

В. И. СЛЮСАР, М. А. ЗАБЛОЦКИЙ

ЦИФРОВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ В ЗАРУБЕЖНЫХ СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Рассмотрены возможности и преимущества применения новых типов связных адаптивных антенн — цифровых антенных решеток (ЦАР) с аналого-цифровым преобразованием в каналах и цифровой пространственно-временной обработкой сигналов. Использование ЦАР позволяет повысить пропускную способность антенно-приемных систем, а также улучшить их характеристики при функционировании в неблагоприятных условиях распространения радиоволн и воздействии внешних помех за счет подавления нежелательных и усиления полезных сигналов.

Достижения в технике связи, ознаменовавшие собой уходящий XX век, на самом деле — лишь прелюдия к несравненно более грандиозным технологическим свершениям нового тысячелетия. Сейчас невозможно даже в общих чертах представить всю масштабность предстоящих изменений в технологии связи. Однако важные тенденции, наметившиеся в последние годы, позволяют достаточно уверенно предугадать наиболее вероятные направления развития систем связи в первой половине XXI века. Это, прежде всего, внедрение в системы мобильной и спутниковой связи цифровых антенных решеток (ЦАР). От традиционных фазированных они отличаются выполнением операции аналого-цифрового преобразования в каждом приемном канале, формированием диаграммы направленности всей решетки в цифровом виде и последующей обработкой сигналов на основе процедур многоканального анализа.

С помощью ЦАР может быть реализован одновременный прием множества сигналов в широком пространственном секторе с последующим измерением параметров каждого из них. Цифровым суммированием сигналов при такой пространственно-временной обработке наращивается мгновенный динамический диапазон систем связи до значений, принципиально не достижимых в аналоговой технике (в ультразвуковой ЦАР получен динамический диапазон 150 дБ [1], а в гидроакустической — около 200 дБ [1]). Это служит предпосылкой к реализации высокой помехозащищенности таких систем, которая обуславливается и цифровым формированием высокоидентичных частотных фильтров по выходам приемных каналов.

Отметим, что ЦАР — весьма совершенная пространственно-избирательная система, и в ней наиболее полно могут быть реализованы адаптивные методы обработки сигналов [3]. С помощью приемопередающих адаптивных ЦАР на базовых станциях сотовой радиосвязи можно устойчиво сопровождать движущихся абонентов отдельными лучами диаграмм направленности (рис. 1), обеспечивая:

- ♦ подавление мешающих сигналов, которые возникают вследствие многопутного распространения радиоволн, т.е. существенно снижать глубину фединговой модуляции;
- ♦ повышение интенсивности полезных сигналов за счет фокусировки в направлениях источников радиосообщений максимумов диаграммы направленности антенны (ДНА) (рис. 2);
- ♦ улучшение отношения сигнал/помеха формированием «нулей» ДНА в направлениях источников мешающих сигналов (см. рис. 2), в том числе соседних базовых станций (см. рис. 1), благодаря чему (что особенно важно) удастся повысить пропускную способность каналов связи в нестационарных условиях распространения радиоволн.

