## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sesia, S. LTE – The UMTS Long Term Evolution / S. Sesia, I. Toufik, M. Baker. – A John Wiley & Sons, 2011. – 752 p.

2. Шорин, О.А. Снижение негативного влияния высоких значений пик-фактора сигналов в системе McWILL / О.А. Шорин, Г.О. Бокк // Экономика и качество систем связи. – 2019. – № 1 (11). – С. 9-13.

**3. Трифонов, А.П.** Оценка параметров сигналов на фоне помех / Е.И. Куликов, А.П. Трифонов. – М.: Сов. радио, 1978. – 296 с.

4. LTE. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception // 3GPP TS 36.104 version 9.4.0 Release 9 (2010-07). – 98 p.
5. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio transmission and reception // GSM 05.05 version 6.3.1 Release 1997. – 52 p.

6. Аджемов, С.С. Исследование алгоритмов сверхразрешения в адаптивных антенных решетках / С.С. Аджемов, Г.О. Бокк, А.Г. Зайцев // Радиотехника. – 2000. – № 11. – С. 66-71.

7. Аджемов, С.С. Модифицированный алгоритм пространственного разрешения источников радиоизлучения SDS-MUSIC, работающий при многолучевом распространении сигналов / С.С. Аджемов, Г.О. Бокк, А.Г. Зайцев и др. // Радиотехника. – 2003. – № 11. – С. 80.

8. Шорин, О.А. Аналитическое решение вариационной задачи Шеннона по определению оптимальной структуры сигнала в условиях ограниченной пиковой мощности / О.А. Шорин, Г.О. Бокк // Экономика и качество систем связи. – 2018. – № 1 (7). – С. 30-39.

9. Шорин, О.А. Численные результаты решения вариационной задачи Шеннона определения оптимальной структуры сигнала в условиях ограниченной пиковой мощности / О.А. Шорин, Г.О. Бокк // Экономика и качество систем связи. – 2018. – № 1 (7). – С. 39-47.

10. Шорин, О.А. Оптимальная структура дискретной QAM-модуляции, обеспечивающая максимум информационной производительности радиоканала / О.А. Шорин, Г.О. Бокк // Экономика и качество систем связи. – 2018. – № 3 (9). – С. 9-17.

Получено 23.04.21

# Алгоритм хэндовера системы МАКВИЛ в режиме устранения конфликтов распределения ресурсов канала связи

P.C. Аверьянов, директор по производству ООО «HCTT»; ars@nxtt.org

#### УДК 621.391:621.396

DOI: 10.34832/ELSV.2021.19.6.004

Аннотация. Рассмотрен режим хэндовера системы МАКВИЛ, предназначенный для устранения конфликтов распределения ресурсов радиоканала и ориентированный на пространственную селекцию радиосигналов абонентов соседних базовых станций (БС), осуществляемую 8-элементными адаптивными антенными решетками (ААР). Представлен алгоритм управления ААР БС, направленный на ликвидацию конфликтов при максимальных нагрузках. Приведено описание алгоритма пространственной селекции, ориентированного на условия возможного отсутствия трасс прямой видимости и, как следствие, произвольных законов амплитудно-фазовых распределений полей на антеннах. Установлена численная связь между энергетическим запасом на краях зон обслуживания и эквивалентным угловым расстоянием между абонентами, достаточным для бесконфликтного пространственного разделения одинаковых спектрально-временных ресурсов. Показано, что ввод управляемого параметра задержки в режиме синхронизации позволит реализовать в МАКВИЛ пространственное разделение абонентов, обслуживаемых одной БС.

Ключевые слова: адаптивная антенная решетка, базовая станция, бесконфликтное распределение ресурса, пространственная селекция, взаимная корреляция, референсные сигналы.

