

# БЕСПРОВОДНАЯ ПРОГРАММИРУЕМАЯ РАДИОСВЯЗЬ

## ВОЗМОЖНОСТИ ВЧ МЭМС

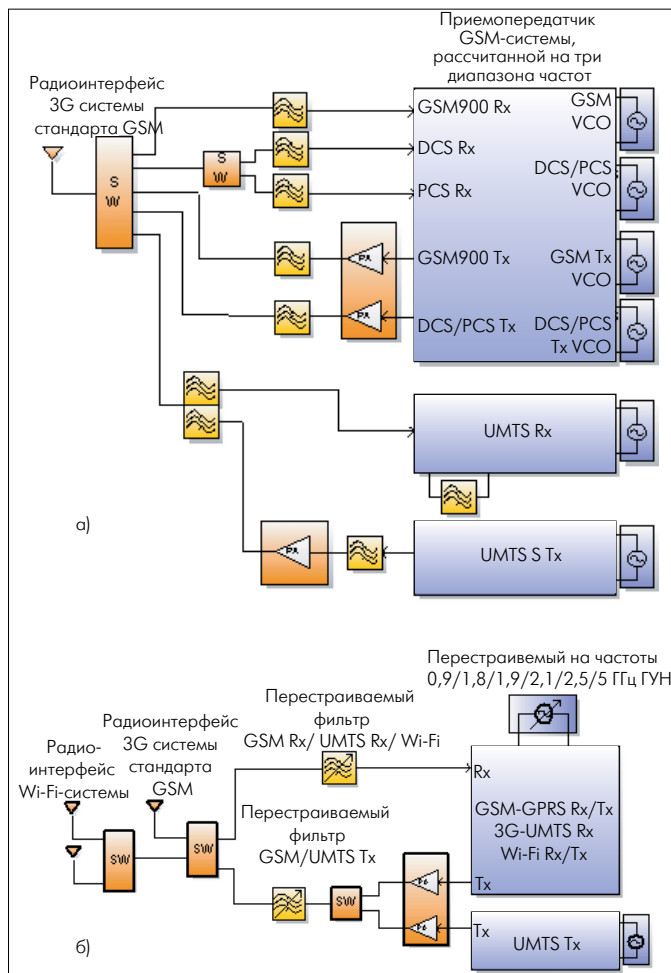
Портативные беспроводные средства будущего — это сложные, многополосные, многомодовые системы. Как при любой технической разработке, создание беспроводных приложений требует реализации не совместимых друг с другом параметров. Необходимость увеличения скорости передачи, мощности излучаемого сигнала, создания многомодовых, многополосных и многофункциональных радиостанций, способных работать в стандартах глобальной сотовой связи (GSM, UMTS, 4G), глобального позиционирования (GPS), цифрового видео- и аудиовещания (DVB, DAB), в стандартах беспроводных персональных сетей и личных сетей пациентов (WLAN, и WBAN, соответственно), универсальной беспроводной связи на большие расстояния (WiMax) конфликтует с необходимостью обеспечения высокого уровня интеграции, малых габаритов, низкой стоимости и достаточно продолжительного срока жизни батарей питания. Тем не менее, по мнению экспертов, эти задачи разрешимы за счет применения программно управляемых радиоустройств (Software-Defined Radio, SDR). Успешное промышленное освоение таких средств радиосвязи зависит от достижений в области создания быстродействующих сигнальных процессоров, преобразователей данных с широким динамическим диапазоном, эффективного и компактного ПО и широкополосной высокоэффективной ВЧ-техники. Правда, отмечается, что традиционная полупроводниковая технология построения ВЧ-приемопередатчиков мобильных телефонов пока не позволяет выполнить эти требования. На помощь ей могут прийти высокочастотные микроэлектромеханические системы (МЭМС).

