

УДК 621.396.67

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ И МАТЕРИАЛОВ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

К.т.н. Д.С. Гавва<sup>1</sup>, к.т.н. Д.В. Грецких<sup>1</sup>, к.т.н. А.В. Гомозов<sup>2</sup>, Д.В. Пунин<sup>1</sup>

1. Харьковский национальный университет радиоэлектроники

2. Сертификационный центр ракетно-космической техники Харьковского представительства генерального заказчика - Государственного космического агентства Украины, г. Харьков

*В статье представлен обзор устройств различного назначения, построенных по принципу объединения электродинамической структуры с радиоэлементами и/или материалами с нелинейными характеристиками. В данном обзоре рассмотрены такие электродинамические устройства (ЭДУ) как реконфигурируемые антенны и метаматериалы, устройства функциональной электроники, частотоизбирательные материалы.*

*В статті наведено огляд пристроїв різного призначення, побудованих за принципом об'єднання електродинамічної структури з радіоелементами та/або матеріалами з нелінійними характеристиками. У цій частині огляду розглянуті такі електродинамічні пристрої як реконфігуровані антени та метаматеріали, пристрої функціональної електроніки, частотоселективні матеріали.*

*The article presented the review of devices for various purposes, built on the principle of combining the electrodynamic structure with radioelements and/or materials with nonlinear characteristics. In this review, such electrodynamic devices as reconfigurable antennas and metamaterials, devices of functional electronics, frequency-selective materials are considered.*

**Ключевые слова:** электродинамические устройства, нелинейные элементы, реконфигурируемая антенна, функциональная электроника, метаматериалы

## Введение

Характеристики радиотехнических систем (РТС) различного назначения в значительной степени определяются характеристиками входящих в их состав ЭДУ: антенн, фильтров, фазовращателей, линий задержки, мостов и т.п. Вместе с общим развитием РТС и применяемых в них радиотехнологий меняются и эти устройства. Для улучшения и/или изменения характеристик, расширения функциональных возможностей, в структуру ЭДУ включают различные полупроводниковые или электромеханические радиоэлементы с нелинейными характеристиками, применяют материалы с нелинейными свойствами (МНС) или материалы с нелинейным поверхностным импедансом (сегнетоэлектрики, ферриты, высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) и т.д.).

Такой подход, по сути, дает не только новое устройство, а и требует переосмысления и развития классических методов проектирования/анализа ЭДУ, проведения исследований для раскрытия потенциальных

возможностей, положительных и отрицательных для устройств свойств. Связано это с тем, что нелинейные элементы (НЭ) и МНС в составе ЭДУ превращают их из линейных устройств в нелинейные. В результате чего, при определенных режимах работы, свойствах применяемой нелинейности, внешних воздействиях и других факторах возможны проявления различных нелинейных эффектов, например, интермодуляционных искажений сигнала, динамического хаоса и т.д.

В данной обзорной статье поставлена задача показать существование большого многообразия ЭДУ с НЭ и/или МНС, несколько систематизировать их, провести краткий обзор конструкций, рассмотреть характеристики, особенности и области применения некоторых из наиболее интересных на взгляд авторов представителей данных устройств, а также описать основные нелинейные эффекты, которые могут возникнуть в рассматриваемых ЭДУ.

## Классификация ЭДУ с НЭ и/или МНС

На рис. 1 представлена классификационная диаграмма ЭДУ с НЭ и/или МНС. В ней деление ЭДУ на группы является одним из множества возможных и, в связи с появлением новых классов устройств, вполне может быть дополнена или видоизменена. Тем не менее, данное группирование устройств позволяет систематизировать рассмотрение ЭДУ с НЭ и/или МНС.

В общем случае все ЭДУ можно разделить на две группы – потенциально-нелинейные и функционально-нелинейные. Первые проявляют нелинейные свойства при определенных режимах работы, внешних воздействиях и существенно зависят от параметров НЭ и МНС, которые применяются в их составе. Функционирование вторых же изначально построено на использовании нелинейных свойств радиоэлементов, за счет чего в ЭДУ и происходит необходимая обработка сигнала (усиление, выпрямление, умножение и т.п.). При этом ЭДУ могут строиться как на соединении электродинамической структуры с отдельными сосредоточенным НЭ так и группой НЭ. В последнем случае зачастую число НЭ на длину волны таково, что можно говорить о квазираспределенных НЭ (квазираспределенном нелинейном поверхностном импедансе), когда ЭДУ приобретает свойства характерные для устройства, выполненного на основе материалов с НПИ, например, ВТСП.



Рис. 1. Классификация электродинамических устройств

Далее рассмотрим некоторые группы устройств из приведенной на рис. 1 диаграммы.

**Реконфигурируемые антенны**

Антенны являются необходимыми и важнейшими компонентами в различных РТС. В результате чего, за последние десятилетия развития получили широкое распространение множество типов антенн – дипольные, микрополосковые, диэлектрические, зеркальные и др. Каждый тип антенн обладает присущими им характеристиками и особенностями, которые делают их более или менее пригодными для конкретных применений. И каждый раз с появлением новых РТС, используя теоретические знания и общие рекомендации по проектированию, в качестве отправной точки для разработки новых антенн инженеры меняют и адаптируют эти базовые антенны. При этом выбор антенны из определенного семейства антенн, накладывает ограничения на возможности и общую производительность системы, что обусловлено фиксированными характеристиками антенны.

Современный же подход в проектировании РТС зачастую требует расширения решаемых задач от антенно-фидерного тракта. Применение **реконфигурируемых антенн** (РА), способных в общем случае обеспечить адаптацию к изменению системных требований и условий окружающей среды, снизить массогабаритные параметры системы, может смягчить или устранить эти ограничения, обеспечить дополнительные степени свободы и функциональность для любой системы.

Если под РА понимать устройство, в состав которого входят излучающая структура (ИС) и сосредоточенные управляющие НЭ, позволяющие изменять распределение тока в ИС и, как результат, характеристики антенны, то РА можно классифицировать по следующим признакам:

– по типу управляемого параметра: с изменяемой характеристикой направленности, с изменяемым рабочим диапазоном частот, с изменяемым

входным импедансом, с управляемыми поляризационными характеристиками;

– по типу управляющего коммутатора: механического типа (MEMS-переключатели), электрического типа (транзисторы, диоды, фоторезистивные элементы), термoperеключатели;

– по виду управления: с непрерывным и дискретным управлением;

– по способу реконфигурации: электрические, оптические, механические и материальные изменения.