### введение

Для современных систем подвижной связи в качестве одного из ключевых показателей эффективности используется значение достижимой производительности обмена по радиоканалу при заданных спектральных ограничениях [1, 2]. Разработанные методы и алгоритмы практически вплотную вышли на теоретический уровень производительности в системах 3G. Даже продвинутые методы модуляции, учитывающие специфические условия ограничений группового сигнала [3], не позволяют ни в аналоговом [4, 5], ни в цифровом [6] вариантах получить заметного выигрыша. Поэтому в системах 4G и 5G для достижения качественно новых показателей производительности стали активно применять еще не использованные в полной мере техно-

логии пространственной селекции сигналов (ПСС), открывающие доступ к существенному дополнительному ресурсу. Начали внедряться такие методы обработки как MIMO [1, 2, 7] и адаптивного формирования луча диаграммы антенны, сопровождающего движения абонента [8–11]. Пример системы, использующей адаптивные антенны на БС, представляет технология МАКВИЛ.

Известные результаты, относящиеся к методам и алгоритмам пространственно-временной обработки, в подавляющем большинстве ориентированы на режим связи одного абонента [2, 8, 10, 11]. Специфические требования, связанные с организацией коллективной работы, а также режим хэндовера для перераспределения ресурсов, порождающих конфликты, пока в теории и практике пространственной обработки в должной мере не исследованы.

Исключение составляет публикация [9], в которой предлагается метод активного применения режима ПСС в алгоритме управления распределением ресурсов для достижения максимума производительности. В работе рассматривается только случай разрешения конфликтов, когда доступны оценки направлений прихода сигналов. Однако на практике, особенно в городских условиях, более характерны ситуации с многолучевым распространением (рис. 1). В таких случаях определить угловые направления прихода интерферирующих сигналов практически невозможно. Известные методы пространственного разрешения [9–12] становятся неработоспособными. Поэтому представляется полезным описать и провести анализ алгоритма хэндовера системы МАКВИЛ с условным наименованием «N=1», используемого для устранения конфликтов и лишенного указанных недостатков.

## ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА РЕАЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ Селекции в маквил

В стандарте МАКВИЛ пространственная селекция принимаемых от абонентских терминалов (АТ) сигналов реализована на каждой БС с помощью 8-элементной адаптивной антенны. Режим TDD позволяет организовать ПСС не только в линиях от АТ к БС (вверх), но и от БС к АТ (вниз). Для этого при передаче БС использует те же весовые коэффициенты, которые формируются адаптивно на приеме. Для настройки весов пользуются алгоритмом минимума среднеквадратической ошибки (MCKO).

Для управления хэндовером в режиме «N=1» (устранения конфликтов задействования ресурсов) применяется «справедливый» алгоритм, ориентированный на оценки не углов прихода сигналов, а амплитудно-фазовых распределений опорных или референсных сигналов (RS), наблюдаемых на выходах восьми антенн.

В МАКВИЛ RS-сигналы представляют собой Pilotврезки фиксированной структуры, встраиваемые в каждый элементарный ресурсный блок сигнала (рис. 2). Каждая БС использует индивидуальные Pilot-врезки,

### Рисунок 1

Многолучевое распространение в городской застройке, препятствующее применению углового пеленга для ПСС



#### Рисунок 2

Структуры элементарных ресурсных блоков с референсными сигналами в виде Pilot-врезок



построенные на базе Chirp кодов со структурой, сходной с ZF последовательностями, применяемыми в LTE [1].

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОСНОВА АЛГОРИТМА ХЭНДОВЕРА РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТОВ

Для того чтобы установить возможность использования ПСС для разделения сигналов абонентов, обслуживаемых соседними БС (а также, как будет показано ниже, и одной БС) в общем частотно-временном ресурсе, необходимо уметь рассчитывать уровень достигаемого отношения сигнал/(помеха+шум) (SINR) на выходе ААР для каждого разделяемого сигнала. Отличие ситуации от известных состоит в том, что Pilot-врезки соседних БС, используемые для настройки пространственного разделения по алгоритму МСКО, имеют ненулевую взаимную корреляцию. А известные методы и подходы [8, 13] ориентируются на модель независимых источников с нулевой корреляцией сигналов. Поэтому в рамках МАКВИЛ была поставлена и решена задача оценки эффективности ПСС в условиях коррелированных обучающих опорных сигналов (Pilot-врезок).

