

Оптимизация размера кольцевой антенны и правила формирования территориальных кластеров для сотовой сети McWILL

Р.С. Аверьянов, директор по производственной деятельности ООО «НСТТ»; ars@nxtt.org

Г.О. Бокк, директор по науке ООО «НСТТ», д.т.н.; bokkg@yandex.ru

А.О. Шорин, технический директор ООО «НСТТ»; as@nxtt.org

УДК 621.396.519.17:621.391

Аннотация. Для базовой станции сотовой сети предложена параметрическая модель, описывающая с единых позиций работу адаптивной антенны и алгоритма распределения ресурса радиоканала между абонентами в сети с сигналами OFDM. На ее основе для сети McWILL предложен вариант составного параметрического критерия, позволяющего численно определять наилучшие характеристики антенной решетки и правила распределения ресурсов. Полученные оценки выигрышей значительно выше, чем для фиксированной трехсекторной организации сайтов, широко распространенной в сетях мобильной связи.

Ключевые слова: кольцевая адаптивная антенна, сети мобильной связи, пространственная селекция.

ВВЕДЕНИЕ

Очередной этап развития сотовых сетей связи обусловлен внедрением техники пространственной обработки сигналов и адаптивных антенн, позволяющих значительно (в разы) поднять пропускную способность радиоканала за счет активного использования ресурса, связанного с пространственной селекцией сигналов.

В приложении к сотовым сетям формулировка задачи оптимизации адаптивной пространственной обработки отличается от традиционной. Критерий оптимальности состоит в достижении максимума пропускной способности радиоканала между множеством распределенных в пространстве абонентов и обслуживающей базовой станцией (БС). В такой формулировке структура антенной системы, алгоритмы пространственной обработки и распределения ресурса радиоканала, а также алгоритмы организации обмена по радиоканалу оказываются тесно связанными. Их можно рассматривать как элементы программно-аппаратного модуля, решающего единую задачу организации передачи по радиоканалу.

Характеристики антенной системы будут влиять на эффективность работы алгоритмов, а алгоритмы, в свою очередь, могут быть хуже или лучше согласованы со структурой антенны. Возникает правомерный вопрос, как наилучшим образом сконструировать антенную решетку (АР) и какие при этом алгоритмы следует использовать для достижения наиболее высокой пропускной способности радиоканала.

Решение такой задачи в общем виде вызывает серьезные трудности, которые возможно удастся преодолеть в ближайшем будущем. Но для практических приложений постановку задачи можно существенно упростить, если учесть, что применяемые антенные системы не произвольны, а принадлежат определенным классам, вариативность на которых ограничена возможными изменениями только определенных параметров. На-

пример, кольцевые структуры с возможностью выбора радиуса размещения отдельных элементов и ширины диаграммы направленности (ДН) отдельных антенн в горизонтальном сечении. Именно этот класс АР исследуется в данной работе. В подобных условиях задача оптимизации становится параметрической. Оптимальные решения при этом можно найти аналитически или с помощью моделирования. Получаемые решения позволяют также оценить, какой выигрыш от применения адаптивной антенны может быть достигнут.

ПОСТАНОВКА И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В качестве ключевого параметра для построения критерия качества предлагается выбрать размер сектора углового разнесения источников (лучей), которые могут быть «разделены» (подвергнуты селекции) адаптивной антенной. Обозначим его A_s . Этот параметр будем использовать в качестве связующего элемента между геометрией АР и характеристиками алгоритма динамического распределения ресурсов радиоканала (кластеризации) на множестве абонентов. В результате появится инструмент для проведения оптимизации.

Поясним предлагаемый подход. Если в результате кластеризации множества абонентов будут созданы группы, в которых каждый из абонентов-источников (лучей) будет разнесен по углу с другими на величину не менее A_s , то в каждой такой группе коэффициент переиспользования выделенного на группу ресурса можно установить равным 1 (т.е. каждый абонент-источник может полностью использовать ресурс радиоканала, выделенный на группу).