Многие антенны, такие как диполи, рамочные, щелевые или микрополосковые антенны обычно работают в режиме резонанса. При этом электрические размеры антенны в значительной степени определяют рабочую частоту (полосу) и распределение тока в ИС антенны, что в свою очередь определяет диаграмму направленности (ДН) антенны. Направление же протекания тока по ИС антенны определяет ее поляризационные свойства. Например, для линейного диполя, первый резонанс возникает на частоте, где антенна имеет длину порядка половины рабочей длины волны. При необходимости работать на более высокой частоте, диполь может быть укорочен до нужной длины, соответствующей половине длины волны для новой частоты. Новая ДН излучения будет иметь практически ту же форму, что и до укорочения, так как распределение тока в ИС по отношению к длине волны окажется тем же. Таким образом, реконфигурация антенны может быть достигнута путем намеренного перераспределения токов в ИС антенны. Эти изменения происходят за счет применения разных механизмов, таких как переключение отдельных частей ИС, модификация структуры и др. Для организации непрерывной перестройки антенны используют переменную реактивную нагрузку (варикапы или варакторы), изменяющие, например, эффективную длину антенны.

Отметим, что одной из областей применения РА являются беспроводные технологии передачи данных (WiFi, WiMax, 3G, 4G, Bluetooth, GPS, UWB, TV-DVB и др.) [1]. Передача информации от портативных устройства к базовой станции или другой точке доступа является самым слабым звеном двунаправленной линии связи из-за ограничений мощности, размеров и стоимости, налагаемых на систему требованием портативности. Кроме того, портативные устройства, как правило, функционируют в сложной электромагнитной обстановке.

Реконфигурирование ИС антенны в такой ситуации может обеспечить целый ряд преимуществ. Например, возможность перестройки по частоте, возможность пространственной фильтрации помех, подстройки антенны под новые параметры рабочей среды. Если может быть изменена форма ДН антенны, то ее максимум может быть установлен в направлении источника сигнала, что позволит уменьшить энергию передаваемого сигнала и как следствие сэкономить энергию аккумулятора портативного устройства. Помимо этого применение РА предоставляет возможность существенного увеличения емкости сети связи, снижения межканальной интерференции, борьбы с замираниями сигналов, использования в мобильной радиосистеме одной-двух РА для работы множества стандартов передачи данных. Последняя концепция так называемой

multi-radio mobile platforms (MRMP) представлена на рис. 2.

Система состоит из трех РА встроенных в крышку ноутбука. РА разработаны таким образом, чтобы поддерживать все частотные диапазоны модулей WLAN и WWAN в ноутбуке. Логическая схема динамически управляет подключением радиочастотных портов РА к необходимому модулю беспроводной передачи данных. В свою очередь эта схема и процесс реконфигурации РА управляется микроконтроллером. При этом для интеллектуального выбора частотного поддиапазона программное управление имеет доступ к такой информации как текущий радиодиапазон и уровень принимаемого сигнала. Также, программное обеспечение системного управления использует логику разнесенного приема для оптимального выбора антенны с точки зрения минимума помех и максимума уровня принимаемого сигнала. Следует отметить, что уже реализована система WiFi 3×3 MIMO [1].

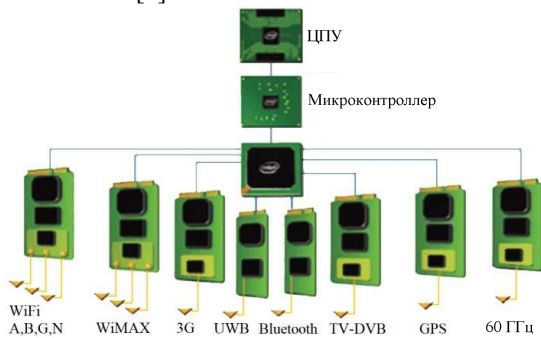


Рис. 2. Вариант построения системы из трех реконфигурируемых антенн на основе концепции multi-radio mobile platforms

Тем не менее, авторы разработки обращают внимание, на то, что при реализации представленной концепции существуют определенные проблемы, связанные с относительно высоким потреблением энергии элементами коммутации, логической схемой управления, что не приемлемо для мобильных систем. А путем решения данных проблем считают применение коммутаторов нового поколения, например, МЭМС, слияние в одном устройстве большого числа радиомодулей различных стандартов и реализация такого устройства в одном интегральном модуле.

В качестве примера РА мобильных платформ связи на рис. 3. представлена частотно-реконфигурируемая антенна [2]. Относительно большой размер антенны и ограниченная полоса частот являются двумя из основных сдерживающих факторов препятствующих внедрению частотно-реконфигурируемых патч-антенн в MRMP. Авторами работы [2] как один из вариантов решения этой проблемы предложено использовать принцип коммутации U-образных патчей вложенных друг в друга (рис. 3а). Такая структура имеет множество резонансных частот, значения которых определяются размерами патчей и щелей между ними. Для уменьшения габаритов антенны на 50% применена вертикальная заземляющая поверхность вдоль горизонтальной оси антенны X. Используя же симметрию полученной структуры относительно вертикальной оси симметрии Y, размеры были уменьшены еще на 50% (рис. 3б). В итоге антенна стала представлять собой массив L-образных патчей с общей точкой возбуждения и может быть легко

модифицирована для работы на различных частотах путем размещения множества переключателей между L-образными патчами. Активируя необходимые коммутаторы (рис. 3б) антенна может использоваться для четырех групп полос, что видно из частотной характеристики обратных потерь приведенной на рис. 3в. При этом авторы отмечают, что при такой конструкции антенны увеличение количества коммутаторов затруднено из-за возрастающей сложности реализации цепей управления коммутаторами и выходов из строя самих коммутаторов.

