

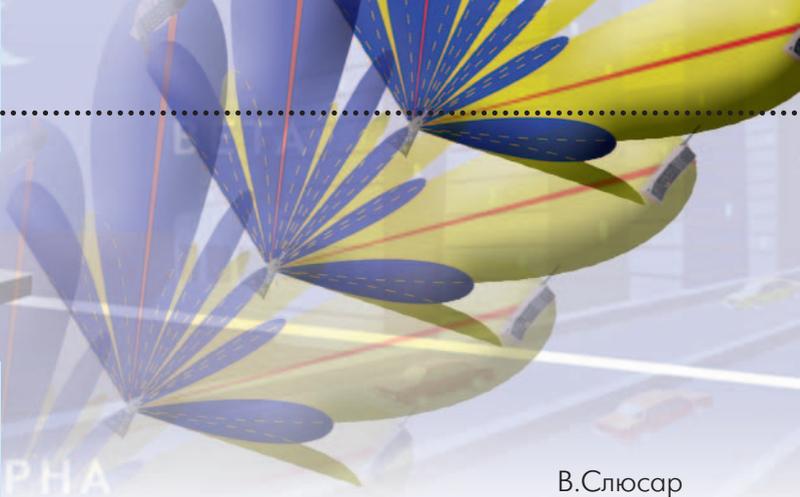
SMART-АНТЕННЫ

ПОШЛИ В СЕРИЮ

Технологиям цифрового формирования луча (цифрового диаграммообразования или цифрового формирования диаграммы направленности антенны) отводится все более значимое место в современных системах связи, ими занимаются практически во всех технически развитых странах мира. Без них не обходятся концепции мобильной связи 3-го и 4-го поколений. Цифровое формирование луча реализуется, как известно, посредством цифровых антенных решеток (ЦАР) [1], за рубежом также именуемых Smart-антеннами (умными антеннами). Используют и синонимичное название – Intelligent Antenna. Возможно, эти понятия, отдающие рекламой и ориентированные на рядового потребителя, не самые удачные. Однако они как нельзя лучше отражают суть возможностей, предоставляемых технологией цифрового диаграммообразования (ЦДО), благодаря которым антенные системы становятся все более "интеллектуальными". И пусть в отношении антенных систем эпитет Smart содержит пока больше авансов на перспективу, нежели отражает реальное положение вещей, но уже в рамках имеющегося научного задела Smart-технологии, реализованные в ЦАР, умеют многое.

Каковы же преимущества нового класса антенных систем перед традиционными антеннами, в том числе перед их прототипом – фазированными антенными решетками (ФАР)? Для ответа на этот вопрос совершим краткий экскурс в схемотехнические основы ЦАР, которые уже частично рассматривались автором в работах [2–5].

Цифровая антенная решетка – это антенная система, представляющая собой совокупность аналого-цифровых каналов с общим фазовым центром, в которой диаграмма направленности формируется в цифровом виде, без фазовращателей. Теоретические основы такого подхода к построению антенн были заложены еще в 60–70-е годы прошлого века. Но лишь теперь, с развитием микропроцессорной техники, стало возможным практически реализовать накопленный научный задел. В бывшем СССР наиболее последовательно данное направление поддерживала киевская научная школа, возглавляемая заслуженным деятелем науки и техники Украины, доктором технических наук В.А.Варюхиным. Этот научный



В.Слюсар

коллектив в Военной академии ПВО сухопутных войск имени А.М.Василевского (Киев) на протяжении 60–90-х годов XX века разработал теоретические основы многоканального анализа со сверхразрешением сигналов, апробировал ряд макетов и опытных образцов радиотехнических систем с ЦАР. Как следствие, к началу 1990-х годов в СССР существовал уже весьма представительный ряд научных школ, совокупные достижения которых по многим теоретическим и практическим вопросам опережали аналогичные разработки за рубежом.