Разделение сигналов группы будет выполняться исключительно пространственно, или средствами адаптивной антенны. При этом если размер A_s выбрать большим (с запасом), то количество формируемых групп

Рисунок 1

Пример построения «запрещающего графа» на позициях угловых направлений прихода лучей (сигналов от абонентов). Ребрами соединены позиции с угловым разнесом меньше запрещающего сектора A_s (показан розовым цветом)

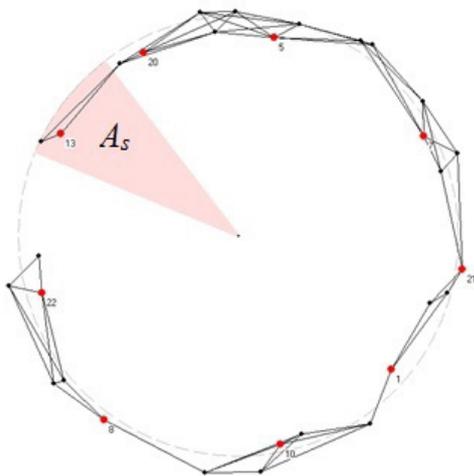


Рисунок 2

Преобразование «запрещающего графа» для случая неоднородного распределения запрашиваемых ресурсов

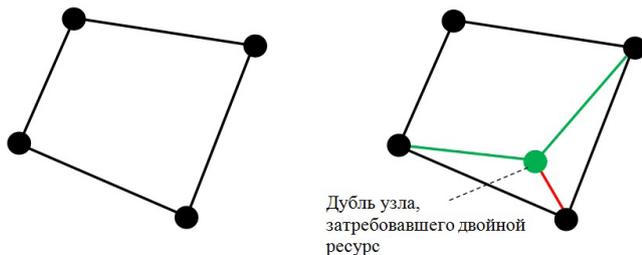
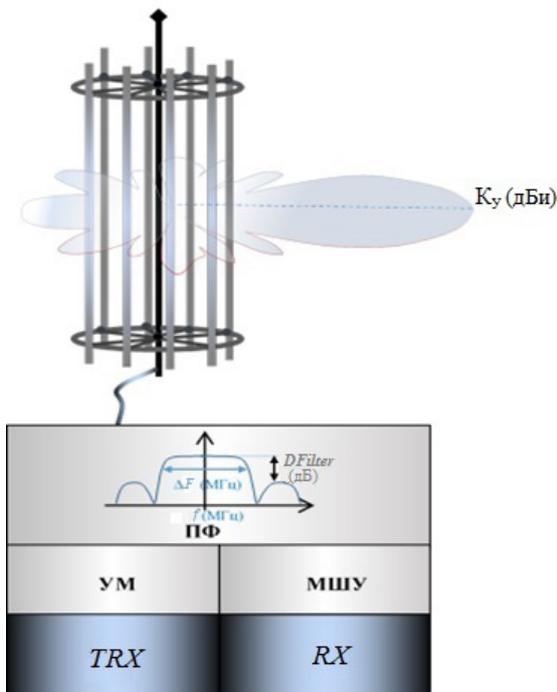


Рисунок 3

Базовая станция McWill диапазонов 300...400 МГц с 8-элементной антенной решеткой



станет слишком большим, и каждой группе при разделе общего ресурса радиоканала будет выделена сниженная ресурсная доля. Если A_s выбрать малым, то количество групп будет небольшим, но в рамках одной группы AP окажется не способной к пространственной селекции лучей, и качество связи снизится. Аналитически задачу выбора A_s решить трудно, а с помощью моделирования достаточно просто. Именно такой механизм взаимного влияния через параметр A_s просматривается для геометрии AP и алгоритма динамического распределения ресурсов.