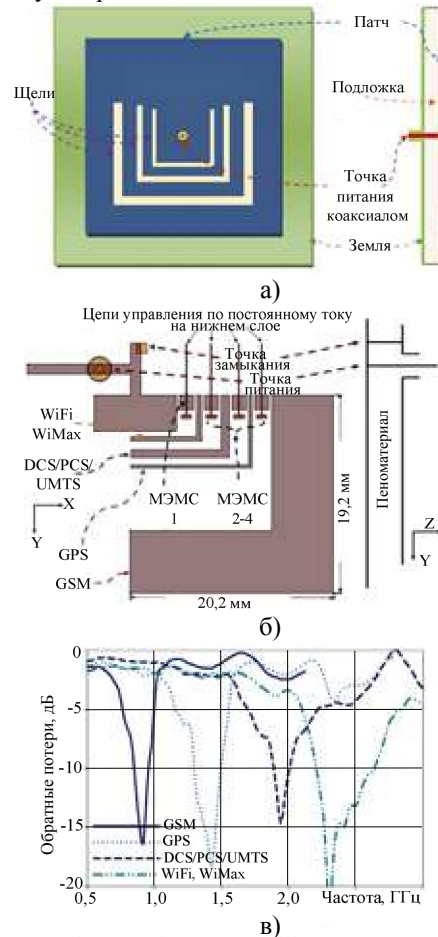


Рис. 3. Частотно-реконфигурируемая антенна для мобильных платформ связи

В [3, 4] на основе фотопроводящих переключателей реализована «оптическая» реконфигурация антенн. Переключатели, встроенные в ИС, становятся проводящими после того, как они подвергаются воздействию лазерного луча создаваемого интегрированными в антенну лазерными диодами [5]. Один из примеров подобных антенн изображен на рис. 4. Антенна представляет собой внешний кольцевой и внутренний круговой патчи. Структуры разделены 1-миллиметровым зазором. Для перестройки антенны, в ее ИС встроены два кремниевых переключателя соединяющих кольцо и круг. Коммутация происходит при освещении переключателей лучом лазерного диода, подводимого при помощи оптического волокна прикрепленного к подложке со стороны заземляющей поверхности и через отверстия в подложке антенны находящиеся под переключателем [6]. Частотная характеристика обратных потерь антенны при различных уровнях облучения также представлена на рис. 4.

Основной проблемой при реализации таких РА является проблема интеграции систем управления, электропитания и излучения.

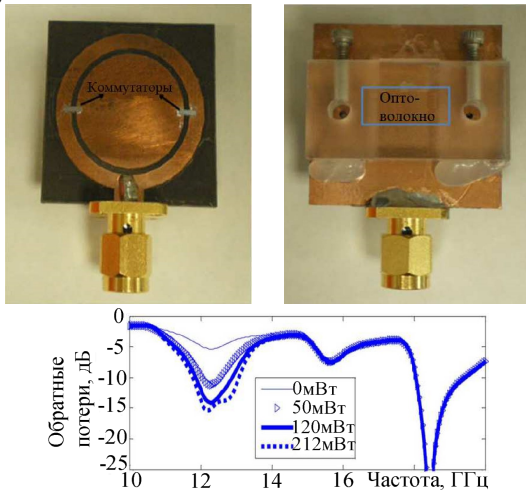


Рис. 4. Антенна на основе фотопроводящих переключателей и ее частотная характеристика обратных потерь антенны при различных уровнях облучения

Помимо «классического» подхода, когда антенна проектируется общеизвестными методами, а дополнительные функциональные возможности достигаются за счет перестройки полученной ИС (например, изменением периметра рамочной антенны, длины вибратора, точки питания или земли в RIFA антенне и т.д.), существует «пиксельный» подход построения РА. В этом случае ИС состоит из массива субволновых излучателей соединенных между собой электронными или электромеханическими переключателями. Переключением коммутаторов создается желаемая топология антенны. При этом количество переключателей, используемых для создания нужной апертуры, может достигать несколько сотен или даже тысяч.

Пример реализации такого подхода приведен на рис. 5 [7]. Антенна представляет собой массив (120 шт.) электрических малых квадратных излучателей расположенных на тонкой диэлектрической подложке (материал FR-4 толщиной 1,7 мм) размером 22,5×22 см<sup>2</sup>. Расстояние между патчами равно его ширине, то есть 1 см, а сама диэлектрическая подложка с патчами находится над металлическим экраном на расстоянии 6 см. Расстояние между подложкой и экраном заполнено материалом, имеющим сотовую структуру, изготовленную с использованием стереолитографии и Vantico SL7510 (материал, заполненный на 83% воздухом). Экран делает антенну излучающей в одной полусфере и изолирует схему управления от излучающей части антенны. При необходимости каждый патч соединяется с соседним патчем при помощи коммутатора выполненного на основе полевого транзистора с оптическим управлением. Схематический чертеж, показывающий компоновку основных элементов антенны и схему управления коммутатора представлены на рис. 5а,б. Число коммутаторов в антенне равно 208. Питание антенны производится в одной точке в центре конструкции. Рабочая частота 1,25 ГГц.

При проектировании антенны для получения

максимального коэффициента усиления в заданной рабочей полосе частот использовался метод конечно-разностных временных областей (FDTD), который совместно с генетическим алгоритмом определял необходимое состояние коммутаторов для получения требуемой электрической конфигурации антенны. Конфигурации коммутаторов сохранялись в памяти системы управления и применялись по мере необходимости. Используемый алгоритм выбора топологии электрического соединения патчей помимо требуемого коэффициента усиления также учитывал возможность компенсации рассеяния электромагнитной волны от свободных, не соединенных патчей, а также необходимость согласования антенны с питающим фидером.

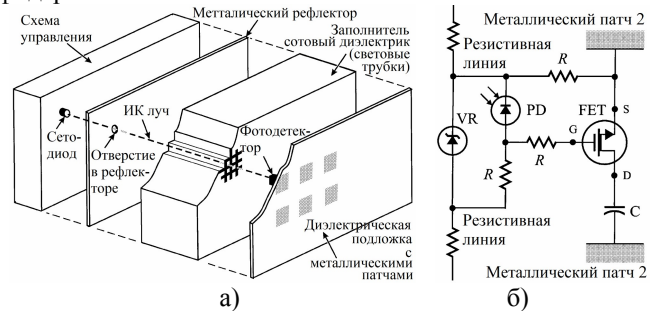


Рис. 5. Вариант построения реконфигурируемой антенны на основе «пиксельного» подхода

На рис. 6 приведены некоторые варианты топологии антенны (справа) и ее соответствующие теоретические и экспериментальные ДН (слева) в горизонтальной плоскости. На рисунке электрические соединения патчей отмечены стрелками. При этом конфигурация соединений во втором случае была выбрана таковой, что направление главного лепестка ДН отклонено от первоначального положения на 45°. Пример показывает возможность управления путем изменения конфигурации РА не только коэффициентом усиления антенны, а и формой ДН (положением главного лепестка ДН).