Современные технологии ЦАР своим массовым развитием обязаны интеграции процессоров цифровой обработки сигналов (в виде DSP или на ПЛИС) с аналого-цифровыми и цифроаналоговыми преобразователями (АЦП/ЦАП) в рамках одного модуля или даже чипа [4, 5]. Построение каналов ЦАР на такой основе позволяет унифицировать процедуры и аппаратные узлы обработки сигналов и упрощает их адаптацию к тому или иному протоколу работы. Технология ЦДО обеспечивает максимальную простоту реконфигурации и модификации систем связи, которая зачастую сводится лишь к замене их программного обеспечения. При этом архитектура РЭА может оптимизироваться (по ресурсам и функциональности) под непосредственно выполняемые задачи. В этом смысле технологию ЦАР можно считать венцом развития столь популярной сегодня концепции программно-реконфигурируемого радио (Software Defined Radio).

Ключевая особенность ЦАР – цифровое формирование лучей диаграммы направленности (ДН) антенны. В задачах связи это позволяет динамически оптимизировать обслуживаемую зону покрытия, оперативно перенацеливая цифровые приемопередающие лучи (рис.1) в зависимости от территориального распределения абонентов. Созвездие лучей, синтезируемое, например, по алгоритмам быстрого преобразования Фурье либо посредством классических процедур дискретного Фурье-анализа, является, по сути, совокупностью пространственно-частотных фильтров, каждый из

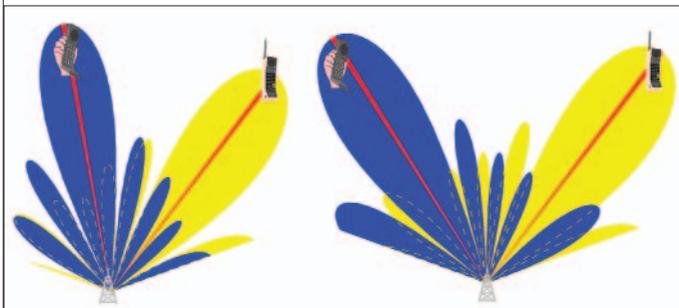


Рис.1. Адаптивная стратегия в управлении ДН антенной системы базовой станции

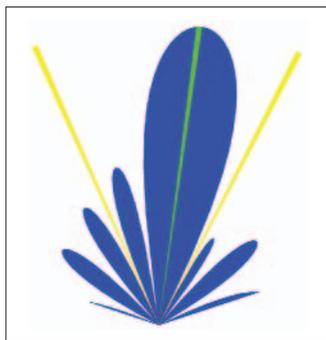


Рис.2. Адаптивная ДН с "нулями" в направлениях двух источников помех

Разброс же характеристик фильтров приводит к тому, что при возникновении случайной помехи в каждом из каналов появляется мультипликативный помеховый сигнал, пропорциональный произведению амплитуды помехи на отклонение характеристик входного фильтра от номинального значения. Мультипликативные же помехи, проявляющиеся как замирания сигнала, гораздо неприятнее аддитивных. Действительно, от аддитивного шума, одинакового в каждом из каналов, можно избавиться, идентифицируя его как общую составляющую сигнала во всех каналах и вычитая его из сигнальной смеси. Мультипликативный же помеховый сигнал компенсировать невозможно. Однако благодаря ЦДО мультипликативные помехи удается минимизировать.

Кроме того, ЦДО способствует и увеличению динамического диапазона приемных антенн. Действительно, при синфазном сложении сигналов в каждом из каналов антенной решетки в процессе ЦДО дисперсия (средняя мощность) шума растет пропорционально числу каналов антенной решетки R , а мощность сигнала (пропорциональная квадрату амплитуды) – пропорционально R^2 . Следовательно, отношение сигнал/шум после ЦДО возрастет в R раз, что повышает чувствительность системы, а значит, и динамический диапазон (отношение амплитуды максимального сигнала к минимальному). В результате "нули" ДН в направлениях источников помех (рис.2) формируются без "заплываний" провалов, обычных при недостаточном динамическом диапазоне приемного модуля. В ФАР качество подавления помех ограничено неидентичностью фазовращателей и малой разрядностью их схем управления (обычно 5–7 разрядов), тогда как в ЦАР уже используются 14-разрядные АЦП. Многочисленные эксперименты подтверждают возможность подавления активной шумовой помехи в 8-элементной ЦАР более чем на 30 дБ не только по боковым лепесткам, но и в главном луче ДН при среднеквадратическом отклонении коэффициентов усиления аналоговых приемных каналов 0,5 дБ и величине фазовых ошибок не более 3° [6].