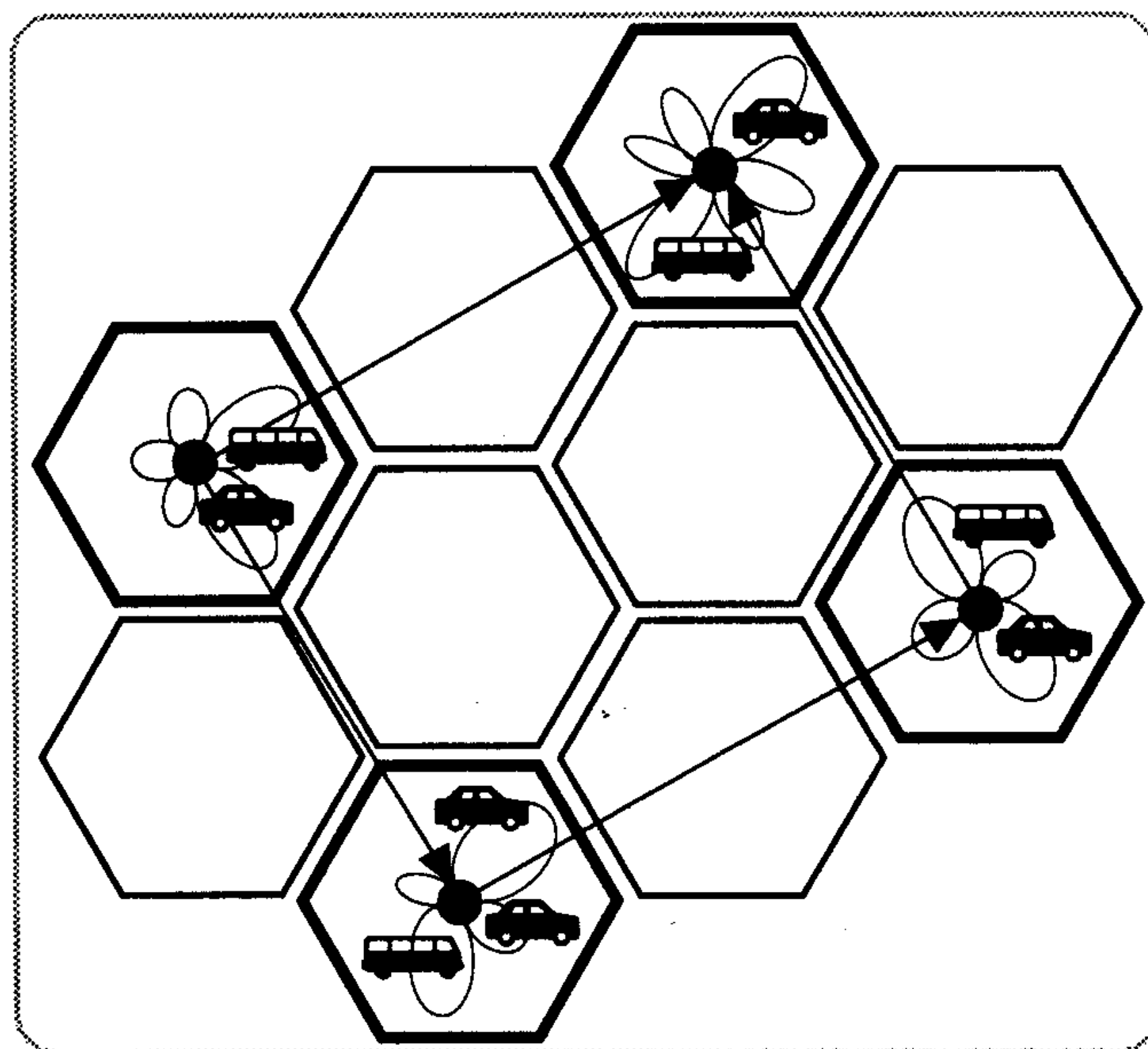


Рис. 1. Сопровождение движущихся абонентов отдельными лучами диаграмм направленности

Перечисленные преимущества ЦАР давно стали объектом пристального внимания специалистов. Однако наиболее результативно в решении проблем практического внедрения ЦАР в системы мобильной сотовой связи продвинулись лишь участники проекта TSUNAMI (Technology in Smart Antennas for Universal Advanced Mobile Infrastructure), спонсируемого Европейской Комиссией в рамках программы ACTS (Advanced Communications Technology and Services). Данная научно-исследовательская работа осуществляется консорциумом фирм, статус ведущей среди которых отведено ERA Technology Ltd (Великобритания) [3]. Цель проекта — исследование путей реализации преимуществ адаптивных антенн, демонстрация возможности и стоимостной эффективности их развертывания в мобильных системах связи.