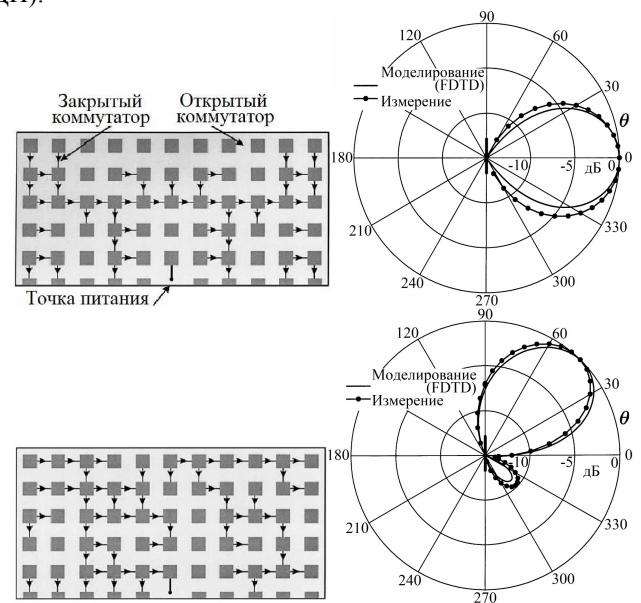


Рис. 6. Варианты топологии антенны и их теоретические и экспериментальные диаграммы направленности в горизонтальной плоскости



Авторы конструкции антенны [7] отмечают, что существует определенное различие в измеренных и промоделированных характеристиках антенны обусловленное не идеальным согласованием антенны с питающим фидером (не более 20% или 0,7 дБ), наличием потерь в цепях управления и элементах коммутации патчей РА (37% или 2дБ) и т.д. (потери энергии в подложке незначительны). А полученные частотные зависимости коэффициента усиления показали, что они, для случая анализа РА с учетом реальных коммутаторов и замены замкнутых коммутаторов на проводники «без потерь», существенно отличаются как по уровню, так и по частотному поведению. Это говорит о необходимости разработки и применения на стадии проектирования адекватных математических моделей ЭДУ с учетом использования в них НЭ и/или МНС.

Таким образом, несмотря на то, что «пиксельная» концепция построения РА предоставляет интересные возможности в реализации различных антенн, существует и ряд особенностей, которые сдерживают массовое создание таких антенн [7, 8]. К ним можно отнести: сложность реализации в антенне большого числа цепей смещения коммутаторов; большое число, плотность расположения и емкость переключателей могут ухудшить работу антенны; в общем случае широкополосная конфигурация ИС обеспечивает меньшее усиление, чем узкополосная, поскольку широкополосная конфигурация задействует меньшее число эффективных излучателей в апертуре имеющей фиксированный физический размер; большое количество коммутаторов с нелинейными характеристиками существенно повышает вероятность возникновения нелинейных эффектов в антенне и т.д.

Необходимо упомянуть также и о том, что при проектировании РА важно определиться с типом элементов, обеспечивающих реконфигурацию/перестройку антенны, так как они в значительной степени влияют на характеристики антенны. В качестве элементов управления РА можно применять различные полупроводниковые и электромеханические радиоэлементы: р-і-п диоды, транзисторы, GaAs интегральные схемы, фоторезистивные приборы, МЭМС-переключатели и др. Например, при необходимости быстрой коммутации ИС при помощи постоянного тока целесообразно применять р-і-п диоды [9], при необходимости достичь высокой развязки элементов ИС при малом потреблении по цепям управления - применять MEMS [10]. МЭМС-технология в настоящее время является передовой и перспективной технологией производства устройств СВЧ диапазона волн. Современные требования снижения массогабаритные показатели СВЧ-устройств, расширения их динамического диапазона, уменьшения потребляемой мощности и стоимости, наращивания их интеграции и функциональных возможностей при росте рабочих частот привели к широкому внедрению МЭМС-переключателей в различные радиоустройства, в том числе и РА [11 - 13], предлагая при этом малые вносимые потери, высокую развязку в разомкнутом состоянии и высокую линейность. Сравнительный анализ усредненных параметров МЭМС и полупроводниковых

переключателей показывает [14, 15], что первые заметно превосходят последние по максимальному значению рабочей частоты, коэффициенту перекрытия по емкости. При этом МЭМС-переключатели уступают полупроводниковым ключам по максимальной коммутируемой мощности, размерам и по времени срабатывания. МЭМС имеют высокие напряжения управления, составляющее иногда десятки вольт. Причем чем ниже управляющее напряжение, тем больше время срабатывания. Получить необходимое напряжение для стационарной аппаратуры не проблема, но для мобильной может потребоваться DC/DC-преобразователь, потребляющий дополнительно 50 - 200 мкВт. В результате обеспечиваемых МЭМС параметров может быть недостаточно для некоторых применений [9]. Тем не менее, их быстродействие на два - три порядка выше, чем у традиционных электромеханических реле.

Продолжая рассмотрение реконфигурируемых антенн заметим, что пожалуй одним из наиболее эффективных и распространенных методов для управления ДН независимо от рабочей частоты антенны является изменение связи между близко расположенными управляемыми излучателями/рассеивателями антенны. Этот метод обладает рядом привлекательных качеств: возможность экранирования излучающего элемента; потенциально широкая рабочая полоса у антенны; осуществимость реализации различных конструкций антенны и расширения ее функциональных возможностей. Еще, в 1978 году Харрингтон предложил антенную решетку в виде управляемого диполя с размещенными вокруг него рефлекторами [16]. Управляя реактивным сопротивлением нагрузок каждого рефлектора можно управлять амплитудно-фазовым распределением в антенне и, соответственно, управлять ДН. В последующие годы был предложен целый ряд различных РА с подобной коммутацией реактивно нагруженных элементов, обеспечивающих широкий спектр функциональных возможностей. Одна из таких реализаций РА в микрополосковом исполнении приведена на рис. 7 [17]. Ее перестройка осуществляется за счет изменения длины рефлекторов электронными переключателями. В статье авторы приводят измеренные и промоделированные ДН антенны на их рабочей частоте 3.75 ГГц и для трех режимов работы: RD, DD и DR (R - рефлектор, D - директор, а сочетание букв обозначает определенную управляемую связь между элементами антенны).