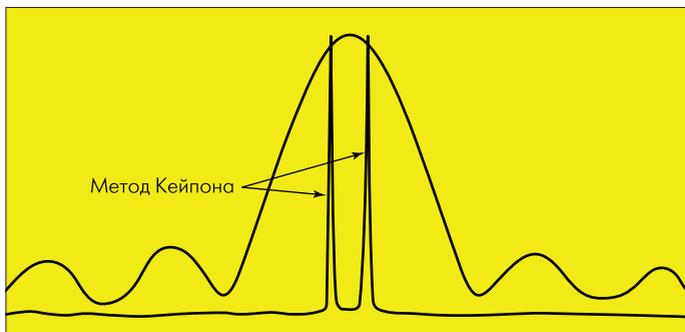


Рис.3. Сверхрелеевское разрешение сигналов по направлениям их прихода методом Кейпона

которых селективирует строго определенный набор сигналов и подавляет остальные, воспринимаемые как помеховые.

Технология ЦДО существенно улучшает качество связи в условиях многолучевого распространения радиоволн, а также резко повышает помехозащищенность системы при интенсивном радиопротиводействии. Это объясняется тем, что характеристики цифровых фильтров в антенных каналах практически идентичны.

ЦАР на базовых станциях сотовой связи позволяют существенно увеличивать их пропускную способность за счет одновременного многолучевого приема сигналов во всем рабочем секторе. При этом возможно достижение сверхрелеевской разрешающей способности по направлениям прихода сигналов, частоте и времени задержки. Такое разрешение, например, по угловой координате α для двух точечных источников в линейной ЦАР обеспечивает алгоритм Кейпона [7] (см. врезку), сводящийся к поиску локальных максимумов решающей функции $H(\alpha)$ в пространстве лучей ДН (рис.3). Нетрудно заметить, что, в отличие от традиционной обработки, процедура Кейпона отчетливо выдает два обособленных отклика.

Известно уже достаточно много методов сверхразрешения, реализация которых, в зависимости от отношения сигнал/шум, позволяет отдельно селективировать до десяти и более точечных объектов в пределах главного лепестка приемной диаграммы направленности ЦАР. Однако для непосредственно связанных задач, исключая процесс вхождения в связь, предпочтителен метод максимального правдоподобия (МП), из которого все остальные следуют как квазиоптимальные варианты. Именно метод МП при цифровом формировании луча обеспечивает близкие к предельным точности оценки параметров сигналов и их разрешение.

Неудивительно, что многочисленные достоинства ЦАР обусловили рост их рыночной привлекательности. Пройдя в конце 90-х годов этап демонстрационных проектов [3], данная технология уже вступила в стадию серийного изготовления антенных систем для систем сотовой связи – действующих и перспективных. Среди пионеров серийного производства ЦАР ведущие позиции занимают компании ArrayComm, Metawave Communications, AirNet Communications, Wireless Online (все – США), а также Ericsson (Швеция).

Пальма первенства в освоении серийных ЦАР для базовых станций стандарта CDMA принадлежит американской компании Metawave Communications, выпускающей семейство интегрированных Smart-антенн Spotlight. Первые ЦАР от Metawave Communications – Spotlight 2000 (2100) – работали только в диапа-

Процесс цифрового диаграммообразования сводится к выполнению БПФ над отсчетами комплексных выходных напряжений приемных каналов, полученными в один момент времени. При этом формируется веер пространственных характеристик направленности $F_r(\alpha)$, закон изменения которых по углу известен и определяется, например для линейной эквидистантной ЦАР, выражением

$$F_r(\alpha) = \frac{\sin \frac{R}{2} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha - \frac{2\pi r}{R} \right)}{\sin \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha - \frac{2\pi r}{R} \right)},$$

где r – номер пространственного канала линейной эквидистантной ЦАР ($r = \overline{1, R}$), α – угловая координата.