Габариты средств беспроводной связи постоянно уменьшаются при одновременном увеличении их функциональных возможностей в пересчете на единицу площади. Это будет происходить до тех пор, пока применяемые в этих системах объемные пассивные ВЧ-компоненты (высокочастотные эле-

В. Юдинцев  
vlad@elvees.ru

менты индуктивности, керамические и ПАВ-фильтры, ключи на варакторах и р-и-п-диодах) не ограничат дальнейшее уменьшение их размеров. Поэтому нельзя ожидать значительного уменьшения размеров мобильных телефонов. Но их функциональные возможности, приведенные к единице площади, будут возрастать, что потребует миниатюризации их компонентов и разработки новых архитектур, обеспечивающих перестройку частоты. Применение только технологии масштабирования для повышения сложности полупроводниковых приборов в рамках сокращения энергетического бюджета и выполнения требований своевременного выхода на рынок уже несостоятельно. Вот почему сейчас активно ведутся работы по обеспечению гибкости и рентабельности мобильных устройств за счет применения программно управляемых устройств, содержащих программируемое, или реконфигурируемое оборудование, и способных принимать сигналы с различной модуляцией в различных полосах частот. Сегодня как в научных организациях, так и на промышленных предприятиях платформы программно управляемых радиоустройств уже реализованы и, согласно прогнозам, к 2012 году они будут широко использоваться в мобильных телефонах. Однако по-прежнему остается задача создания SDR-решений, способных обеспечить десятикратное увеличение как функциональной сложности, так и пропускной способности, требуемое новыми стандартами на многоантенные системы связи, работающие с несколькими несущими (например, стандартами IEEE 802.11n и 3GPP LTE). И сегодня, по мнению экспертов, возможно, единственная технология, которая позволит реализовывать реконфигурируемые радиоустройства с высокой степенью интеграции — это технология ВЧ МЭМС (технология вида «больше, чем Мур»<sup>\*</sup> для построения пассивных компонентов с помощью процессов, подобных используемым в полупроводниковой промышленности) (рис.1). К выполняемым по МЭМС-технологии ВЧ-компонентам, которые могут быть использованы в мобильных телефонах, относятся

<sup>\*</sup>Хейер Д., Пятенко А. Полупроводниковые технологии в Европе. Пути развития. — ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2010, №6, с.125.



**Рис. 1. Приемопередатчик 2,5G/3G многомодовой системы беспроводной связи, выполненной на основе фиксированных фильтров (а) и реконфигурируемый приемопередатчик 3G/Wi-Fi многомодовой системы на основе перестраиваемых фильтров (б)**

ключи, перестраиваемые пленочные приборы на объемных акустических волнах (FBAR) (рис.2), настраиваемые напряжением конденсаторы, резонаторы и фильтры.

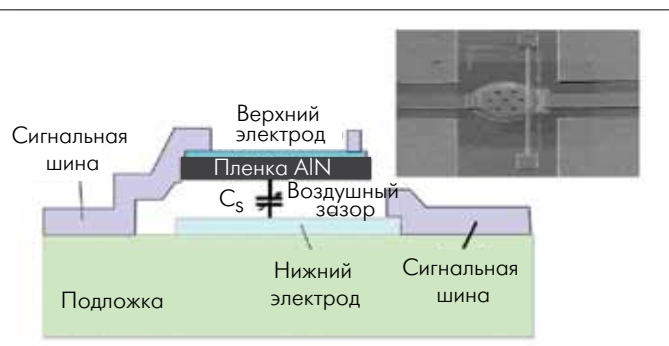
При этом ВЧ МЭМС-компоненты предназначены не столько для замены существующих приборов, сколько для интеграции с другими активными и пассивными компонентами в монолитной микросхеме и создания ВЧ-системы на кристалле (RF SoC) или для интеграции в гибридной схеме и создания ВЧ-системы в корпусе (RF SoP). Таким образом, ВЧ МЭМС-технология переходит с приборного уровня на системный [1].

МЭМС-технология, наряду с фотоникой и электроникой, лежит в основе перспективных исследовательских проектов, финансируемых отделом микросистемной технологии и другими отделами Управления перспективных исследований и разработок Министерства обороны США (DARPA). В 2007 году DARPA начало финансирование программы создания аналоговых спектральных процессоров (Analog Spectral Processors, ASP), которая должна была продемонстрировать возможность выполнения функций обработки сигнала в аналоговом домене (рис.3). В задачи программы входила разработка фильтров и ключей, необходимых для создания портативных программно