Отдельный этап решения связан с разработкой алгоритма оптимального распределения ресурса радиоканала между абонентами с выполнением условия: один и тот же ресурс не распределяется для абонентов (лучей), направление на которых разнесены по углам менее чем на A_s . Синтез такого алгоритма можно выполнить на основе математического аппарата теории графов [1, 2].

Для этого необходимо построить граф, вершины которого показывают на угловые позиции источников, а ребра соединяют вершины, для которых угловое расстояние не превосходит A_s (рис. 1). Такой граф будем называть «запрещающим». В основу построения положено условие: антенная система формирует оценки направлений прихода лучей (выполняет пеленг). При наличии обучающих последовательностей (для LTE таковыми являются RS-сигналы, а для McWILL – Pilot-сигналы) организация пеленга хорошо изучена и может быть реализована с достаточно высокой точностью на основе стандартных методов [3–5].

В результате задача (и алгоритм) распределения ресурса получает широко известную трактовку другой задачи (из теории графов) о правильной раскраске (минимальным числом красок) вершин графа [1, 2]. Более того, техника позволяет решать задачи и при неоднородных входящих запросах на ресурс. В этом случае достаточно в качестве вершин графа рассматривать комбинацию (абонент+минимальный запрос). Исходный однородный «запрещающий» граф при этом подвергается операции «размножения вершин» в пропорциях запрашиваемых ресурсов (рис. 2). Дальнейшая техника решения остается прежней.

Точное решение задачи раскраски дает алгоритм Муллата [6, 7], в котором предусматривается «режим с обратным извлечением элементов из групп». В нашем случае этот режим позволяет не только создать наименьшее число групп (кластеров), в которых лучи разнесены не менее чем на запретный угол, но и дополнительно распределить отдельных абонентов, оказавшихся в более «мягких» по расположению условиях, сразу по нескольким группам. При этом будет обеспечено полное использование доступного ресурса радиоканала.

После того как группы будут сформированы нужно построить алгоритм пространственной обработки для каждой из них. Это приведет к конечному результату. При синтезе алгоритма пространственной обработки