Алгоритм Кейпона сводится к поиску локальных максимумов решающей функции $H(\alpha)$:

$$H(\alpha) = \frac{1}{F^T(\alpha) \cdot K^{-1} \cdot F(\alpha)},$$

где $F(\alpha)$ – вектор известных значений ДН каждого из каналов ЦАР с элементами $F_r(\alpha)$;

$K = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_n \cdot U_n^*$ – корреляционная матрица откликов приемных каналов, сформированная по серии из N временных отсчетов; U – вектор напряжений сигналов, полученный в результате БПФ над напряжениями по выходам первичных приемных каналов ЦАР; * – символ матричной операции комплексного сопряжения, T – символ операции транспонирования.

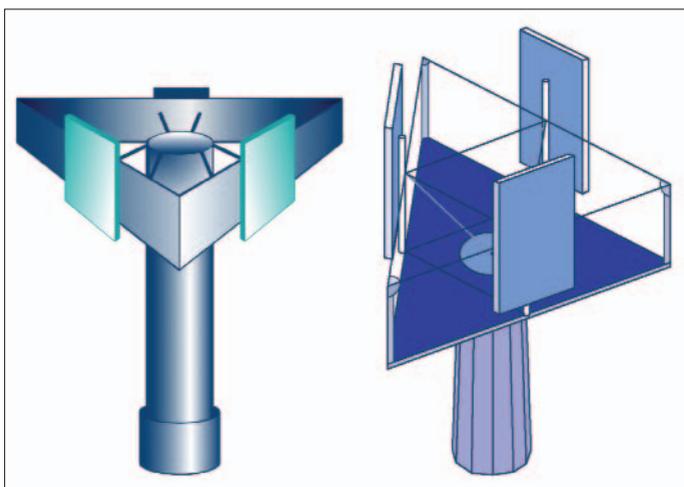


Рис.4. Антенная система компании Metawave

зоне несущих 800–900 МГц. Однако системы Spotlight 2200 поддерживают еще и полосу 1800–1900 МГц. Аппаратура систем Spotlight базируется на ASIC и FPGA, что лишний раз говорит о предпочтительности применения FPGA по сравнению с DSP при решении задач ЦДО [5].

Типовая Smart-антенна базовой станции от Metawave состоит из 12-элементного массива излучателей, обычно устанавливаемых по трехсекторной схеме (рис.4). Каждая секторная решетка сформирована из четырех антенных элементов (рис.5), пример характери-

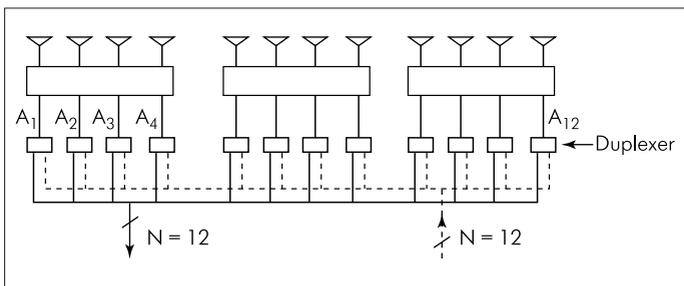


Рис.5. Структура приемопередающей 12-элементной антенной решетки от Metawave (сплошная линия – режим приема, пунктирная – режим передачи)

стик которых представлен на рис.6. Ширина ДН каждого антенного элемента на уровне -3 дБ составляет около 30° . Благодаря ЦФЛ суммарная ширина основных (парциальных) лучей каждого секторного сегмента ЦАР может принимать значения 180, 120 или 60° . Сам сектор излучения (приема) может смещаться относительно физической нормали на угол $\pm 30^\circ$. Более того, форма соты также может изменяться, приобретая трех-, четырех- и даже шестисекторные очертания (рис.7). Причем система Spotlight позволяет в каждом из 120-градусных секторов в реальном масштабе времени вырезать до трех подсекторов, пораженных помехами (т.н. динамический синтез сектора – DSS). В результате упрощается частотное планирование сети, а оператор базовой станции может рационально перераспределять ресурсы в зависимости от специфики окружающего