Действительно, при использовании алгоритма МСКО веса  $\vec{W} = \begin{bmatrix} \vec{W}_1, ..., \vec{W}_N \end{bmatrix}^T$  обработки должны удовлетворять известному решению [8, 13]:

$$\dot{\vec{W}}_{\text{opt}} = \left\langle \vec{X} \vec{X}^{\dagger} \right\rangle^{-1} \left\langle \vec{X} \dot{\vec{P}}_{1} \right\rangle, \tag{1}$$

где  $\langle \cdot \rangle$  – операция усреднения;

$$\dot{\vec{X}} = \left[I_{s1}(t) + jQ_{s1}(t), I_{s2}(t) + jQ_{s2}(t), \dots, I_{sN}(t) + jQ_{sN}(t)\right]^{T}$$

#### ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ ПОДВИЖНАЯ РАДИОСВЯЗЬ

#### Рисунок 3

Блок-схема алгоритма хэндовера «N=1», используемого в МАКВИЛ для устранения конфликтов распределения ресурсов между AT соседних БС



— вектор сигналов на выходах антенн в комплексной форме записи;  $I_s$  и  $Q_s$  — синфазная и ортогональная компонента сигнала; N — число антенных элементов ААР (в МАКВИЛ N = 8); знак верхнего индекса † обозначает сопряжение и транспонирование;  $\dot{P}_1 = I_{P1}(t) + jQ_{P1}(t)$ — опорный сигнал Pilot-врезки первой БС (далее БС<sub>1</sub>), принимающей полезный сигнал от АТ;  $j = \sqrt{-1}$ .

Кроме полезного сигнала, на выходах антенн БС<sub>1</sub> присутствуют собственные шумы и сигнал от АТ соседней БС (далее БС<sub>2</sub>). Для сигнала Pilot-врезки АТ обслуживаемого БС<sub>2</sub> будем использовать запись  $\dot{P}_2 = I_{P2}(t) + jQ_{P2}(t)$ . Как отмечалось, Pilot-врезки  $\dot{P}_1$  и  $\dot{P}_2$  коррелированы, т.е.

$$\left\langle \dot{P}_{1}(t)\dot{P}_{2}(t+\Delta\tau)\right\rangle =\dot{r}(\Delta\tau),$$

где  $\Delta \tau$  — время задержки, возникающее на разных трассах от БС<sub>1</sub> до обслуживаемого АТ<sub>1</sub> и до АТ<sub>2</sub>, обслуживаемого БС<sub>2</sub>. Для упрощения выкладок используем сокращение  $\dot{r} = \dot{r} (\Delta \tau)$ .

Согласно принятой модели, для вектора  $\vec{X}$  можно записать:

$$\dot{\vec{X}} = \dot{\vec{\xi}}_1 \sqrt{\rho_1} \dot{P}_1 + \dot{\vec{\xi}}_2 \sqrt{\rho_2} \dot{P}_1 \dot{r} + \dot{\vec{\xi}}_2 \sqrt{\rho_2} \sqrt{1 - |\dot{r}|^2} \dot{P}_{\perp 2} + \dot{\vec{n}},$$
(2)

где 
$$\xi_1 = [I_{\xi_{11}} + jQ_{\xi_{11}}, ..., I_{\xi_{1N}} + jQ_{\xi_{1N}}]'$$
 и  
 $\dot{\xi}_2 = [I_{\xi_{21}} + jQ_{\xi_{21}}, ..., I_{\xi_{2N}} + jQ_{\xi_{2N}}]^T$  — нормированные век-

торы распределения квадратурных компонент на выходах N антенн для принимаемых на БС<sub>1</sub> сигналов от AT<sub>1</sub> и AT<sub>2</sub>;  $\dot{P}_{12}$  — компонента Pilot-врезки AT<sub>2</sub>, независимая с Pilot-врезкой  $\dot{P}_1$ ;  $\dot{\vec{n}} = \begin{bmatrix} n_{11} + jn_{Q1}, n_{12} + jn_{Q2}, \dots, n_{IN} + jn_{QN} \end{bmatrix}^T$  — вектор составляющих собственных шумов на выходах антенн БС<sub>1</sub> в комплексной форме записи, удовлетворяющий  $\langle \vec{n} \cdot \vec{n}^{\dagger} \rangle = \text{diag}(1,1,...,1); \rho_1$  и  $\rho_2$  — нормированные к собственному шуму уровни сигналов Pilot-врезок, транслируемых AT<sub>1</sub> и AT<sub>2</sub>, достигаемые на БС<sub>1</sub> при точной фокусировке диаграммы направленности на AT<sub>1</sub> и AT<sub>2</sub> (т.е. при  $\vec{W} = \vec{\xi}_1$  и  $\vec{W} = \vec{\xi}_2$ ).