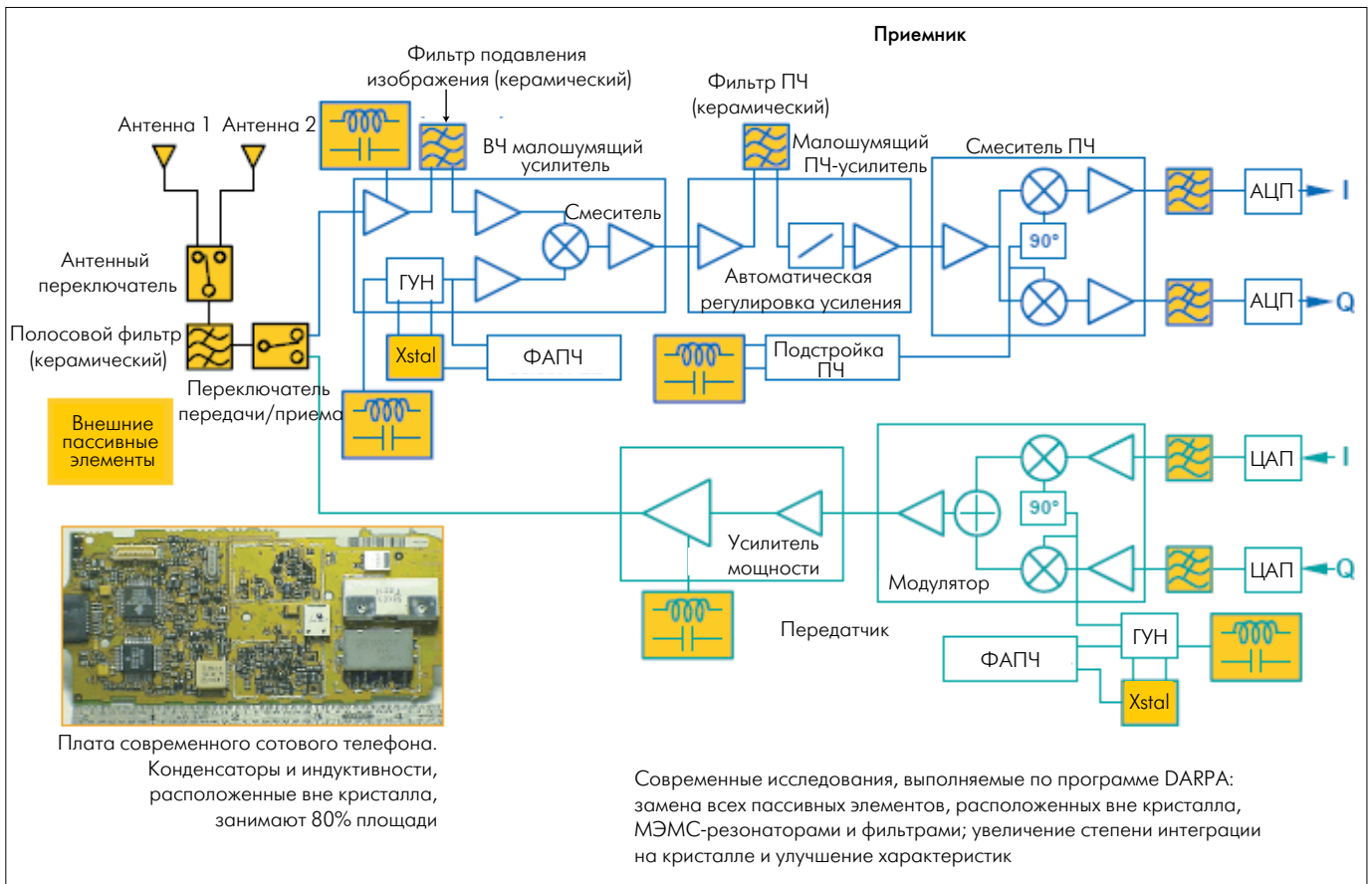
управляемых систем радиосвязи [2]. Конкретно, требовалось продемонстрировать ВЧ-приемник на диапазон 20 МГц–6 ГГц объемом менее 50 см<sup>3</sup> и с потребляемой мощностью менее 5 Вт. Приемник должен был содержать анализатор спектра и пять каналов приема сигнала, что потребовало совершенствования настраиваемых фильтров и блока фильтров, а также ВЧ матричных ключей. А это в свою очередь привело к включению в ASP программу проекта по применению МЭМС-технологии в разрабатываемых радиоприемных устройствах. Головной исполнитель программы ASP – компания Rockwell Collins, соисполнители – компании Teledyne Scientific, Innovative Micro Technology, Sanmina-SCI, компания-производитель МЭМС-устройств MEMS and Nanotechnology Exchange (MNX), Корнельский, Стенфордский университеты, Калифорнийский университет в Сан Диего и Университет Итаки (штат Нью-Йорк) [3].