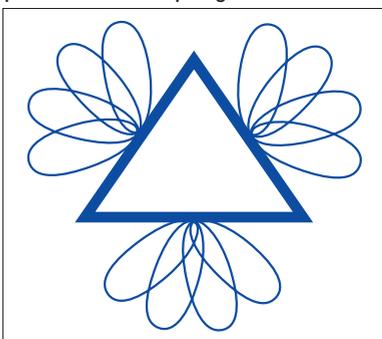


Рис.6. Вариант ориентации ДН Smart-антенны компании Metawave

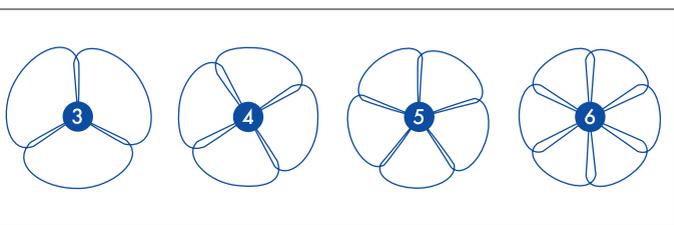


Рис.7. Многосекторная конфигурация ДН

ландшафта, статистики распределения запросов по времени суток, дням недели и при непредвиденных обстоятельствах (рис. 8, 9). Рост числа секторов приема с 3 до 6 позволяет существенно увеличить емкость сотовой ячейки (число обслуживаемых абонентов). По данным Metawave [8], такой прирост в стандарте cdma2000 на основе Spotlight-решений может достигать 94%.

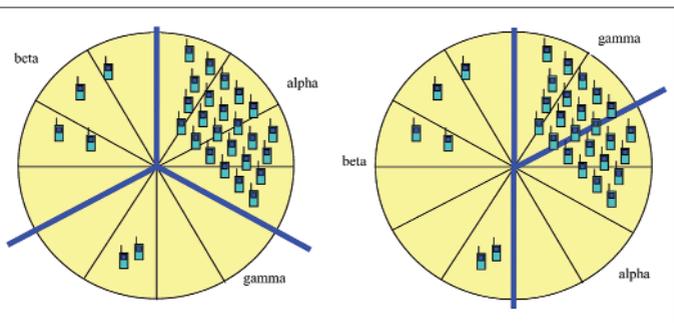


Рис.8. Посекторная адаптация к нагрузке с помощью Smart-антенн

Одна из последних разработок Metawave – антенный комплекс Spotlight 2230 – представляет собой аппаратуру ЦАР, интегрируемую в состав базовой станции CDMA 1EX совместно с оборудованием Lucent Flexent Modular Cell Base Station фирмы Lucent Technologies [8] (рис.10, 11). Компания Lucent поставляет ультралинейные усилители мощности для передающего сегмента и малошумящие усилительные модули для многоканального приемника.

Специфика цифрового оборудования ЦАР позволяет "мягко" интегрировать ее в базовую станцию любого стандарта с минимумом стыковочных работ. При этом стоимость дополнительного оборудования составит порядка 10% от стоимости аппаратуры типовой базовой станции CDMA, рассчитанной на обслуживание 48–72 одновременных вызовов [8]. Учитывая, что применение ЦАР существенно повышает емкость сети, общая экономия средств за счет отказа от дополнительных базовых станций будет весьма значительной. Согласно сведениям на сайте фирмы Metawave, к октябрю 2002 года во всем мире было развернуто 420 систем Spotlight, в том числе и в Санкт-Петербурге.