Введенные обозначения и принятые условия в математической форме можно представить как:

- $\dot{\vec{\xi}}_1$ ,  $\dot{\vec{\xi}}_2$  (нормировка)  $\dot{\vec{\xi}}_1^{\dagger}$ ,  $\dot{\vec{\xi}}_1 = 1$ ,  $\dot{\vec{\xi}}_2^{\dagger}$ ,  $\dot{\vec{\xi}}_2 = 1$ ;
- $\dot{P}_{1}, \dot{P}_{\perp 2}$  (уровни)  $\left\langle \left| \dot{P}_{1} \right|^{2} \right\rangle = 1, \left\langle \left| \dot{P}_{\perp 2} \right|^{2} \right\rangle = 1;$  (3)

•  $\dot{P}_{1}, \dot{P}_{\perp 2}$  (взаимная корреляция)  $\langle \dot{P}_{1}\dot{P}_{\perp 2}^{*} \rangle = \langle \dot{P}_{\perp 2}\dot{P}_{1}^{*} \rangle = 0.$ Крометого, введем обозначения  $\ddot{\xi}_{1}^{\dagger}, \dot{\xi}_{2} = \dot{q}u\dot{\xi}_{2}^{\dagger}, \ddot{\xi}_{1} = \dot{q}^{*}$ . Параметры  $\dot{\xi}_{1}, \dot{\xi}_{2}$ , в отличие от углов прихода сигналов, до-

ступны прямому измерению на БС. Показатель  $|\vec{\xi}_1^{\dagger} + \vec{\xi}_2| = |\vec{q}|$ , формируемый для  $\vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2$ , используется в «справедливом» алгоритме разрешения конфликтов с помощью хэндовера «N=1» в МАКВИЛ.

Подставляя (2) в (1), учитывая (3) и применяя известное тождество матриц Вудбери, после несложных, но громоздких вычислений можем получить для показателей на выходе настроенной по критерию МСКО антенной решетки БС<sub>1</sub> следующие выражения:

1) коэффициент усиления сигнала с распределением квадратурных компонент  $\dot{\xi_1}$ 

$$\kappa_{1} = \sqrt{\rho_{1}} \left( 1 + \sqrt{z} \dot{r} \dot{q} + \rho_{1} z \left( 1 - |\dot{r}|^{2} \right) \left( 1 - |\dot{q}|^{2} \right) \right) / \eta, \tag{4}$$

где  $z = \rho_2 / \rho_1$  — отношение уровней мешающего (излучаемого  $AT_2$ ) и полезного (излучаемого  $AT_1$ ) сигналов;

$$\eta = 1 + \rho_1 + \rho_1 z + \rho_1 \sqrt{z} \left( \dot{r} \dot{q} + \dot{r}^* \dot{q}^* \right) + \rho_1^2 z \left( 1 - \left| \dot{r} \right|^2 \right) \left( 1 - \left| \dot{q} \right|^2 \right);$$

2) коэффициент усиления сигнала с распределением квадратурных компонент  $\xi_2$ 

$$\kappa_2 = \sqrt{\rho_1} \left( \dot{q}^* + \sqrt{z} \dot{r} \right) / \eta; \tag{5}$$

4) уровень собственных шумов:

$$\sigma_n^2 = \dot{\vec{W}}_{opt}^{\dagger} \dot{\vec{W}}_{opt} = \rho_1 \left( 1 + z |\dot{r}|^2 + \sqrt{z} \left( \dot{r} \dot{q} + \dot{r}^* \dot{q}^* \right) + \rho_1 z \left( 1 - |\dot{r}|^2 \right) \left( 1 - |\dot{q}|^2 \right) \left( 2 + \rho_1 z \left( 1 - |\dot{r}|^2 \right) \right) \right) / \eta^2.$$
(6)