Первая фаза программы, которая заканчивалась в 2007 году, предусматривала разработку базового фильтра и компонентов ключей, вторая фаза (конец 2008 года) – интеграцию компонентов в блоки фильтров, третья, последняя, фаза программы (конец 2009 года) – интеграцию блоков фильтров с активными компонентами для окончательной реализации устройства [4].

Идея создания приемного ВЧ-устройства в виде системы на кристалле на основе МЭМС-элементов реализована совместными усилиями недавно созданной компании-разработчика микросхем (fabless) WiSpry и одного из крупнейших производителей полупроводниковых приборов концерна IBM Microelectronics. Основное конкурентное достоинство компании WiSpry – МЭМС-технология, интегрируемая с КМОП-, SiGe- и GaAs-технологиями, используемыми в различных входных ВЧ-радиоприемных устройствах и обеспечивающая согласования полных сопротивлений с помощью матрицы переключаемых емкостных элементов. Благодаря быстрому переключению элементов матрицы и адаптации к изменениям частоты, внешним воздействиям на антенну (например, прикосания к ней пользователя) и другим приводящим рабочим условиям обеспечивается устойчивость канала связи к внешним возмущениям свыше 3 дБ. Тем самым предотвращается пропадание теле-



**Рис.2. Настраиваемый пленочный прибор на объемных акустических волнах (FBAR). Настройка частоты выполняется путем изменения воздушного зазора**



**Рис.3. Приемопередатчик с использованием ВЧ МЭМС резонаторов и фильтров, заменяющих пассивные компоненты**

фонных звонков и улучшается работа в реальном времени: дисплей воспроизводит большее число «полос».

Первые матрицы цифровых переключаемых емкостных элементов компании WiSpry были изготовлены в 2007 году на КМОП-пластинах диаметром 200 мм. Емкость небольших конденсаторов матрицы в ответ на приложенное напряжение, которое приводило к изменению расстояния между их обкладками, изменялась в десять раз – в интервале 0,1–1 пФ или 0,2–2 пФ с шагом 5 фФ. Это помимо улучшения настройки радиоприемника приводило к увеличению срока службы батареи сотового телефона на 10–20%.

Благодаря объединению усилий WiSpry и IBM Microelectronics менее чем за 18 месяцев удалось разработать процесс изготовления интегрированной ВЧ КМОП МЭМС-схемы, характеристики которой превосходили заданные заказчиком.

Приемные ВЧ-устройства компаний WiSpry/IBM будут изготавливаться по 180-нм технологии формирования МЭМС компании IBM. Они позволяют уменьшить габариты и стоимость телефонов, улучшить их характеристики и на 25% продлить как время работы в режиме разговора, так и время подключения к Интернету. Главная задача сотрудничества заключается в разработке для мобильных приборов полностью монолитного перестраиваемого приемного ВЧ МЭМС-устройства в виде системы на кристалле.

Сотрудничество рассчитано на 18 месяцев, результатом

его должно стать освоение во второй половине 2010 года массового производства МЭМС и КМОП-приборов, интегрированных в одном корпусе, [5].

Сразу вслед за объявлением о сотрудничестве с концерном IBM Microelectronics компания WiSpry была выбрана Фондом высокой технологии Дании для участия в программе создания входных каскадов интеллектуальных антенн (Smart Antenna Front End, SAFE). К участию в программе SAFE, рассчитанной на четыре года, привлечены также Аальборгский университет (Дания), специализирующаяся в области антенной технологии компания Molex Interconnect и крупный производитель микросхем Infineon Technologies. Цель программы, на которую планируется затратить 8 млн. долл., – создание перестраиваемых антенн и приемных ВЧ-устройств для следующего поколения мобильных телефонов и медиасистем. В ходе проведения программы для обеспечения динамической настройки интеллектуальных антенн компании Molex ноу-хау компании Infineon в области изготовления микросхем будет объединено с ВЧ МЭМС-технологией WiSpry.