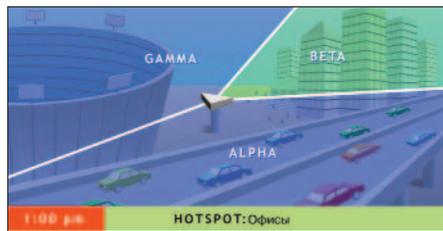


Рис.9. Динамический синтез секторов в зависимости от времени суток

Компания AirNet Communications (www.aircom.com) с офисом в городке Мельбурн (шт. Флорида, США), в отличие от Metawave Communications, сосредоточила усилия на разработке Smart-антенн для модернизации базовых станций стандарта GSM (900, 1800, 1900 МГц) с поддержкой его расширений GPRS и EDGE. Впоследствии будет возможна и работа с базовыми станциями 3G-стандарта WCDMA. В активе AirNet 69 действующих патентов, которыми

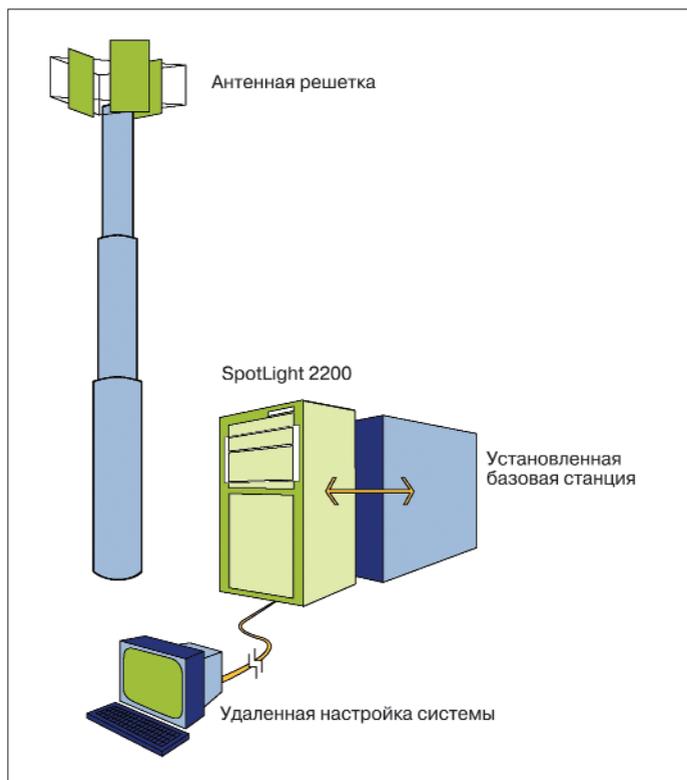


Рис.10. Комплект аппаратуры базовой станции CDMA 1X с оборудованием Spotlight 2230

компания обзавелась с момента появления на рынке телекоммуникаций в 1994 году. Технология ЦДО используется в базовой станции AdaptaCell Super Capacity (дословно – суперемкая адаптивная сота). Опираясь на рекламные материалы, несложно предположить, что базовая станция компании AirNet обслуживает 8-элементную ЦАР, работающую в секторе 120°. Следовательно, полноценная трехсекторная ЦАР будет содержать 24 элемента. Примечательно, что AdaptaCell Super Capacity обеспечивает цифровую обработку сигналов во всей полосе сигналов GSM [9] и совместима с технологией "интеллектуальной соты" IntelliCell [10], продвигаемой компанией ArrayCom (Сан-Хосе, шт. Калифорния) (рис. 12).

ArrayCom вместе с Metawave Communications, как отмечалось, являются пионерами в разработке Smart-антенн для радиосвязи. Однако в отличие от Metawave, ArrayCom изначально ориентировалась на рынок 2,5G и 3G систем сотовой связи, поддерживающих стандарт WCDMA. Неудивительно, что вскоре интересы AirNet и ArrayCom пересеклись, и теперь они зачастую вынуждены объединять усилия, в ряде случаев прибегая к совместной поставке оборудования.