Используя (4)-(6), получаем выражение для SINR на выходе БС

$$SINR = \rho_1 \frac{\left(1 + \rho_1 z \left(1 - |\dot{r}|^2\right) \left(1 - |\dot{q}|^2\right)\right)^2 + z |\dot{r}|^2 |\dot{q}|^2 + \sqrt{z} \left(1 + \rho_1 z \left(1 - |\dot{r}|^2\right) \left(1 - |\dot{q}|^2\right)\right) (\dot{r}\dot{q} + \dot{r}^* \dot{q}^*)}{1 + \rho_1 z |\dot{q}|^2 + z |\dot{r}|^2 \left(1 + \rho_1 z\right) + \rho_1 z \left(1 - |\dot{r}|^2\right) \left(1 - |\dot{q}|^2\right) \left(2 + \rho_1 z \left(1 - |\dot{r}|^2\right)\right) + \rho_1 \sqrt{z} \left(1 + \rho_1 z\right) (\dot{r}\dot{q} + \dot{r}^* \dot{q}^*)}.$$
(7)

В реальных условиях начальная фаза сигнала многократно совершает полные обороты на интервале сеанса связи, демонстрируя случайный характер. Поэтому при прогнозе естественно ориентироваться на ситуацию  $\dot{q} \dot{r} = |\dot{r}| |\dot{q}|$ , при которой (7) близко к минимуму (или минимально), т.е.

$$L_{\text{SINR}} = \rho_1 \frac{\left(1 + \rho_1 z \left(1 - |\dot{r}|^2\right) \left(1 - |\dot{q}|^2\right)\right)^2 + z |\dot{r}|^2 |\dot{q}|^2 + 2\sqrt{z} \left(1 + \rho_1 z \left(1 - |\dot{r}|^2\right) \left(1 - |\dot{q}|^2\right)\right) |\dot{r}| |\dot{q}|}{1 + \rho_1 z |\dot{q}|^2 + z |\dot{r}|^2 (1 + \rho_1 z) + \rho_1 z \left(1 - |\dot{r}|^2\right) \left(1 - |\dot{q}|^2\right) \left(2 + \rho_1 z \left(1 - |\dot{r}|^2\right)\right) + 2\rho_1 \sqrt{z} \left(1 + \rho_1 z\right) |\dot{r}| |\dot{q}|}.$$
(8)

В МАКВИЛ соотношение (8) используется как базовое для разрешения конфликтов с АТ соседних БС в режиме хэндовера «N=1».

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ХЭНДОВЕРА РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТОВ В МАКВИЛ

Как только абонент запрашивает у БС МАКВИЛ доступ к радиоканалу, или работающий абонент фиксирует снижение качества связи и посылает запрос на хэндовер «N=1», обслуживающая БС выполняет контроль занятости частотных подканалов и временных тайм-слотов. Для этого вычисляются векторы  $\xi$  и уровни  $\rho$  на всех позициях подканалов и тайм-слотов с помощью согласованного приема возможных Pilot-врезок. Тестируются коды Pilotврезок всех прописанных в реестре соседств БС. На каждом элементе ресурса, определяемом сочетанием (два подканала+тайм-слот), выделяется код Pilot-врезки, демонстрирующий отклик согласованного приема наибольшего уровня. Исходя из параметров максимального отклика, однозначно определяются показатели:

- SeqID БС соседней БС<sub>2</sub>, который соответствует Pilot-врезке, имеющей наибольший показатель мощности в тестируемом ресурсе;
- уровень самого мощного сигнала *ρ*<sub>2</sub>;
- момент самого мощного отклика, из которого сразу вычисляется параметр задержки Δτ между наиболее мощным сигналом и сигналом АТ, запрашивающего хэндовер (или доступ к каналу);
- на основе откликов согласованных фильтров на выходах N антенн в момент максимума отклика на выходе ААР формируется оценка вектора \(\vec{\xi}\_2\).

Показатели SeqID и  $\Delta \tau$  (с учетом SeqID обслуживающей БС и номеров подканалов) однозначно определяют  $|\dot{r}|$ . Полученные  $\dot{\xi}_2$  и  $\dot{\xi}_1$ , известные на БС, используются для расчета  $|\dot{q}|$ , согласно  $|\ddot{\xi}_1^{\dagger}, \ddot{\xi}_2| = |\dot{q}|$ . Этих параметров достаточно, чтобы с помощью (8) вычислить прогнозируемое отношение сигнал/(помеха+шум) – L<sub>SINR</sub>, которое следует ожидать при распределении тестируемого ресурса запросившему хэндовер (или доступ) АТ. Ранжируя ресурсы по убыванию L<sub>SINR</sub>, БС выбирает наилучший вариант.

