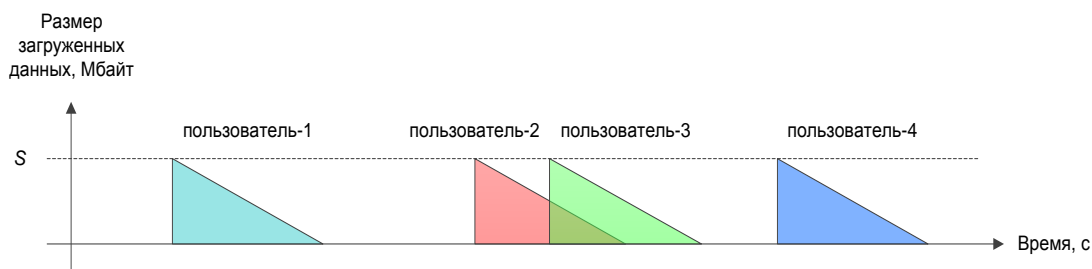


Рис. 2. Модель FTP трафика

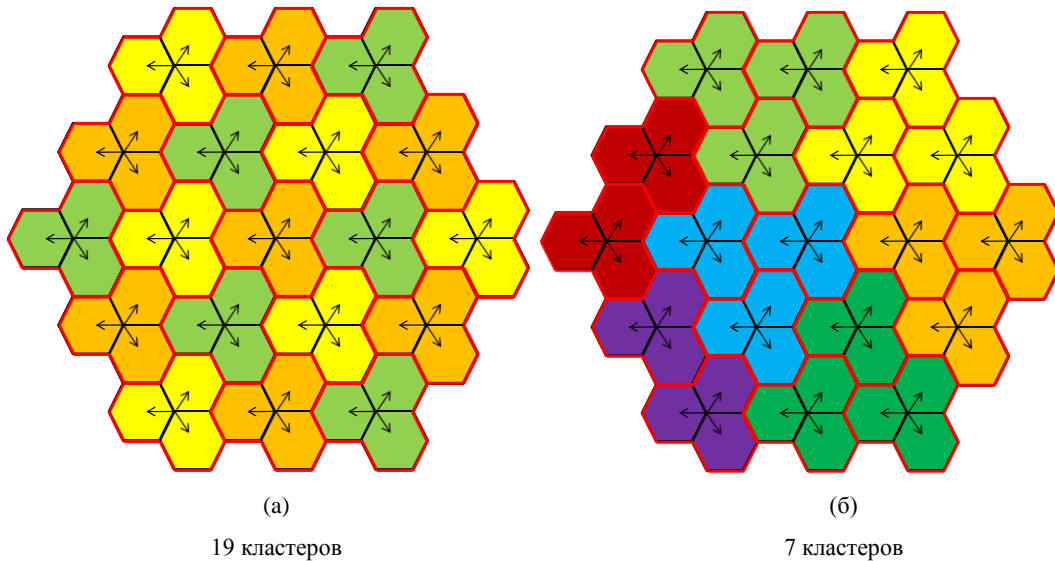


Рис. 3. Гексагональная структура системы сотовой связи с координируемыми кластерами

Таким образом, суммарная величина трафика в соте, T Мбайт/с, будет равна

$$T = \lambda \cdot S, \quad (4)$$

т. к. она определяется частотой появления пакетов λ и размером файла S для передачи.

Каждый пользователь, принимающий сигнал в режиме координации, сообщает обратную информацию о канале для обслуживающей и одной интерферирующей станции кластера. При этом обратная информация для интерферирующей станции передается пользователем только в том случае, если принимаемая мощность с данной интерферирующей станции превышает суммарную мощность от всех остальных интерферирующих станций. Обратная информация о канале для обслуживающей станции состоит из рекомендуемой матрицы диаграммообразующих векторов (ДОВ), рекомендуемой схемы модуляции и кодирования для стандартного режима без координации, а также индикатора числа пространственных потоков. Обратная информация для интерферирующей станции состоит из матрицы ДОВ, описывающей главный собственный вектор интерферирующего канала, и рекомендуемой схемы модуляции и кодирования для режима координации. Квантование ДОВ производится путем поиска матрицы ДОВ в заранее определенной кодовой книге, состоящей из 16-ти элементов.

Пространственная обработка сигнала проводилась на ААР передатчика, состоящей из 4 антенн, имеющих вертикальную поляризацию и отстоящих друг от друга на расстояние половины длины волны. Модель распространения сигнала между передающей базовой станцией и

пользователем соответствовала сценарию 3GPP Case-1 [8]. Параметры моделирования приведены в табл. 1.

Результаты моделирования

Для исследования эффективности работы систем с координацией, использующих FTP модель трафика с конечной загрузкой буфера данных, была реализована система радиосвязи на основе стандарта 3GPP e-UTRA Release-10 [9]. Передача сигнала в реализованной модели осуществлялась с 19 базовых станций, расположенных в узлах плоской гексагональной решетки. Каждая базовая станция с помощью трехсекторных антенн разделяла зону обслуживания на три области. Для сценария с координированной передачей базовые станции объединялись в 19 и 7 координирующих кластеров (см. рис. 3).