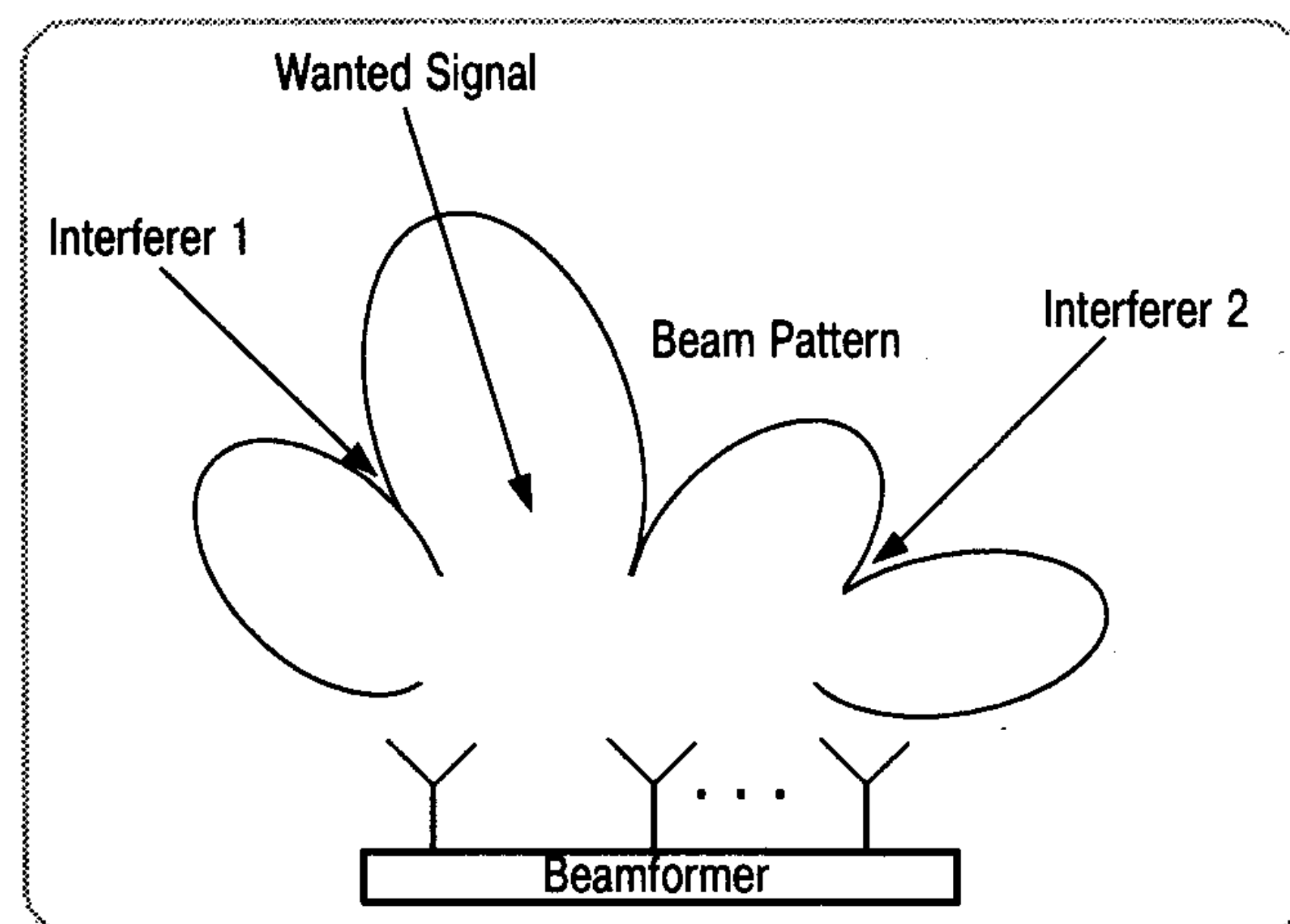


Рис. 2. Фокусировка в требуемых направлениях максимумов ДНА

В ходе первого этапа работ (январь 1994 — декабрь 1995 года), был изготовлен и опробован демонстратор ЦАР, подтверждающий основную концепцию. Его блоки разработаны различными фирмами: Motorola, ERA, CASA, Bristol University, Orange. В составе демонстратора можно структурно выделить (рис. 3):

- ◆ антенную решетку из восьми элементов;
- ◆ 8 приемников и преобразователей на промежуточную частоту;
- ◆ 8 преобразователей на высокую частоту с усилителями мощности;
- ◆ два независимых (включающих приемную и передающую части) цифровых диаграммоформирователя;
- ◆ две базовые станции «DECT»;
- ◆ управляющий персональный компьютер.