Следует отметить, что приведенный алгоритм не требует для реализации непосредственной оценки углов прихода сигналов, а по доступным измерениям на БС уровням полезного и мешающих сигналов, задержкам и корреляциям Pilot-врезок формируется решение о возможности совмещенной работы в ресурсах. Если на БС наблюдаются свободные ресурсы, то алгоритм автоматически выбирает один из них.

На рис. 3 приведена блок-схема работы описанного алгоритма хэндовера. Соотношение (8) в нем используется для расчета влияния сигналов на ресурсах канала.

## АНАЛИЗ РАБОТЫ ХЭНДОВЕРА РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТОВ В МАКВИЛ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Согласно изложенному выше, эффективность хэндовера «N=1» может быть оценена с помощью  $L_{SINR}$  (8). На рис. 4 и 5 приведены примеры зависимости  $L_{SINR}$  от  $|\dot{q}|$ , задающей степень «пространственной неразличимости» разделяемых на БС сигналов АТ. Множество кривых на рис. 4 демонстрирует, как с уменьшением уровня мешающего сигнала AT<sub>2</sub> (параметр *z*) увеличивается допустимый  $|\dot{q}|$ . Для удобства на графиках красной горизонтальной линией отмечено значение SINR = 10 дБ, являющееся минимально приемлемым для радиоканала МАКВИЛ. На рис. 5 зависимости показывают как увеличивается допустимый  $|\dot{q}|$  при уменьшении корреляции между Pilot-врезками

#### ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ ПОДВИЖНАЯ РАДИОСВЯЗЬ

#### Рисунок 4

Зависимости расчетных SNR на выходе ААР БС МАКВИЛ от параметра «пространственной неразличимости» |q| сигналов АТ при разных контрастностях по уровню между мешающим и полезным сигналами z



сигналов  $AT_1 и AT_2$ .

Сравнивая рис. 4 и 5, можно заметить, что запас по уровню полезного сигнала над помехой оказывает более сильное влияние на результат, чем корреляция  $|\dot{r}|$ . Рис. 4 показывает, что при увеличении  $20lg(|\dot{r}|)$  выше -0,5 дБ возникает существенная деградация ПСС. При этом ААР не может обеспечить условия для совместного использования ресурса, если контрастность уровней принимаемых сигналов *z* не превышает 10 дБ.

На рис. 6 представлены примеры зависимостей квадрата корреляции  $|\dot{r}|^2$  принимаемых на БС<sub>1</sub> (индекс SeqID1) сигналов Pilot-врезок, транслируемых АТ<sub>1</sub> и АТ<sub>2</sub> (соседней БС<sub>2</sub> с индексом SeqID2), от разности задержек распространения  $\Delta \tau$  до БС<sub>1</sub>. Из рисунка видно, что корреляция между Pilot-врезками с разными индексами SeqID<sub>1</sub> и SeqID<sub>2</sub> находится значительно ниже критического уровня -2 дБ, что гарантирует близкое к потенциальному качество ПСС АТ, обслуживаемых соседними БС. Даже при равенстве уровней сигналов можно использовать общий ресурс, если показатель «пространственной неразличимости»  $|\dot{q}|$  будет менее 0,92 (см. рис. 5, случай z = 0 дБ). Варианты SeqID<sub>1</sub> = 0, SeqID<sub>2</sub> = 7 (рис. 6, *a*) и SeqID<sub>1</sub> = 3, SeqID<sub>2</sub> = 8 (рис. 6, *б*) обладают стандартным характером зависимости взаимной корреляции от задержки.