Результаты моделирования для стандартной системы без координации и системы, использующей координируемую передачу, представлены в таблице 2. Показана зависимость пропускной способности соты, средней пропускной способности пользователя и средней пропускной способности пользователей на границе зоны обслуживания от частоты появления пакета λ размером $S = 2$ Мбайт. Пропускная способность пользователя на границе зоны обслуживания определяется как значение, соответствующее 5% уровню в интегральной плотности вероятности пропускной способности всех пользователей системы. Легко видеть, что выигрыш в пропускной способности пользователя на границе зоны обслуживания от использования координированной передачи растет с уве-

Таблица 1

Параметры моделирования	
Расстояние между базовыми станциями	500 м
Модель распространения	3GPP Case 1
Скорость пользователя	3 км/ч
Диаграмма направленности	3-х мерная
Мощность передатчика	46 дБм
Коэффициент усиления антенны пользователя	0 дБ
Шум фактор приемника	9 дБ
Спектральная плотность мощности теплового шума	-174 дБм
Частота несущей	2 ГГц
Полоса передачи	10 МГц
Число передающих антенн базовой станции	4
Число приемных антенн пользователя	2
Целевая вероятность пакетной ошибки	10%
Задержка передачи обратной информации	10 мкс
Модель трафика	FTP с конечной загрузкой

Таблица 2

Результаты моделирования					
Формат передачи	λ , с ⁻¹	пропускная способность соты, кбит/с	5% пропускная способность пользователя, кбит/с	средняя пропускная способность пользователя, кбит/с	процент использования ресурсов, %
Без координации	0.3	4614	11644	29705	17.1
Без координации	0.5	7419	6527	22703	33.8
Без координации	0.7	10123	2802	15587	55.1
Коорд. 3 секторов	0.3	4598	11752	29674	17.3
Коорд. 3 секторов	0.5	7444	6895	22950	33.4
Коорд. 3 секторов	0.7	10137	2833	15828	54.1
Коорд. 9 секторов	0.3	4618	11722	29678	17.3
Коорд. 9 секторов	0.5	7452	7014	22595	33.9
Коорд. 9 секторов	0.7	10207	3444	16092	54.0

личением загрузки соты и, как следствие, с ростом взаимной интерференции между базовыми станциями. При этом максимальный выигрыш достигается при загрузке канала, равной 54–55%. В свою очередь, общая пропускная способность соты (суммарная величина трафика) для рассматриваемой модели трафика существенно не зависит от формата передачи и, главным образом, определяется частотой появления пользователей в сети λ .

Заключение

В настоящей работе проведен анализ пропускной способности сотовой системы связи с координацией пространственной обработки сигналов, использующей алгоритмы подавления взаимных помех на передатчике. Проведено сравнение пропускной способности базовой системы без координации и системы с координацией для модели трафика с конечной загрузкой бу-

фера данных. Показано, что при увеличении загрузки канала использование координированной передачи приводит к росту пропускной способности пользователей, находящихся на границе зоны обслуживания. При этом эффективность схем координации возрастает с ростом числа координируемых базовых станций.

Список литературы

1. Minghai F., Xiaoming S., Lan C. Enhanced Dynamic Cell Selection with Muting Scheme for DL CoMP in LTE-A // Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st, 2010.
2. S. Brueck et al. Centralized Scheduling for Joint-Transmission Coordinated Multi-Point in LTE-Advanced // Proc. ITG/IEEE Wksp. Smart Antennas '10, Bremen, Germany, Feb. 2010.
3. Sawahashi M., Kishiyama Y., Morimoto A. Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced [Coordinated and Distributed MIMO] // Wireless Communications. IEEE. 2010. V. 17. June.

4. Qiang L., Yang Y., Shu F. Zero-Forcing Beamforming with Limited Feedback in Coordinated Multi-Point Transmission // International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, 2010.
5. Zhang H. and Dai H. Cochannel interference mitigation and cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. Feb. 2004.
6. Peel C.B., Hochwald B.M., Lee Swindlehurst A. Vector-Perturbation Technique for Near-Capacity Multi-antenna Multiuser Communication. Part I: Channel Inversion and Regularization // IEEE Trans. Communication. 2005. V. 53. № 1.
7. Stankovic V., Haardt M. Generalized Design of Multi-User MIMO Precoding Matrices // IEEE Trans. Wireless Communications. 2008. V. 7. № 3.
8. 3GPP TR 36.814, «Further Advancements of E-UTRA Physical Layer Aspects», V.9.0.0, March 2010.
9. 3GPP TS 36.211, «Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation», V.10.0.0, January 2010.

**CAPACITY ANALYSIS OF MODERN CELLULAR COMMUNICATION SYSTEMS
WITH COORDINATED MULTI-POINT TRANSMISSION
AND INTER-CELL INTERFERENCE SUPPRESSION AT THE TRANSMITTER**

G.V. Morozov, I.A. Bolotin, A.V. Davydov

The problem of coordinated transmission in modern cellular communication systems with mutual interference suppression is considered. The interference suppression for such systems is performed at the base station transmitter arrays by using adaptive beamforming algorithms. The capacity of a radio communication system with coordinated transmission for a non-full buffer FTP traffic model has been studied by mathematical simulation. A capacity comparison of systems with and without coordinated transmission has been made for different numbers of coordinating cells and different levels of system loading.

Keywords: cellular communication systems, coordinated multi-point transmission, inter-cell interference suppression at the transmitter, adaptive antenna array, throughput, system simulation.