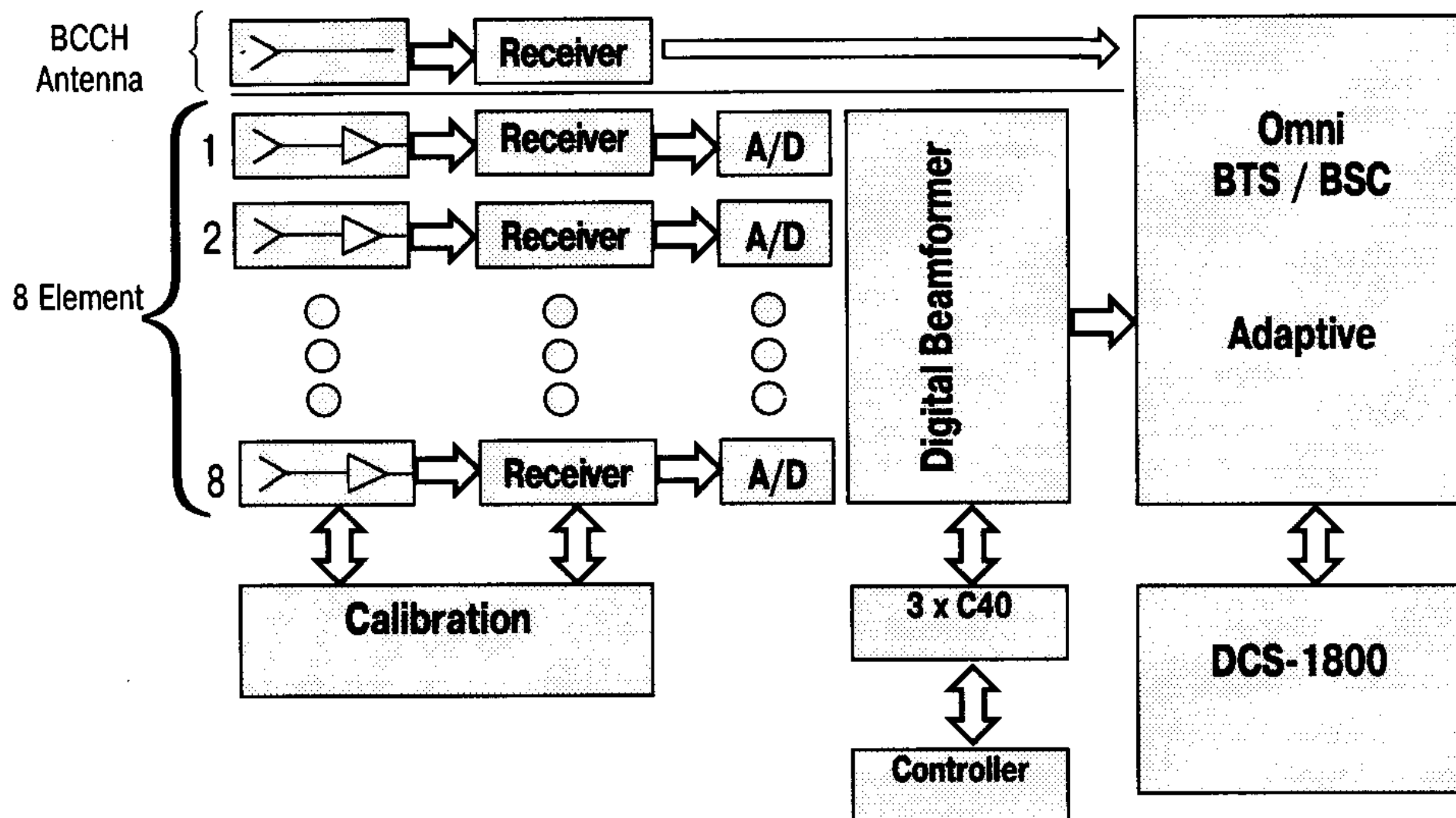


Рис. 3. Схема демонстратора ЦАР

Среди многочисленных технологических новшеств, нашедших применение в проекте, наибольшего внимания заслуживает устройство цифрового диаграммоформирователя DBF 1108.