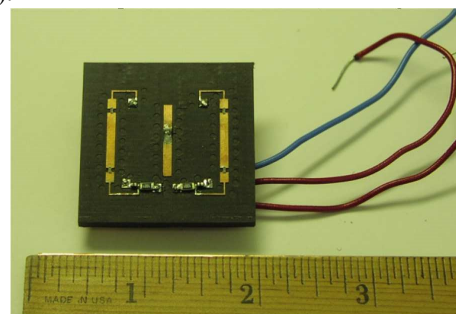


Рис. 7. Реализация реконфигурируемой антенны в микрополосковом исполнении

Рассмотренные выше механизмы управления характеристиками РА являются основными и наиболее распространенными, однако помимо них можно встретить еще ряд «специфических», не использующих сосредоточенные коммутирующие НЭ. Например, механические, не электрические изменения в конструкции антенны могут в ряде случаев обеспечить непрерывные изменения характеристик антенны в больших пределах. В качестве примеров механической реконфигурации можно привести антенны, описанные в работах [18 – 20]. В них использовалась пьезоэлектрическая система исполнительных механизмов для изменения расстояния между микрополосковой антенной и «паразитными» излучателями для изменения рабочей частоты антенны. При этом контролируемое смещение излучателей позволило увеличивать полосу пропускания с 1 до 9%. Реализация таких антенн иллюстрирует еще и трудность в достижении изменения одного параметра антенны независимо от другого. В данном случае при изменении полосы пропускания менялся коэффициент усиления антенны. Другой пример механически перестраиваемой антенны, хотя и не относящийся к методам применяющим НЭ или МНС, можно увидеть в работах [10, 21], где перестройка антенны осуществляется двумя исполнительными механизмами управляемыми микроконтроллером Arduino. Под его управлением происходит перемещение и наклон плоскости заземления излучающего участка антенны. Антенная же структура состоит из микрополоскового питающего патча, двух фиксированных и одного подвижного экранов. Трудность в миниатюризации, медленная скорость перестройки, высокие требования к управляющему напряжению и небольшие возможности реконфигурации являются основными недостатками механического способа реконфигурации антенны.

Еще один «специфический» подход перестройки антенны - влияние на распределение тока или скорость распространения волны в ИС путем изменения характеристик материала конструкции антенны (диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика или феррита) статическим электрическим/магнитным полем [22]. В последнем случае помимо сложностей, возникающих с необходимостью реализации механизма перестройки, возникают сложности применения сегнетоэлектриков и ферритов, так как они обладают высокой проводимостью по сравнению с другими материалами, используемыми в качестве подложки антенны. Это может серьезно ухудшить КПД антенны [8]. Одним из примеров таких антенн является микрополосковая антенна на ферритовой подложке [22]. Управляя приложенным к подложке магнитным полем, удалось реализовать 40 % непрерывную перестройку по частоте в относительной полосе частот. При этом остались не удовлетворительными характеристики излучения. Уровни кросс-поляризации были значительно выше, чем ожидалось от традиционной прямоугольной микрополосковой антенны. Специалисты также отмечают трудности практического применения подобных антенн из-за различных проблем: технологических проблем в создании однородного материала сегнетоэлектрической/

ферритовой подложки; проблем с возникновением в подложке полей высших типов; проблем с неравномерным распределением управляющего характеристиками антенны поля и т.д.

К рассмотренному подходу перестройки антенны можно отнести использование в РА таких специфических материалов как графены [23] и жидкие кристаллы (ЖК) [24]. Фактически ЖК являются нелинейным материалом, диэлектрическую проницаемость которого, а по сути ориентацию молекул в материале, можно изменить прикладывая напряжение смещения постоянного тока в диапазоне от 0 до 10 В. При этом в общем случае диэлектрическая проницаемость может изменяться на 30%. Как один из конструктивно простейших примеров, в [24] представлена микрополосковая патч-антенна, работающая в 5 ГГц диапазоне и перестраиваемая за счет изменения свойств ЖК расположенных под патчем размером 20 на 15 мм. В качестве подложки использовался материал Taconic TLY-5 толщиной 0,51 мм с  $\epsilon_r=2,2$ . Прикладывая между патчем и землей различное напряжение смещения было получено изменение диэлектрической проницаемости структуры, и как следствие перестройку характеристик антенны (рис. 8).

Измерения показали, что диапазон перестройки составляет 4%: антенна перестраивалась с 5,66 до 5,43 ГГц соответственно при изменении напряжения смещения от 0 до 10 В. Обратные потери были максимальными на нижней частоте и составили -18 дБм. Ключевой проблемой антенны стал КПД, так как при перестройке антенны изменялся тангенс диэлектрических потерь в пределах 0,02 - 0,12. На рис. 8 отображены ДН в Е-плоскости для аналогичной антенны без жидких кристаллов (сплошная линия) и с ЖК (для разных напряжений смещения). Хотя форма ДН остается примерно одинаковой, усиление антенны значительно возрастает по мере увеличения напряжения смещения и уменьшения тангенса потерь. Различное напряжение смещения также приводит к изменению КПД антенны с 40 до 20%.

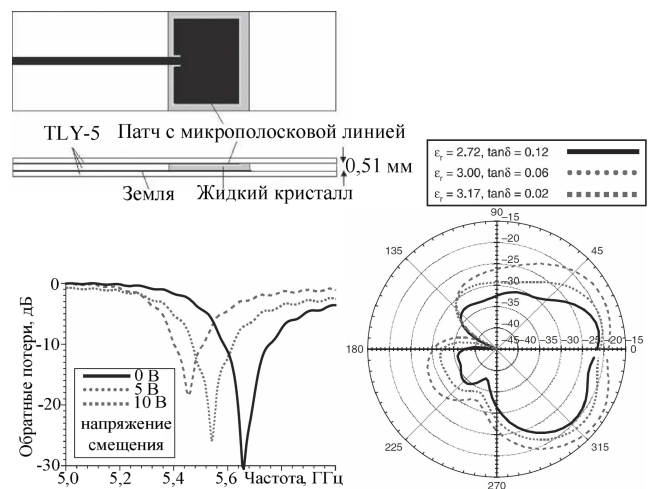


Рис. 8. Диаграмма направленности микрополосковой патч-антенны без жидких кристаллов (сплошная линия) и при их наличии в Е-плоскости

В [9, 25] приведены более сложные конструкции антенн выполненных с применением ЖК материалов.