Рисунок 4

Схема многоканального приемника БС сети McWill

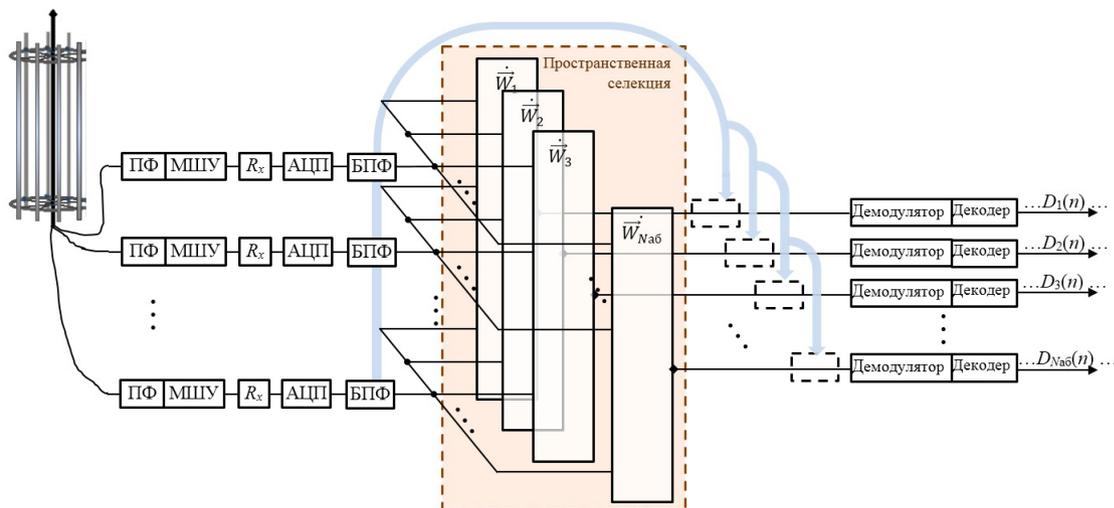
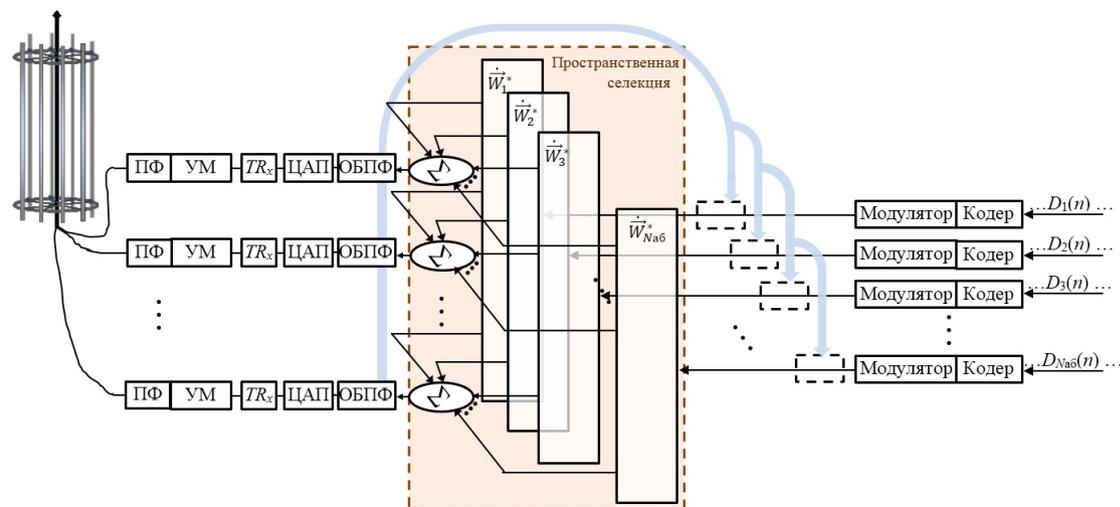


Рисунок 5

Схема многоканального передатчика БС сети McWill



естественно воспользоваться известным критерием максимума отношения сигнал/шум (С/Ш) [3, 4] и соответствующим алгоритмическим решением.

С учетом изложенного, можно сформулировать параметрический критерий оптимизации и вытекающее из него решение рассматриваемой задачи:

$$(A_s, \vec{\alpha}) = \arg \max_{A_s, \vec{\alpha}} C(A_s, \vec{\alpha}), \quad (1)$$

где $\vec{\alpha}$ – настраиваемые параметры, задающие геометрию антенной решетки БС; A_s – параметр, задающий размер запрещаемого сектора угловых сближений в группах; $C(A_s, \vec{\alpha})$ – суммарная производительность радиоканала канала, наблюдаемая для параметров $A_s, \vec{\alpha}$ при условии формирования групп абонентов (лучей) по алгоритму Муллата и пространственной обработки по алгоритму максимума С/Ш [3,4].

В сотовых сетях стандарта McWill в диапазонах

300...400 МГц предусматривается использование на БС 8-элементных кольцевых АР. Такая структура априорно ориентирована на равномерное распределение углов прихода абонентских сигналов. Поэтому в качестве параметров настройки для нее можно рассматривать радиус расположения элементов R и ширину ДН одного элемента (антенны) H_w . В дальнейшем будем ориентироваться именно на такой класс АР:

$$\vec{\alpha} = (R, H_w).$$

Допустимы также сокращенные варианты оптимизации с настройкой только по R и H_w , по R или H_w .