Каждое такое устройство [3] способно обрабатывать выходы антенной решетки, содержащей до 128 каналов, проводя вычисления в комплексной форме с максимальной производительностью один «четырёхмегагерцовый» цикл на элемент. Для расширения полосы частот обработки или увеличения числа каналов антенной решетки могут быть использованы дополнительные микропроцессоры DBF, работающие параллельно, с каскадным суммированием выходов устройств или их групп. Разрядность входа DBF 8 бит, представление чисел — комплексное, весовые коэффициенты 11-битовые. Количество ячеек памяти весовых коэффициентов удвоено, что позволяет обновлять их без потерь темпа обработки. Входные данные запоминаются для калибровки и формирования ковариационной матрицы и используются при управлении изменением корректирующих коэффициентов.

Устройство DBF разработано как фундаментальный «строительный» блок, на котором может базироваться широкий диапазон систем с цифровым диаграммообразованием.

По мнению разработчиков, оно хорошо приспособлено для использования как в адаптивных, так и в неадаптивных системах. Однако для такого применения, на наш взгляд, его разрядная сетка мала (8 разрядов по сигналу и 11 — по весовым коэффициентам). Например, только за счет когерентного суммирования выходов 4096 элементов антенной решетки или временных отсчетов, динамический диапазон системы обработки на выходе может быть расширен

дополнительно на 36 дБ, т.е. на 6 разрядов по сравнению со входом, и для его обеспечения в этом случае необходима 14-разрядная шина данных.

В ходе полевых испытаний первого этапа, проводившихся в различных условиях распространения радиоволн, были продемонстрированы следующие преимущества цифровых адаптивных антенн:

- ◆ возрастание дальности передачи сигналов;
- ◆ увеличение защищенности от плоского фединга;
- ◆ подавление помех;
- ◆ улучшение условий передачи информации с помощью пространственной селекции сигналов (SDMA).

Целью второго, трехлетнего, этапа работ явилась отработка

инфраструктуры третьего поколения мобильных систем типа UMTS развертыванием адаптивной антенны в составе действующей базовой станции сотовой связи DCS-1800 и проверкой качества сопровождения подвижного источника сообщений при воздействии источников помех.

Запланированная серия полевых испытаний адаптивных антенн с использованием прототипов реального оборудования в реальной мобильной сети началась в конце 1997 года в окрестностях Бристоля (Великобритания).

К настоящему времени получены весьма обнадеживающие результаты. В частности, прошла апробацию система

калибровки антенной решетки. Диаграммы направленности приемной антенны до выполнения цифровой коррекции характеристик приемных каналов и после нее изображены на рис. 4. Сравнение полученных результатов с теоретическими свидетельствует о неплохом их совпадении, вплоть до вторых боковых лепестков диаграммы направленности. Вместе с тем стало очевидным, что при тональном калибровочном сигнале для более эффективной работы новой системы во всем исследуемом диапазоне частот (1710...1880 МГц) необходимо более тщательно выдерживать идентичность амплитудно-частотных характеристик приемных каналов в требуемой полосе (разброс параметров комплексной АЧХ не должен превышать 3° по фазе и 0,5 дБ по амплитуде).