Интеллектуальные динамические алгоритмы позволят программировать созданные в рамках программы SAFE многоэлементные антенные матрицы в соответствии с различными частотными диапазонами и рабочими условиями. При этом коммутируемая конденсаторная матрица компании WiSpry динамически настроит характеристики антенны, фильтров,





согласующих схем и усилителя мощности на максимальные значения. Как уже отмечалось, фирма WiSpry заключила соглашение с IBM Microelectronics по созданию для мобильных телефонов ВЧ приемного устройства в виде системы на кристалле с использованием МЭМС. Поскольку для интеграции ВЧ МЭМС с микросхемами Infineon будет использоваться методы изготовления настраиваемых ВЧ МЭМС концерна IBM, образцы первого поколения, созданные по проекту SAFE, будут выпущены на основе технологии концерна IBM [6].

Важнейший элемент программно управляемых радиоустановок – интеллектуальные (smart) антенны, известные также, как адаптивные антенные решетки, а теперь и как ММО-антенны. Классические смарт-антенны выполняются в виде антенных матриц различной конфигурации и управляются специализированным сигнальным процессором. Применение смарт-антенн в будущих беспроводных системах связи, по-видимому, позволит повысить эффективность использования спектра, оптимизировать качество технического обслуживания этих систем, снизить затраты на разворачивание новых беспроводных сетей, выполняемых по различным технологиям, и реализовать их прозрачную работу.

Впервые концепция создания перестраиваемых антенных систем на основе ВЧ МЭМС была предложена в 1998 году учеными факультета электротехники Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе. Эта идея вызвала большой интерес у многих исследователей, работы которых показали преимущество применения МЭМС-ключей вместо полевых транзисторов и р-и-п-диодов для настройки резонансной частоты микрополосковых патч-антенн в устройствах малой и средней мощности. Учеными Университета штата Иллинойс в Урбана-Шампейне эта концепция была реализована путем интеграции на одной подложке с антенной однополюсных на одно направление ВЧ MEMS-ключей (SPST) – RMSW100 компании Radant MEMS в монтируемых на поверхность корпусов. МЭМС-ключи позволяют изменять диаграмму направленности излучения микрополосковой квадратной спиральной антенны между продольной и поперечной в ширине полосы при неизменном импедансе.

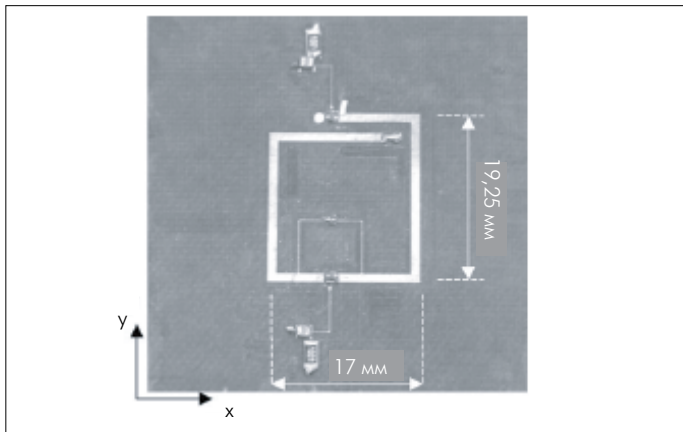
Группой исследователей Калифорнийского университета был создан вариант перестраиваемой прямоугольной спиральной антенны с набором МЭМС-ключей, размещенных на одной СВЧ-подложке печатной платы ( $\epsilon_r = 3,27$  и  $\tan\delta = 0,004$ ) и на кварцевой подложке ( $\epsilon_r = 3,78$  и  $\tan\delta = 0,0002$ ) [7]. Работа велась при поддержке DARPA и Национального научного фонда США. Спираль выполнена из многочисленных линий, соединенных друг с другом ВЧ МЭМС-ключами, расположенными вдоль спирали. При возбуждении ключей изменяется общая длина спирали и, соответственно, направление излучения. Излучение антенны на печатной плате имеет правую круговую поляризацию, антенны на кварцевой подложке – левую круговую поляризацию. Усиление обеих антенн составляет 3–6 дБи (децибел относительно изотроп-

ной антенны), их коэффициент эллиптичности удовлетворяет критерию 3 дБ на рабочей частоте 10 и 6 ГГц для антенн на печатной плате и кварцевой подложке, соответственно. По мнению разработчиков, это первая перестраиваемая печатная антенна с МЭМС активными элементами, выполненными совместно со структурой антенны на одной подложке с малыми потерями.