Привлекательной разновидностью РА можно считать *самоструктурирующиеся антенны* (ССА) - устройства объединяющие в своем составе РА, систему контроля параметров антенны и микропроцессорную систему управления с алгоритмом двоичного поиска. Один из примеров такой антенны представлен на рис. 9 [26].

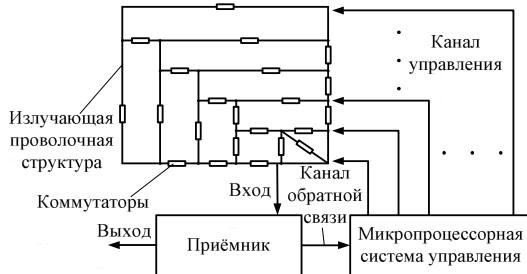


Рис. 9. Самоструктурирующиеся антенны

Контроль функционирования ССА выполняется системой датчиков, которые, например, могут измерять уровень сигнала, входной импеданс, либо любой другой параметр антенны. Информация от этих датчиков используется для управления переключающими устройствами, посредством чего изменяется электрическая конфигурация ИС. Переключение между возможными конфигурациями за приемлемое время осуществляется при помощи специальных алгоритмов.

Следует отметить, что ССА имеют специфические свойства, которые могут быть использованы для решения разнообразных прикладных задач. Возможно реализовать: *широкополосные антенны, мобильные и «приспосабливаемые» антенны, произвольно расположенные антенны, «непроектируемые» и «жизнестойкие» антенны* [2]. Например, разработанная авторами [2] модель ССА обеспечила КСВ менее 1,3 в почти десятикратном диапазоне частот при его оптимизации на каждой частоте диапазона.

Антенны для мобильных систем связи относительно трудно спроектировать из-за постоянно изменяющейся обстановки, в которой они используются. Так, традиционные антенны подвижных транспортных средств проектируются исходя из конкретных размеров и геометрической формы транспорта, местоположения антенны на нем. В случае *«приспосабливаемых»* антенн эти факторы становятся менее значимыми. Используемая должным образом ССА может учитывать конструктивные особенности транспорта, быстро адаптироваться к изменениям электромагнитной обстановки при его движении, обеспечивать приемлемый уровень сигнала с учетом работы с несколькими абонентами. Эта особенность также весьма актуальна для беспроводных сетей «интернет вещей», например, когда, антенны внедряются в одежду.

Встречаются ситуации, когда традиционные антенны не могут быть развернуты в определенных условиях, конструктивно и по характеристикам не приспособлены к ним. Здесь самоструктурирование антенны также имеет большое значение. ССА в виде сети

может быть временно развернута, например, поверх транспортного средства, или размещена на дереве в любом удобном положении. ССА можно также использовать в качестве перемещаемых кораблем или самолетом антенн. В данном случае они могут подвергаться буре, воздействию волн и самоструктурирование может помочь выбрать конфигурацию излучающей системы для оптимального функционирования ССА в этих условиях.

Когда же в ограниченном пространстве расположено большое количество антенн, влияние их друг на друга и воздействие на другие электронные системы является причиной нарушения электромагнитной совместимости. Поэтому самоструктурирование антенн может быть использовано для улучшения электромагнитной обстановки, за счет оптимизации РА по критерию ослабления мешающих излучений.

В некоторых случаях антенны могут быть повреждены вследствие определенных погодных или экологических факторов, актов вандализма или неправильной эксплуатации. В ситуациях, когда функционирование антенны является «жизненно необходимым», целесообразность применения ССА так же не вызывает сомнений, так как они могут реконфигурировать себя автоматически для «компенсации» части поврежденной ИС. Это весомое преимущество перед традиционными антеннами, для которых повреждение может серьезно нарушить их функционирование или вообще вывести из строя.

По своей природе ССА требует небольшого объема работ по её проектированию. В результате чего, когда возникает потребность в определенной антенне, может быть взята любая ССА, установлена в РТС и настроена на использование требуемого параметра, управляющего сигналом обратной связи. В итоге получается простая *«непроектируемая»* антенна для многих приложений.

Однако наряду с отмеченными достоинствами при разработке и эксплуатации как РА так и ССА существуют определенные проблемы [8], тормозящие широкое внедрение такого класса антенн. Например, при коммутации в РА зачастую одновременно изменяются несколько ее параметров: ДН и рабочая полоса частот, входной импеданс и поляризация антенны и т.п. Не всегда такая особенность необходима для функционирования РТС и получить РА с одним изменяемым параметром может потребовать серьезных усилий у разработчиков.

С точки зрения технико-экономической реализации РТС часто не ясны в полной мере выгоды и издержки внедрения и функционирования рассматриваемых антенн (степень увеличения пропускной способности, повышения надежности линии связи, уменьшения битовых ошибок и т.п.). Также для того чтобы в полной мере воспользоваться «сильными» сторонами РА и ССА необходимо особое внимание уделять выбору сигналов и разработке алгоритмов управления антенной. Функциональные возможности ССА могут быть расширены увеличением числа

переключателей в ИС, т.е. увеличением числа возможных электродинамических конфигураций. Однако слишком большое количество переключателей может привести к чрезмерному времени поиска оптимальной конфигурации. И хотя время, необходимое для определения параметров антенны в какой-либо конкретной конфигурации, будет мало, общее время, необходимое для определения характеристик всех конфигураций, вообще говоря, может быть неприемлемо велико. Для преодоления этой проблемы в США применяют эффективные алгоритмы поиска, такие, например, как генетические алгоритмы, колонии муравьев, алгоритмы имитации отжига и др. Причем сравнение этих алгоритмов показывает, что каждый из них может наилучшим образом подходить для тех или иных реконфигурируемых структур [27].

Не стоит забывать и о необходимости поиска технических решений для реализации в антенне дополнительных интерфейсов подачи сигнала управления, сигналов обратной связи и т.д., которые, при большом числе управляющих НЭ, могут оказаться более дорогостоящими, чем набор фиксированных антенн. Не исключено и определенное влияние таких интерфейсов и элементов коммутации на характеристики антенны. Важными остаются вопросы связанные с надежностью, энергопотреблением, чувствительностью к помехам и т.д. исполнительных механизмов РА.