Адаптивное формирование луча было проверено на статическом и перемещающемся источниках при наличии одного неподвижного передатчика помехи. В качестве процедуры обработки использовался известный метод MUSIC [4], далеко не самый лучший по своим характеристикам. Тем не менее в процессе сопровождения движущегося адресата источник сообщений устойчиво отслеживался на фоне помехового сигнала до тех пор, пока угловое расстояние между ними не достигло 8°, что соответствует половине ширины главного луча синтезированной диаграммы направленности. При этом разность между контрольными показаниями навигационного GPS-приемника и оценками пеленга по методу MUSIC не превысила 2,6°. В целом испытания подтвердили улучшение качества связи по сравнению с одиночной антенной (см. рис. 3, канал BCCH). Полевые испытания продолжаются и ныне. Подробнее с их результатами можно ознакомиться, посетив Web-сайт фирмы Era Technology в Интернет [3].

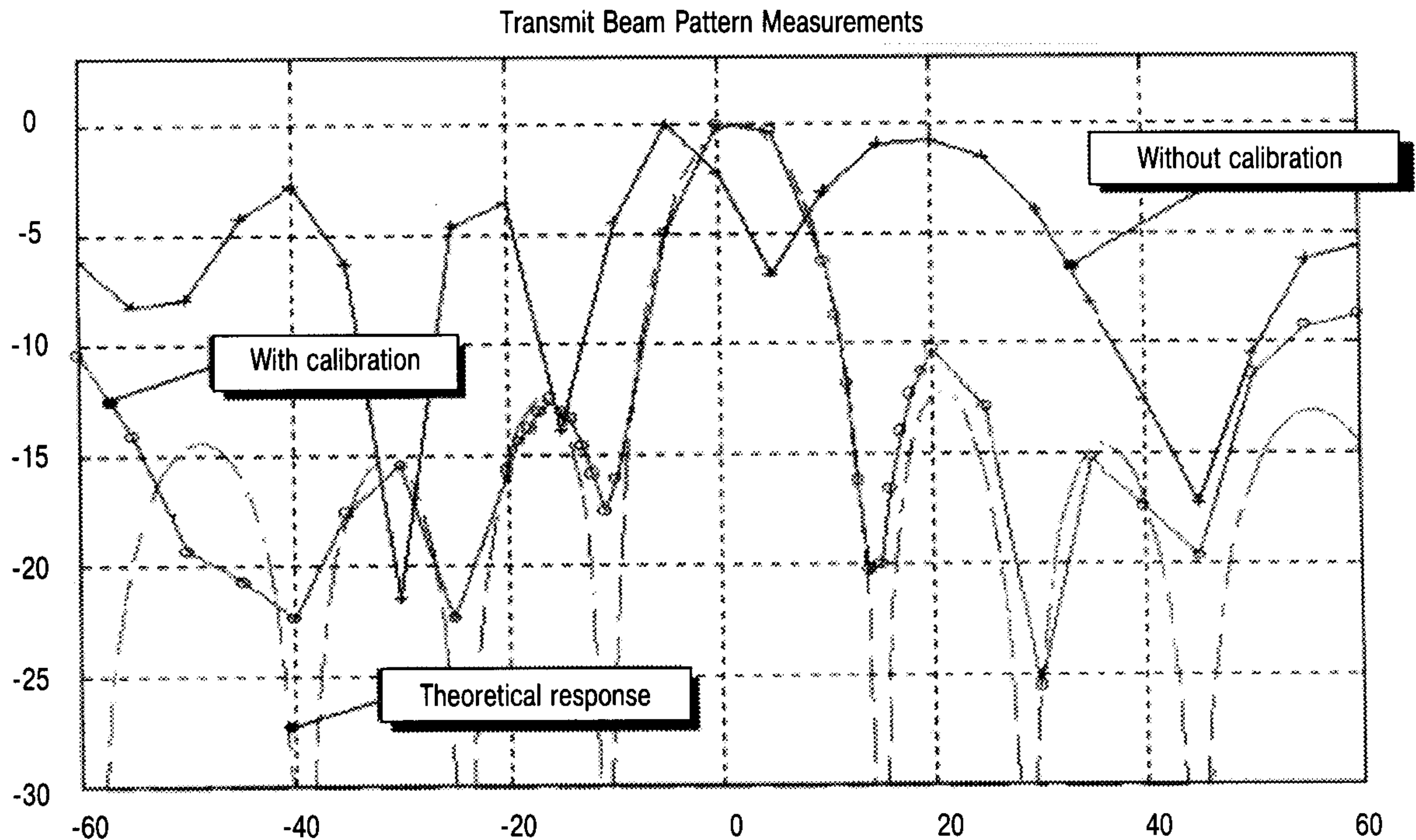


Рис. 4. Диаграммы направленности приемной антенны

Среди других приложений, где использование ЦАР в качестве ключевого элемента станет вопросом ближайшего времени, можно указать также мобильные спутниковые системы связи. Во многих проектах такого рода применение адаптивных цифровых антенных решеток рассматривается прежде всего в составе базовых станций [5]. Основная цель научных исследований — моделирование и лабораторные испытания доступных методов цифрового диаграммообразования, включая мультиплексную передачу данных и множественный доступ с временным уплотнением (FDMA и SDMA). Разработка многолучевых антенных систем направлена на тесную алгоритмическую и аппаратную интеграцию приемопередающих режимов, достижение высокого коэффициента усиления. Наиболее перспективным направлением, где внедрение ЦАР практически не имеет альтернатив, можно считать наземную сеть контроля и управления низкоорбитальных спутниковых систем телекоммуникаций. С помощью таких базовых станций можно будет сопровождать одновременно целый ряд орбитальных ретрансляторов в процессе их движения, обеспечивая непрерывную и высококачественную связь в условиях многолучевого распространения радиоволн и нахождения нескольких спутников в одном луче диаграммы направленности. В подобных ситуациях адаптация к внешней сигнально-помеховой обстановке, по мнению разработчиков системы [3], достигается