Существуют три основных вида адаптивных антенных систем: фазированные антенные решетки, адаптивные антенны с переключаемыми лучами и антенны с диаграммой направленности, изменяемой в соответствии с перемещением абонентских устройств. В последнем варианте антенн вклад МЭМС-технологии, обеспечивающей перестройку частоты в широком диапазоне, управление поляризацией и адаптивное согласование полного входного сопротивления, велик.

Учеными Технического университета в Клуз-Напока (Румыния) была предложена архитектура перестраиваемой антенной матрицы третьего типа. Матрица антенны длиной  $l$  и шириной  $W$  состоит из многочисленных металлических прямоугольных пикселей, так называемых pixel-patches, соединенных друг с другом МЭМС-переключателями. Питание поступает на антенну по диагональным осям (рис.4), что позволяет получать как вертикальную, так и горизонтальную поляризацию. Шлейфный адаптер питания может перестраиваться в два различных состояния, определяемых перестраиваемой геометрией МЭМС-переключателя. Матрица сконструирована для работы на двух частотах – 2,4 и 5 ГГц, которые выбираются путем переключения соответствующего МЭМС исполнительного механизма (актюатора) [8].

Эффекты дисперсии на краях матрицы с прямоугольными пикселями размером  $d_l \times d_l$  могут вызвать изменение ее длины на  $2\Delta l$  в соответствии с формулой  $l - idl = \lambda_{i0}/2\sqrt{\epsilon_{eff}}$ , где  $i = 0, N-1$ ,  $\lambda_{i0}$  – длина волны антенны в свободном пространстве и  $N$  – число прямоугольных пикселей вдоль оси  $X$ . Индекс  $i = 0$ , когда все пиксельные ячейки активны, и  $i = N-1$ , когда активированы пиксельные ячейки только одного столбца вдоль оси  $Y$ . Частота антенны равна  $f_{i0} = f_0 \cdot |l - idl|$ , где  $f_{i0}$  – резонансная частота антенны, когда все пиксельные ячейки активны и  $i = 0$ . Значение  $l$  устанавливается



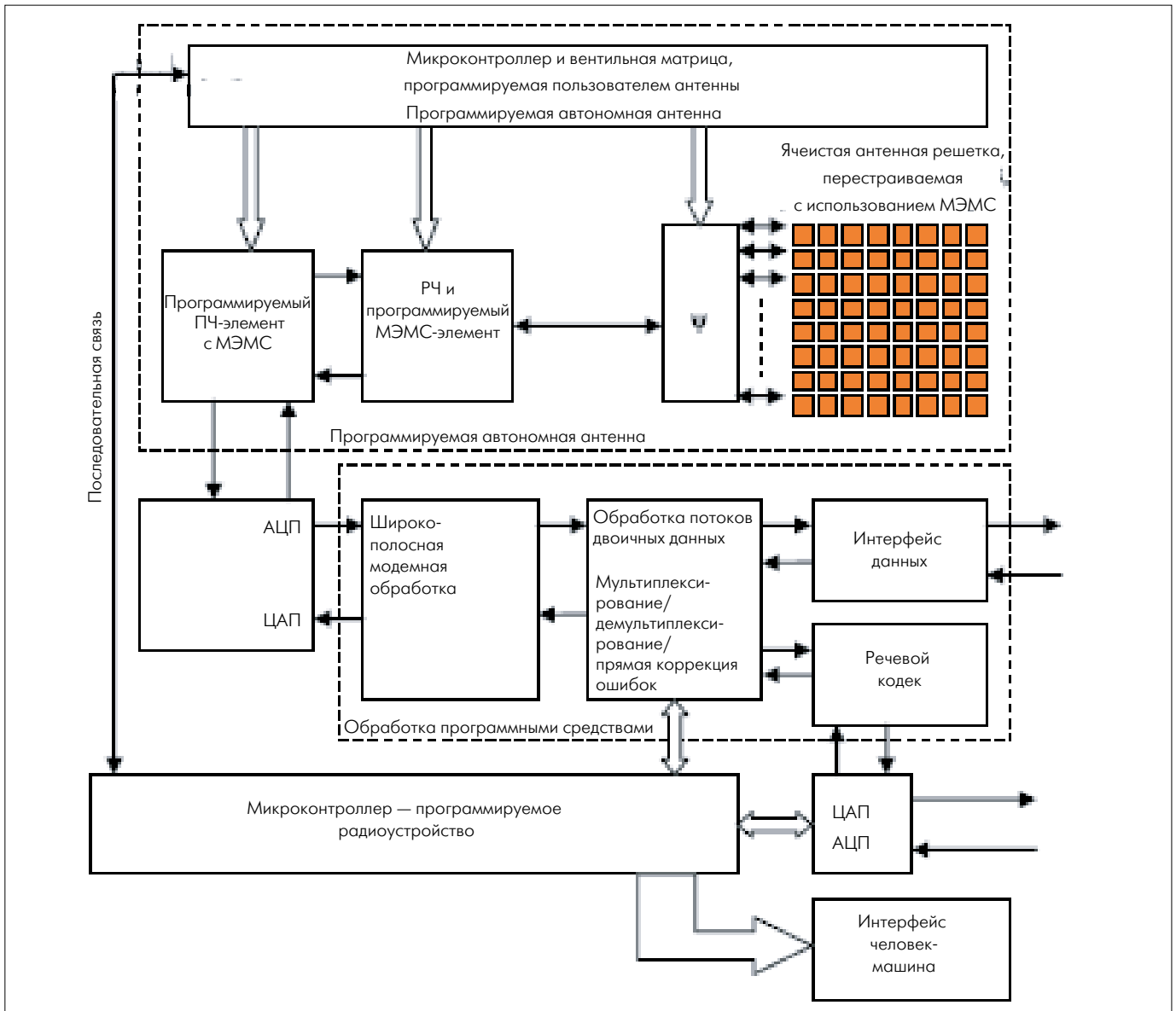
**Рис.4. Квадратная спиральная антенна с использованием ВЧ МЭМС-ключа компании Radant MEMS**