Микропроцессорная система, управляющая переключателями, должна обладать способностью быстро оценить сигналы обратной связи и обеспечить выбор соответствующей электродинамической конфигурации ИС из всего множества возможных конфигураций. Вполне вероятно, что за время, пока система оценивает альтернативные конфигурации, сигнал будет искажен и некоторые из выбранных форм ИС, в изменяющихся условиях, будут функционировать неудовлетворительно. Этот промежуток времени достаточно мал, поэтому для сравнительно простых приложений существенного ухудшения качества работы не произойдет. В военных же системах связи и быстродействующих цифровых системах, указанную проблему необходимо решать, например, применением дополнительных ССА.

Наконец, весь процесс проектирования новых РА и ССА зачастую опирается на некие «инстинктивные» решения проектировщика, на его знания в области традиционных антенн. Поэтому весьма актуальным является проведение и систематизация результатов множества натурных и числовых экспериментов анализа характеристик антенн, разработка четкой методологии проектирования, анализа затрат/выгод получаемых за счет внедрения в РТС данного класса антенн.

### Компоненты функциональной электроники

Одним из направлений решения ряда проблем в РА связанных, например, с уменьшением габаритов, возникновением паразитных связей и ряда нелинейных эффектов является применение технологий прямого интегрирования переключателей и линий управления (линий обратной связи) в конструкцию антенны при ее изготовлении

[8]. При этом можно уже говорить о несколько другой группе ЭДУ с НЭ - *функциональной электронике (SoC проекты)*.

Среди одних из наиболее актуальных задач дальнейшего развития современных мобильных устройств стало снижение себестоимости и уменьшение габаритов антенно-фидерного тракта вплоть до возможности его интеграции на одном кристалле со схемами обработки сигнала, микроконтроллером. Столь многообещающие несколько десятилетий назад классические технологии микрополосковых антенн с точки зрения уменьшения размеров при сохранении их эффективности ныне достигли своих пределов. Поэтому в последнее десятилетие поиск нетрадиционных подходов к реализации микроволновой техники существенно активизировался.

В общем случае отличительной особенностью функциональной электроники (ФЭ) является интеграция функций, выполняемых простейшими в функциональном отношении компонентами (излучателями, отрезками линий передачи, активными элементами и т.д.). Известно, что устройства ФЭ представляют собой полупроводниковые интегральные структуры, которые выполняют достаточно сложные законченные функции и неделимы на отдельные компоненты. Именно такими устройствами и являются интегрированные ЭДУ с НЭ, конструкции которых выполняются в виде монолитных интегральных схем. Существует уже множество разработок интегрированных ЭДУ, функционирующих, как правило, в КВЧ и ГВЧ диапазонах (обычно от 40 до 250 ГГц) [28]. Тем не менее, частота 250 ГГц не является пределом. Создана, например, антенна-смеситель с рабочей частотой 761 ГГц. Основные же ограничения, препятствующие повышению рабочих частот интегрированных ЭДУ с НЭ – это потери в проводниках и диэлектриках микросхем и точность изготовления, обусловленная той или иной технологией производства.

Излучающие интегрированные ЭДУ с НЭ уже нашли применение в информационных и энергетических радиоэлектронных системах для генерации электромагнитных волн, преобразования частоты сигналов, детектирования и выпрямления [28]. Основные области применения интегрированных ЭДУ – радиоэлектронные системы связи, беспроводной передачи энергии и радиовидения. К одному из примеров функциональной электроники можно отнести концепцию антенны, представленную на рис. 10а [29]. Возможность реализации такой структуры подтверждена существованием рабочих прототипов. Излучающие и управляющие элементы расположены на подложке, которая объединена с системой управления, также выполненной по интегральной технологии (технологии производства микросхем). Это позволяет создавать структуры с малыми размерами излучающих элементов, высокой плотностью расположения управляющих НЭ. Предложенная технология позволяет реализовать компактные управляющие р-і-п структуры с так называемыми плазменными «і» слоями (каналами), насыщенными высокоподвижными носителями и обладающими свойствами металла (рис. 10б). Эти каналы образуют излучатели антенны, которые возбуждаются



посредством переключения диодов. При этом антенна обладает возможностью изменения своей «электромагнитной заметности» путем изменения в структуре уровня сигналов управления, от которых зависят параметры (время жизни носителей, концентрация носителей, глубина канала и т.д.) и существование проводящих плазменных каналов, т.е. «существование» апертуры. Авторы предложенной концепции отмечают, что в структуре можно реализовать возможность создания динамически меняемой ИС и то, что мощность необходимая для управления такой структурой будет меньше нежели для структуры с оптически контролируемые каналами. Схема управления будет проще и дешевле. Варьирование параметрами материала излучателей позволило получить КПД антенны в пределах от 30 до 99.9 %.

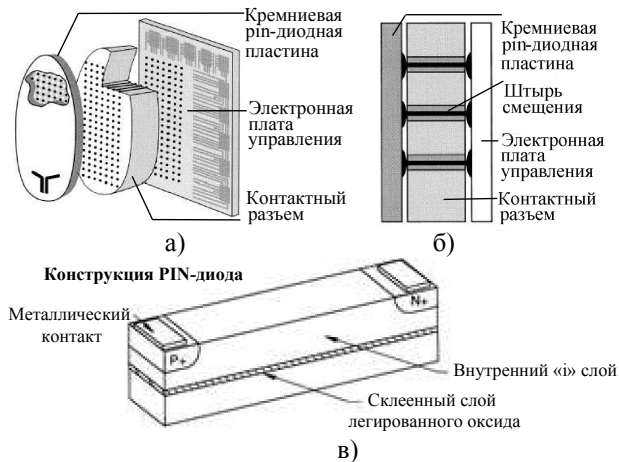


Рис. 10. Реконфигурируемая антенна на интегрируемых излучающих электродинамических устройствах с нелинейными элементами

При применении плазменных каналов в качестве излучателей, можно улучшить характеристики антенны за счет плотности плазмы (увеличения числа p-i-n структур на единицу длины подложки), так как ее свойства при этом приближаются к свойствам идеального проводника. Однако, как было отмечено, это ведет к увеличению мощности потребляемой антенной на управление ее конфигурации.