На рис. 6, *г* показан случай SeqID<sub>1</sub> = 0 и SeqID<sub>2</sub> = 6, для которого корреляция Pilot-врезок близка к 1 при малых  $\Delta \tau$ . Такие соседства выполнить ПСС сигналов АТ в AAP БС не позволяют. Полный анализ сочетаний SeqID<sub>1</sub> и SeqID<sub>2</sub> показал, что существуют всего две критические комбинации индексов: указанная выше (0,6) и (2,4). Поэтому на территории РФ подобные со-

### Рисунок 5

Зависимости расчетных SINR на выходе ААР БС МАКВИЛ от параметра «пространственной неразличимости» |q| сигналов АТ при разных параметрах взаимной корреляции Pilot-врезок мешающего и полезного сигналов |r|



четания индексов соседних БС МАКВИЛ исключены. На рис. 6, *в* приведен вариант обслуживания абонентов одной БС (SeqID = 1). В этом случае |*i*| отличается от 1 только при ненулевых задержках.

Пример показывает, что ПСС может с успехом применяться и для абонентов, обслуживаемых одной БС. Но она будет успешной, если между принимаемыми сигналами задержка составит более 0,6 мкс. Достигнуть этого можно, если в поддерживаемый БС<sub>1</sub> алгоритм управления синхронизацией абонентов по времени ввести дополнительную управляемую задержку от -1,5 до +1,5 мкс с шагом 0,6 мкс. Это обеспечит возможность получить при приеме нужный малый уровень корреляции Pilot-врезок и разделить сигналы на выходе ААР.

В последнем релизе ПО БС МАКВИЛ управление

задержками трансляции обслуживаемых AT реализовано так, что все принимаемые БС сигналы синхронизируются ( $\Delta \tau \approx 0$ ). Это не позволяет осуществить пространственную селекцию сигналов AT, обслуживаемых одной БС, поскольку для мощности трансляции применяется алгоритм управления, выравнивающий уровни сигналов на приеме. В результате нет задержек и нет контрастности. Но обнаруженный дополнительный ресурс может быть легко реализован (даже без расширения множества Pilot-кодов) путем введения простого управления дополнительными задержками на БС. ПСС сразу станет доступной, а диапазон задержек останется в пределах защитного интервала (9,5 мкс в МАКВИЛ).

Для объяснения физической сущности параметра «пространственной неразличимости» на рис. 7 показано, как он связан с угловым расстоянием между

#### ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ ПОДВИЖНАЯ РАДИОСВЯЗЬ

### Рисунок 6

Зависимости показателя взаимной корреляции  $|\dot{r}|^2$  сигналов Pilot-врезок, используемых для настройки AAP, от задержки сигналов абонентов  $\Delta\tau$  на БС









#### Рисунок 7

Зависимости углового расстояния между АТ от показателя «пространственной неразличимости»  $|\dot{q}|$  в условиях трасс с прямой видимостью. Случаи разных радиусов кольцевых ААР МАКВИЛ



### Рисунок 8

Упрощенный пример, демонстрирующий как хэндовер режима «N=1» в МАКВИЛ за счет ПСС сигналов позволяет 11 обслуживаемым АТ бесконфликтно работать на четырех разных подканалах



АТ в ситуациях трасс прямой видимости. Данные получены для кольцевой 8-элементной ААР МАКВИЛ. График черного цвета соответствует стандартному для МАКВИЛ радиусу решетки  $\lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны на частоте центра рабочего диапазона. Здесь же приведены зависимости с радиусами 0,4 $\lambda$  и 0,6 $\lambda$ . Можно видеть, что с увеличением размеров антенной системы способность разделения сигналов повышается.

В качестве примера отметим, что указанное выше значение  $|\dot{q}| = 0,92$ , при котором МАКВИЛ, согласно представленным результатам, может выполнить пространственную селекцию сигналов АТ внутри соты (при введении управления задержкой), соответствует (рис. 7)

разности углов прихода сигналов от AT  $\Delta \phi^{\circ} = 70^{\circ}$ .

На рис. 8 для демонстрации результатов, достигаемых за счет хэндовера «N=1» на множестве АТ, обслуживаемых одной БС, показана работа БС МАКВИЛ 377035, расположенной в районе м. Курская. Для наглядности предполагается, что связь поддерживается по трассам прямой видимости и управление задержками обеспечивает одинаковые значения для абонентов, удаленных от БС на одно расстояние. При этом необходимое для селекции угловое расстояние принято равным 70°.