с помощью МЭМС-актюатора. Приняв во внимание, что  $l = NdI$ , получим значение резонансной частоты  $f_{i0} = (N/N-1) \cdot f_0$ . Это уравнение справедливо только тогда, когда расстояние между прямоугольными пикселями не меньше четверти

длины волны  $\lambda_{\text{pix-pad}}/4$ , на которую настроены пиксели. Чем меньше размер пикселей, тем выше частота.

С целью развития концепции программно управляемого радиоустройства учеными университета в Клуж-Напока была создана архитектура, совмещающая на единой платформе программно управляемое радиоустройство и программируемую автономную антенну (рис.5). В классической системе связи для каждой антенны требуются свои маломощный усилитель, смеситель, АЦП, устройство синхронизации несущей и символов. Ожидается, что антенна будущих программно управляемых радиоустройств будет автономной, программируемой и, в конечном счете, когнитивной.

«Автономная» означает, что антенна имеет независимую аппаратную структуру, содержащую ВЧ-каскад, смеситель и цифровой синтезатор частоты. «Программируемая» означает, что все свойства, функции и режимы работы антенны задаются и перестраиваются программными средствами. Такой прибор фактически будет гибридным и содержать устройства, выполненные



**Рис.5. Архитектура, совмещающая программируемое радиоустройство и программируемую автономную антенну**



по различным технологиям, – микрополосковые линии, МЭМС и НЭМС, элементы нанотехнологии и молекулярной электроники. Это, в конечном счете, приведет к реализации когнитивных механизмов радиоустройства, т.е. к возможности их обучения, выполнения умозаключений и принятию в итоге решений.

Концепция программно управляемого радиоустройства предусматривает управление высокой частотой (ВЧ-усилителя, понижающего преобразователя) и промежуточной частотой (усилителя промежуточной частоты). Развитие нанотехнологий позволит управлять матрицей перестраиваемой МЭМС-антенны (смарт-антенны), содержащей фазовращатель. А передача информации о требуемой конфигурации осуществляется последовательной шиной в стандарте UMTS, CDMA2000, 802.1e или 802.20.

Предлагаемая архитектура позволит радиоустройству адаптироваться к различным интерфейсам (стандартам) благодаря программной перестройке. Это приведет к усилению роли комплексных программных средств микроконтроллера, поддерживающих операции кодирования, модуляции и обеспечивающих многообразие связи. Неопределенная скорость обработки новых концепций может повлиять на системные характеристики.