за счет настройки антенной решетки как «пространственного фильтра», способного усиливать либо подавлять сигналы, приходящие с различных направлений в заданном диапазоне частот. Такая оценка роли антенной решетки традиционна и справедлива для аналоговых ФАР. Однако более перспективно рассматривать ЦАР не как «пространственный фильтр», а как транслятор информации, содержащейся в пространственно-временной структуре электромагнитного поля, падающего на раскрыт антенной системы. Последующее устройство обработки оценивает внешнюю сигнально-помеховую обстановку и оптимизирует условия приема сообщений, что можно интерпретировать как параллельное формирование нескольких «пространственно-частотных фильтров», каждый из которых

выделяет «свой» сигнал и подавляет прочие, «мешающие». Реализации «интеллектуальных» («smart» [3]) антенно-приемных систем, адаптивно минимизирующих потери информации путем обработки сигнально-помеховых смесей в цифровой форме, способствуют впечатляющие успехи производителей элементной базы, являющейся ключевой при разработке ЦАР (8–10-разрядные однокристалльные АЦП с тактовой частотой до 200 МГц и более, цифровые сигнальные микропроцессоры производительностью до 1000 операций с плавающей запятой в микросекунду [6]).

В заключение подчеркнем, что антенны с цифровым формированием диаграмм направленности — это «предельные антенны» [7], позволяющие собрать всю информацию, содержащуюся в электромагнитном поле их раскрыва. Дальнейший прогресс в антенных технологиях напрямую зависит от роста вычислительных возможностей микропроцессорной техники, быстродействия и разрядности аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей, а также совершенствования алгоритмов обработки сигналов.

Литература

1. <http://www.atl.com/news/news.htm>
2. <http://www.primenet.com/~trisis/>
3. <http://www.era.co.uk/tsunami/tsunami2.htm>
4. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 584 с.
5. Regenerative Digital Satellite Systems (collaborative project with Mobile and Satellite Systems thrust) // Dr. John Litva, McMaster University and Dr. Peter McLane, Queen's University- <http://www.trio.ca/research/asp-7.htm>
6. <http://www.ti.com/>
7. John Litva, Titus K. Y. Lo. Digital Beamforming in Wireless Communications, Artech House, Boston, 1996 — <http://www.crl.mcmaster.ca/Wireless.Technology.Group/books.htm>.