В такой ситуации с помощью соотношения (8) можно построить граф возможных конфликтов, ребра которого на рис. 8 показаны линиями, соединяющими АТ, и применить алгоритм правильной раскраски, предложенный в [9, 14]. В результате получим минимальное значение ресурсов радиоканала, при котором можно организовать бесконфликтную работу абонентов. Бесконфликтное распределение представлено на рис. 8 в виде рамок разного цвета, расположенных возле каждого АТ. Видно, что достаточно четырех ресурсных блоков для 11 абонентов, т.е. в рамках одной БС за счет ПСС коэффициент повторного использования ресурса радиоканала повышается до значения 11/4 = 2,75. Такой режим хэндовера «N=1» включен в проект ближайшей модификации системы МАКВИЛ на территории РФ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ режима хэндовера системы МАКВИЛ, предназначенного для решения проблемы устранения конфликтов распределения ресурсов радиоканала с помощью пространственной селекции сигналов абонентов соседних базовых станций, показал, что рассмотренный режим может быть распространен и на абонентов, обслуживаемых одной базовой станцией. Это открыло возможность применения техники составления бесконфликтных расписаний на основе теории графов внутри сот. Ожидаемый результат может приводить к повышению эффективности использования ресурса радиоканала в 2,75 раз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Sesia, S. LTE – The UMTS Long Term Evolution / S. Sesia, I. Toufik, M. Baker // A John Wiley & Sons, 2011. – 752 p.
 Бакулин, М.Г. Технология МІМО. Принципы и алгоритмы / М.Г. Бакулин, Л.А. Варукина, В.Б. Крейнделин // М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 244 с.
 Шорин, О.А. Снижение негативного влияния высоких значений пик-фактора сигналов в системе McWILL / О.А. Шорин, Г.О. Бокк // Экономика и качество систем связи. – 2019. – № 1(11). – С. 9-13.

4. Шорин, О.А. Аналитическое решение вариационной задачи Шеннона по определению оптимальной структуры сигнала в условиях ограниченной пиковой мощности / О.А. Шорин, Г.О. Бокк // Экономика и качество систем связи. – 2018. – № 1 (7). – С. 30-39.

5. Шорин, О.А. Численные результаты решения вариационной задачи Шеннона определения оптимальной структуры сигнала в условиях ограниченной пиковой мощности / О.А. Шорин, Г.О. Бокк // Экономика и качество систем связи. – 2018. – № 1 (7). – С. 39-47.

6. Шорин, О.А. Оптимальная структура дискретной QAM-модуляции, обеспечивающая максимум информационной производительности радиоканала / О.А. Шорин, Г.О. Бокк // Экономика и качество систем связи. – 2018. – № 3 (9). – С. 9-17.

7. Бокк, Г.О. Алгоритм MIMO с применением управления числом логических каналов / Г.О. Бокк // Экономика и качество систем связи. – 2017. – № 1 (3). – С. 60-69.

8. Монзинго, Р.А. Адаптивные антенные решетки / Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
9. Патент РФ №2640030 от 26.12.2017. Способ адаптивного распределения частотно-временного ресурса / Г.О. Бокк, О.А. Шорин. – Заявка № 2017112131 от 11.04.2017.

10. Аджемов, С.С. Модифицированный

алгоритм пространственного разрешения источников радиоизлучения SDS-MUSIC, работающий при многолучевом распространении сигналов / С.С. Аджемов, Г.О. Бокк, А.Г. Зайцев и др. // Радиотехника. – 2003. – № 11. – С. 80.

**11. Аджемов, С.С.** Исследование алгоритмов сверхразрешения в адаптивных антенных решетках / С. Аджемов, Г.О. Бокк, А.Г. Зайцев // Радиотехника. – 2000. – № 11. – С. 66-71.

**12.** Патент РФ №2254592 от 20.06.2005. Способ локации цели (варианты) / И.Б. Дунаев, Г.О. Бокк. Заявка № 2003134395/09 от 28.11.2003.

**13. Уидроу, Б.** Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.

 Патент РФ №170231 U1 от 06.02.2017.
 Всенаправленная кольцевая антенная решетка / / Г.О. Бокк, О.А. Шорин. Заявка
 №2017103746 от 06.02.2017.

Получено 19.04.21