Тем не менее, реализация перестраиваемого программно обеспечения, позволяющая сравнивать процессы реального времени с другими программными процессами, сможет преодолеть упомянутую проблему. Например, перестраиваемая автономная антенна независимо управляет ВЧ- и ПЧ-приборами. Таким образом, можно избежать перегрузки основной платформы программируемого радиоустройства за счет отсоединения антенны, что уменьшает потери ВЧ-мощности.

Интерес представляет и разработанная учеными Технологического университета штата Джорджия при поддержке НАСА ВЧ-система фазированной антенной решетки в корпусе, содержащую 2×2 матрицу патч-антенны, ВЧ МЭМС-фазовращатели и монолитную микросхему малошумящего усилителя, выполненные на органической подложке [9]. Для распределения сигнала по сети питания антенной матрицы используются Т-образные соединители с функциями согласования полного сопротивления. На подложке изготовлена пара 1-бит ВЧ МЭМС-фазовращателей. В качестве материала органической подложки использовался жидкокристаллический полимер (Liquid Crystal Polymer, LCP), что объясняется желанием создать антенную систему, которую можно хранить свернутой до применения. К тому же, LCP – дешевый гибкий материал с малыми диэлектрическими потерями на частотах вплоть до 100 ГГц. Чтобы показать возможность применения LCP-подложек для изготовления перестраиваемых антенных решеток, были рассмотрены два типа систем в корпусе – однослойная и многослойная. Достоинства однослойной структуры – относительно низкая стоимость, простота изготовления и ремонта системы, поскольку видны все ее компоненты. Однако поскольку шины ВЧ-сигнала и смещения на постоянном токе не должны пересекаться, размеры такой антенны достаточно велики, и по мере увели-

чения функциональности, а, следовательно, и размеров, такие антенны очевидно будут находить ограниченное применение. Многослойную структуру труднее разработать и изготовить. Вследствие излучения требуемых вертикальных соединений ее потери могут быть выше, чем у однослойной структуры. К тому же, ремонт ее невозможен. Но размеры такой антенны малы, за счет увеличения толщины при неизменной площади основания возможно увеличение ее функциональности.

Антенные решетки обеих структур характеризовались малыми потерями и обеспечивали управление положением диаграммы направленности антенны в пределах 12°. Рабочая частота антенны составляла 14 ГГц, измеренное значение потерь на отражение – превышало 12 дБ. По требованию заказчика возможно изготовление антенн любого размера, на любую частоту и с любыми параметрами.

Гибкая фазированная решетка была разработана при поддержке НАСА и предназначена для применения в природоресурсном ИСЗ. Утверждается, что это первая в мире гибкая система ФАР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tilmans H. A.C. RF-MEMS: An enabling technology for reconfigurable radio front-ends.
2. Tang W.C. MEMS Programs at DARPA.
3. DARPA, Rockwell Collins eye MEMS to help revolutionize radio technology. Military & Aerospace Electronics, Dec., 2006.
4. Raman S. Analog spectral processors (ASP). [www.darpa.mil/mto/programs/asp](http://www.darpa.mil/mto/programs/asp)
5. Johnson R.C. IBM, WiSpry teamed on tunable RF MEMS. [www.eetimes.com/electronics-news/4200792](http://www.eetimes.com/electronics-news/4200792).
6. Johnson R.C. WiSpry to supply MEMS process for Infineon. EE Times Europe, July 12, 2010.
7. Febo R.A. Design, Fabrication and characterization of a RF MEMS based reconfigurable antenna.
8. Crisan N., Cremene L.C. The Impact of Novel RF MEMS and SDCs on Smart Antenna Technologies.– The Fourth International Conference on Wireless and Mobile Communications, July 27–Aug. 1 2008, p.370–375.
9. Kingly N., Ponchak E., Papapolymerou J. Reconfigurable RF MEMS phased Array Antenna Integrated Within a Liquid Crystal Polymer (LCP) System-on-Package.– [www.aurigami-crowave.com/docs/Kingsley\\_SOP\\_4x2.pdf](http://www.aurigami-crowave.com/docs/Kingsley_SOP_4x2.pdf).