На рис. 3 показана БС McWill диапазона 300...400 МГц с антенной решеткой. На рис. 4 и 5 представлены структурные схемы многоканального приемника и многоканального передатчика БС. Так как в сетях McWill используются сигналы OFDM, то указанные структурные

Рисунок 6

Пример работы алгоритма Муллата, формирующего минимальное число групп, в каждой из которых угловые расстояния между абонентами больше $A_s = 60^\circ$

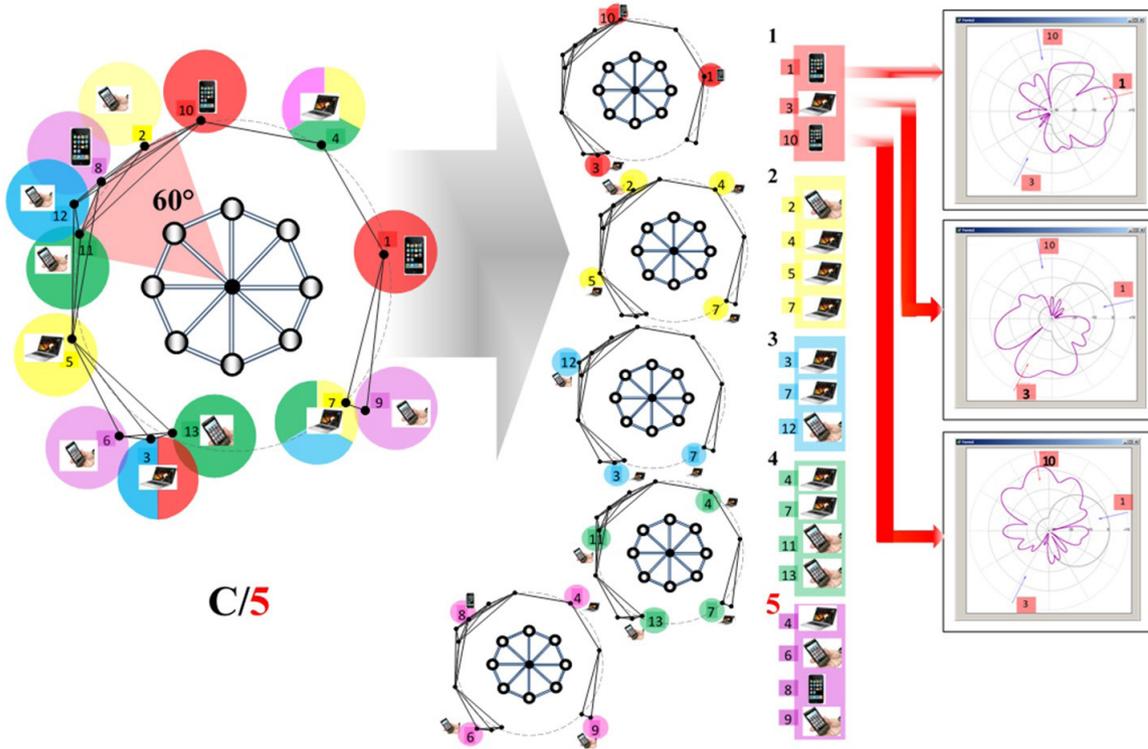
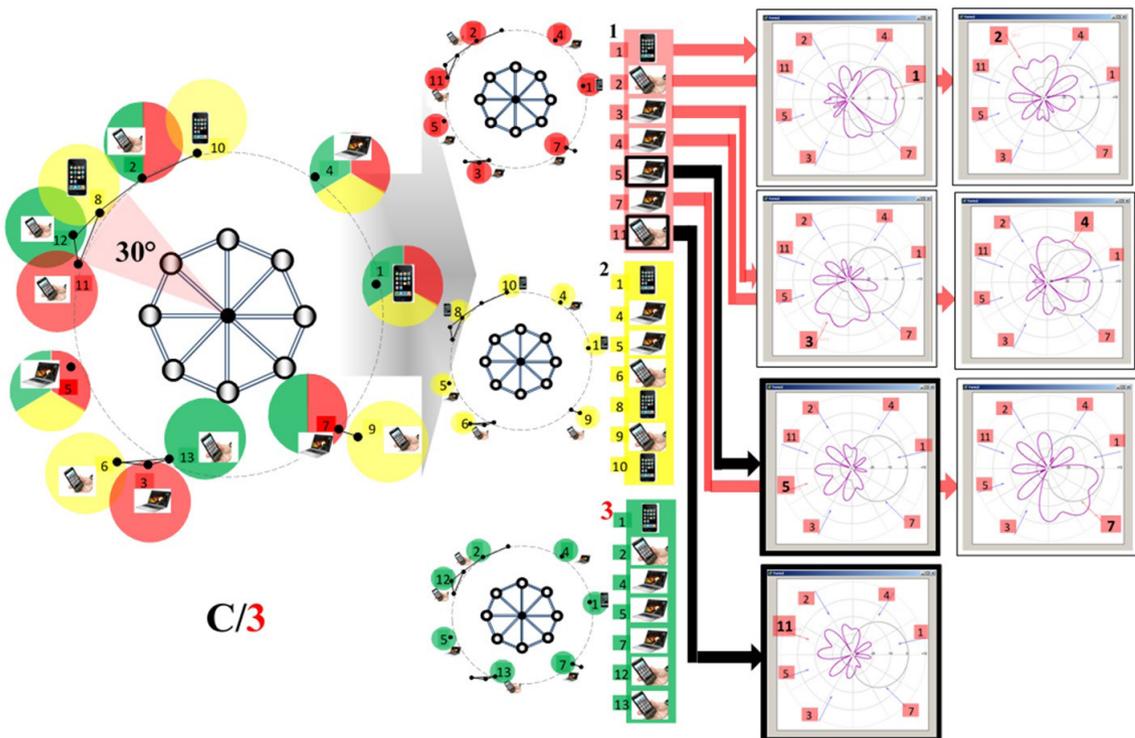