Согласно заявлениям разработчиков ArrayCom, базовая станция IntelliCell при использовании технологии ЦФЛ позволяет почти вдвое сократить необходимое для покрытия зоны обслуживания число базовых станций, на четверть снизить расходы при развер-

тывании вновь создаваемой сетевой инфраструктуры и вдвое уменьшить время на инсталляционные работы. Если верить рекламным материалам, компания ArrayCom уже поставила во всем мире около 60 тыс. базовых станций.

Как утверждают разработчики, срок окупаемости затрат на внедрение Smart-антенн составляет год и менее. При этом следует учесть, что технология ЦАР пребывает лишь в начале своего становления. По мере ее совершенствования могут быть достигнуты еще более внушительные результаты по увеличению канальной емкости и размеров покрываемой зоны – например, путем увеличения числа антенных элементов в одном секторе ЦАР (до 16 и более – в азимутальной плоскости и до 4–8 – в угломестной).

Темпы развития используемой в ЦАР элементной базы позволяют предположить, что уже в ближайшем десятилетии начнется массовое обновление инфраструктуры сотовой связи на основе Smart-антенн. Причем имеющийся научный задел и опыт разработки подобного рода систем в сочетании с необходимой технологической базой позволяют развернуть и отечественное производство базовых станций с ЦАР, опираясь на зарубежные комплектующие и уникальный интеллектуальный потенциал разработчиков из стран СНГ.

Такой вариант развития событий позволил бы не только создать тысячи новых рабочих мест на российских предприятиях, но и сэкономить инвесторам львиную долю средств на обновление существующей инфраструктуры сотовой связи. И хотя процессы износа связанного оборудования еще не скоро поставят вопрос о таком обновлении на повестку дня в России, однако в силу развития интереса к телекоммуникациям и возрастания их роли во всех сферах деятельности моральное старение аппаратуры может произойти (и происходит) значительно быстрее, чем физический износ. Поэтому готовиться к неизбежному обновлению инфраструктуры систем связи следует уже сейчас.

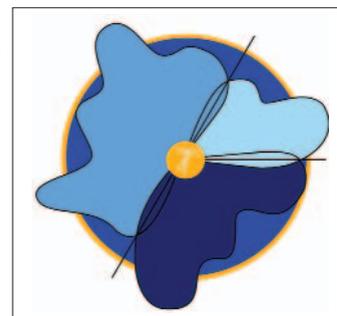


Рис.12. "Интеллектуальная" сота

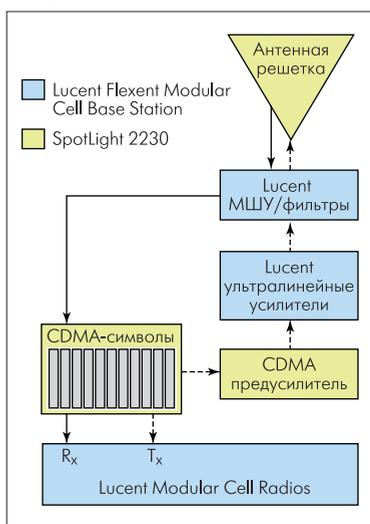


Рис.11. Структурная схема оборудования базовой станции CDMA 1X

ЛИТЕРАТУРА

1. The Path to 4G Mobile. – Communications Week International, Issue 260, 5 March 2001.
2. Слюсар В. Ультразвуковая техника на пороге третьего тысячелетия. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 1999, № 5, с. 50–53.
3. Слюсар В. Цифровое формирование луча в системах связи: будущее рождается сегодня. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, № 1, с. 6–12.
4. Слюсар В. Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, № 3, с. 42–46.
5. Слюсар В. Схемотехника цифрового диаграммообразования. Модульные решения. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2002, № 1, с. 46–52.
6. Слюсар В.И. Идеология построения мультистандартных базовых станций перспективных систем связи. – Радиоэлектроника (Изв. вузов), 2001, № 4, с. 3–12.
7. Марпл – мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения /Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.
8. www.metawave.com
9. Super Capacity Solution. The World's First GSM Adaptive Array Solution. – www.airnetcom.com.
10. www.arraycom.com