Рисунок 7

Пример работы алгоритма Муллата, формирующего минимальное числа групп, в каждой из которых угловые расстояния между абонентами больше $A_s = 30^\circ$



схемы содержат блоки преобразования Фурье (БПФ и ОБПФ). Пространственная обработка осуществляется в блоках, заключенных в рамку со светло-коричневым фоном, и для каждой абонентской линии (луча) она индивидуальна. Поскольку преобразование Фурье и пространственная обработка являются линейными операциями, то для уменьшения вычислительной сложности можно менять порядок их выполнения.

Алгоритм Муллата формирует на выходе отдельные группы абонентов (лучей). На рис. 6 и 7 приведены примеры такой кластеризации для случаев с $A_s = 60^\circ$ и 30° . При этом достигается минимум для числа групп, каждая из которых содержит абоненты с взаимными угловыми расстояниями, превосходящими A_s . Также на рисунках показан результат работы адаптивной решетки по пространственной селекции абонентов «первой» группы. На рис. 6 представлены пять групп, в каждой из которых умеренное число абонентов. Антенная решетка успешно проводит селекцию. Но ресурс, приходящийся на каждую группу, составляет только 1/5 от общего. На рис. 7 наблюдаем три группы и в каждой из них достаточно большое число абонентов. АР в ряде случаев, помеченных черными стрелками, не способна успешно провести селекцию. Ресурс, приходящийся на отдельную группу, составляет 1/3 от общего.

Результаты показывают, что в ситуациях с выбором чрезмерно большого значения A_s адаптивная система пространственной селекции успешно справляется со своей задачей, но число групп (кластеров) оказывается большим. Ресурс, приходящийся на каждого абонента, в итоге будет уменьшен. Если же параметр A_s выбран малым, число групп будет небольшим. Удельный ресурс, приходящийся на абонента, увеличится, но адаптивная АР будет не способной к полноценной пространственной селекции сигналов в пределах сформированных групп.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Оптимальные значения A_s , соответствующие ему R (радиус размещения элементов АР) и H_w (ширина ДН отдельного элемента) были определены экспериментально (с помощью моделирования работы БС стандарта McWill).

На рис. 8 приведены полученные в ходе испытаний нормированные значения суммарной пропускной способности радиоканала C_{max}/C_0 (в единицах пропускной способности радиолитии с одной круговой антенной) для БС McWill при различных значениях R (зависимости синего цвета). По горизонтальной оси отложено R/λ . По дополнительной правой оси отложены значения оптимальной ширины ДН H_w отдельного элемента решетки, при которых показатели по производительности были наилучшими. Соответствующие зависимости показаны на рис. 8 зеленым цветом.

Параметры эксперимента были следующими. Число активных абонентов (или лучей) $N_a = 30$; С/Ш, до-

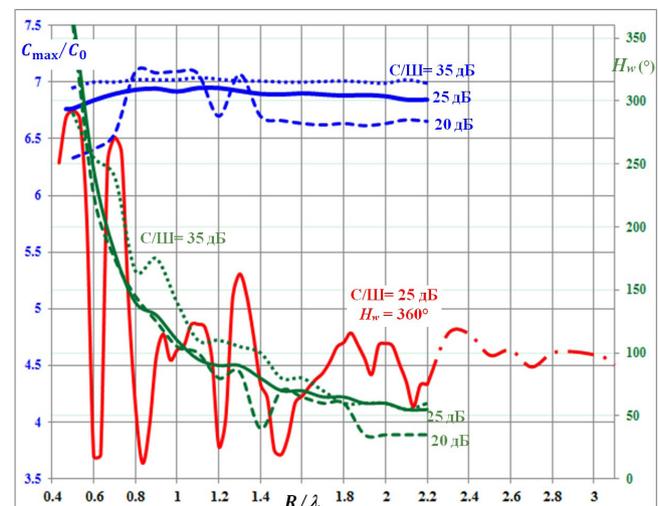
стигаемый при приеме на один элемент, 20, 25 и 35 дБ; логнормальные замирания с $\sigma = 3$ дБ. В качестве допустимого был принят уровень 5% абонентов (лучей) с уровнем С/Ш в радиоканале ниже критического порога (предельный уровень, при котором еще можно использовать модуляцию QAM16). Ситуации, приводящие к большему проценту абонентов (лучей) с уровнем сигнала ниже такого порога, забраковывались (считались неудовлетворительными). Оценка процента осуществлялась по всей выборке испытаний в каждой точке.

Результаты эксперимента показали, что правильный выбор ширины ДН элемента АР (H_w) для конкретного радиуса R позволяет практически всегда обеспечивать пропускную способность радиоканала, близкую к максимальной. Для $R = 0,5\lambda$ наилучшие показатели по пропускной способности наблюдались при использовании элементов с круговыми ДН ($H_w = 360^\circ$). С увеличением радиуса кольцевой решетки оптимальные значения H_w уменьшались. Абсолютно наилучшие показатели были зафиксированы в окрестности значений $R = (1\lambda - 1,1\lambda)$ с элементами, имеющими ширину ДН порядка 100° . Использование решетки с $R = 0,5\lambda$ приводит к незначительным (порядка 2,7%) потерям показателя общей пропускной способности. Но, если к применению доступны только элементы с круговыми ДН, то достигаемая производительность радиоканала будет существенно зависеть от радиуса решетки R .

Соответствующая характеристика приведена на рис. 8 красным цветом. Видно, что даже незначительное увеличение R от $0,5\lambda$ до $0,567\lambda$ (что также можно интерпретировать как изменение частоты несущего колебания от 300 до 339 МГц при постоянном радиусе решетки 0,5 м) приводит к потенциальным потерям по пропускной способности на 14,5% (в значениях поло-

Рисунок 8

Зависимости производительности радиоканала БС McWill от радиуса кольцевой 8-элементной АР. На вспомогательной оси справа отложены оптимальные значения ширины азимутальной ДН отдельного элемента



сы это соответствует сокращению с 5,00 до 4,28 МГц). Для несущей 420 МГц радиус конструкции 0,5 м в единицах длины волны будет соответствовать $R=0,7\lambda$, что попадает на локальный выброс красной характеристики. Потери производительности из-за неоптимальной ширины ДН элемента при этом составят 5,5%. Поэтому для двухдиапазонной АР (339МГц/420МГц) с всенаправленными элементами, используемой в сетях McWILL, лучше уменьшить радиус с 0,50 до 0,48 м. Это снизит суммарные потенциальные потери производительности радиоканала в двух диапазонах от 18 до 10%.

Если же рассматривать конструкцию решетки для одного диапазона (на центральной частоте 339 МГц), то правильнее уменьшить радиус до 0,46 м. Это обеспечит почти 100%-ное использование ресурса радиоканала. Совсем плохо применять кольцевой конструктив решетки с радиусом 0,50 м для диапазона 1800 МГц. В этой случае $R=3\lambda$ и по красной характеристике (рис. 8) потенциальное снижение производительности радиоканала составит 33,8%, т.е. 1/3 емкости канала будет потеряна.

В завершение нужно отметить, что применение фиксированной трехсекторной организации сайтов, повсеместно утвердившееся в сетях мобильной связи за счет пространственной селекции, обеспечивает увеличение производительности в пределах от 1,5 до 2,0 раз. Это заметно уступает результатам, полученным для предложенного варианта адаптивной пространственной селекции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированный алгоритм и полученное правило оптимизации размера кольцевой антенной решетки в ходе эксперимента продемонстрировали, что их применение позволяет достигнуть увеличения производительности радиоканала до величин близких к теоретическому пределу. Действительно, согласно [3, 4], адаптивная антенная решетка из N элементов способна осуществить пространственную селекцию не более чем для N независимых каналов (у антенной решетки McWill $N=8$). Поэтому ее производительность, выраженная в единицах радиолинии с одним антенным элементом, не может превысить 8. Экспериментальные данные показали соответствующую пропускную способность в пределах 7 для широкого спектра ситуаций. Поэтому можно заключить, что даже если задача оптимизации пространственной селекции для БС сотовых сетей будет решена в полномасштабной постановке, то ожидаемый дополнительный положительный эффект, по сравнению с полученным решением, для сети McWILL с 8-элементными решетками будет не выше 12,5%.

Одновременно отметим, что повсеместно утвердившаяся в сетях мобильной связи трехсекторная организация сайтов позволяет за счет пространственно-угловой селекции сигналов поднять суммарную пропускную способность не более чем в 1,5–2,0 раза, что существенно ниже уровня 7, полученного для разработанного адаптивного алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Зыков А.А.** Основы теории графов. – М.: Наука, 1987. – 384 с.
- 2. Оре О.** Теория графов. – М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит.-ры, 1980. – 336 с.
- 3. Монзинго Р.А., Миллер Т.У.** Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию / Пер. с англ. под ред. В.А. Лексаченко – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
- 4. Уидроу Б., Стирнз С.** Адаптивная обработка сигналов. – М.: Мир, 1989. – 440 с.
- 5. Абрамович Ю.И., Спенсер Н.К., Горохов А.Ю.** Выделение независимых источников излучения на неэквидистантных антенных решетках // Успехи современной радиоэлектроники. – 2001. – № 12. – С. 3–17.
- 6. Муллат И.Э.** Экстремальные подсистемы монотонных систем. Ч. 1 // Автоматика и телемеханика. – 1976. – № 5. – С. 130.
- 7. Муллат И.Э.** Экстремальные подсистемы монотонных систем. Ч. 2 // Автоматика и телемеханика. – 1976. – № 8. – С. 169.

Получено 06.10.16