Данные антенны обладают свойствами фазированных антенных решеток, однако при этом, применяемые в рассматриваемых антеннах p-i-n структуры требуют дальнейших исследований их нелинейных свойств, также как и характеристик антенны (КПД; коэффициента усиления; плотности плазмы и т.д.), которые еще в достаточной степени не исследованы. В теории подобных микроантенн достаточно пробелов, отсутствуют понимание ряда важнейших процессов, необходимые математические модели (методы конструирования и технология изготовления традиционных антенн не могут быть перенесены на плазменные антенные структуры), а многие «научные прорывы» носят сугубо технологический характер.

Стоит также учитывать, что для встраиваемых в мобильные устройства микроминиатюрных антенн перечень требований для их реализации весьма

противоречив. Различные функциональные характеристики, в числе которых КПД, широкополосность, диапазонность и необходимая для специфики условий эксплуатации форма ДН – вот далеко не полный список взаимозависимых параметров. Велико их влияние и на энергоэффективность мобильного устройства в целом. Ведь неоптимальные характеристики ЭДУ, участвующих в процессе приема/передачи сигнала способны свести на нет все усилия разработчиков микросхем по уменьшению потребления энергии полупроводниковыми компонентами. А коль снижение плотности потока мощности излучения обратно пропорционально квадрату расстояния от антенны, то потери можно компенсировать таким же увеличением генерируемой (отнюдь не со 100%-ным КПД) мощности.

Наконец заметим, что появление в начале века разработок в области MEMS-технологии для конструирования SoC СВЧ-устройств обещает создание встраиваемых в кристалл элементов управления с нулевым потреблением в состоянии покоя и мощностью переключения на уровне единиц нДж/с при напряжении срабатывания в несколько вольт. Это, а также бурное развитие практического применения ряда других технологий и материалов (например, метаматериалов или ВТСП) может обеспечить разработчиков компонентами для реализации новых энергоэффективных и простых, но в то же время чрезвычайно функциональных ЭДУ различного назначения.

Эффективность перспективных спутниковых систем связи и навигационных систем может быть значительно улучшена за счет использования адаптивных антенн с интеллектуальным формированием луча и возможностью управления этим лучом. Интерференция сигнала и помехи или интерференция сигналов, появляющихся за счет многолучевого распространения радиоволн, может быть значительно уменьшены за счет ограничения ширины основного лепестка ДН, уменьшения боковых лепестков ДН и формирования нулей в направлении помехи. Это приводит к повышению качества обслуживания в системах связи (особенно для связи с негеостационарными спутниками) и помогает повысить точность позиционирования в навигационных системах (за счет компенсации любого движения мобильного терминала). Отмеченные возможности в этой области демонстрирует представленный на рис. 11 [30] модуль с активной антенной и цифровым формированием луча – еще один пример реализации ФЭ.

Модуль, функциональная схема и фото которого представлены в [30], построен по многослойной интегральной технологии, где в определенном слое структуры реализована антенна, маломощные усилители (МШУ), цепи калибровки и другие радиоустройства формирования ДН и обработки сигнала. Рабочая частота устройства с учетом функционирования спутниковой системы Galileo – 5,01...5,03 ГГц. Антенна представляет собой структуру с планарными патчами (5×5 элементов на расстоянии пол длины волны), возможностью сканирования по азимуту  $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$  и углу места  $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ , коэффициентом усиления более 10 дБи. Каждый патч возбуждается через отверстие в экране и в

подложке, на которой он расположен. При этом цепи питания патчей интегрированы в структуру таким образом, чтобы получить правую круговую поляризацию. Объединяющие патчи цепи реализованы по симметричной полосковой технологии для защиты нижерасположенных электронных компонентов. Чтобы обеспечить низкие потери, МШУ установлены непосредственно под антенной, а все переходные отверстия между антенной и МШУ экранированы короткозамкнутыми штифтами. Дополнительные слои с сетями в виде симметричных полосковых линий использованы для подачи сигнала местного генератора на смесители и подачи специального калибровочного сигнала на вход каждого МШУ. Это позволяет проводить коррекцию параметров модуля, например, при воздействии температуры и др. факторов, во время работы антенны. В отличие от традиционной схемы с фазированной решеткой в радиочастотной части представленного модуля не требуются регулируемые электронные компоненты. Процедура формирования ДН перемещена в блок обработки цифрового сигнала, что позволяет достичь существенной гибкости системы. Путем калибровки и подходящих алгоритмов коррекции ошибок существует возможность значительно улучшить точность формирования ДН, максимально снизить зависимость от внешних физических воздействий.

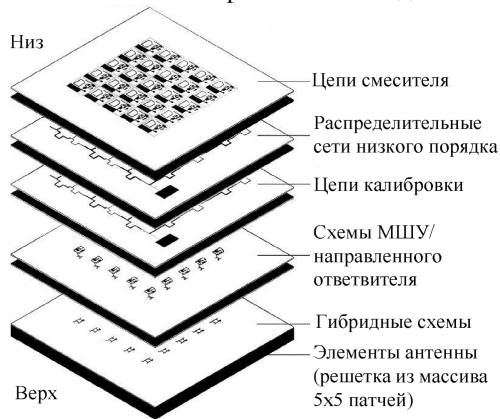


Рис. 11. Модуль с активной антенной и цифровым формированием луча

Авторы отмечают, что особой проблемой в полосковой части таких структур, возникающей из-за соединительных отверстий, является генерация параллельно распространяющихся вдоль металлических пластин волн высших типов. Это может привести к снижению КПД и коэффициента усиления. Нежелательная связь между излучателями вызывает некоторое ухудшение характеристик излучения. Для подавления паразитных мод был применен специальный подход, заключающийся в смещении резонансной частоты паразитных волн (за счет дополнительного открытого шлейфа, подключенного к шунту с питающей линией) в область, где потери вызванные этими волнами минимальны [30].

Приведенные на рис. 10 и рис. 11 примеры показывают, что в зависимости от применяемого разработчиками типа излучателя функциональные

устройства могут относиться к одной из двух разновидностей: к монолитным схемам, содержащим один или множество сосредоточенных нелинейных активных элементов или интегрированным ЭДУ с распределенной нелинейностью. Первая разновидность структур представлена значительным количеством реальных разработок, отличающихся большим разнообразием как по конструктивному исполнению, так и по функциональному назначению. На рис. 12 приведено еще несколько примеров интегрированных с сосредоточенными НЭ антенн.

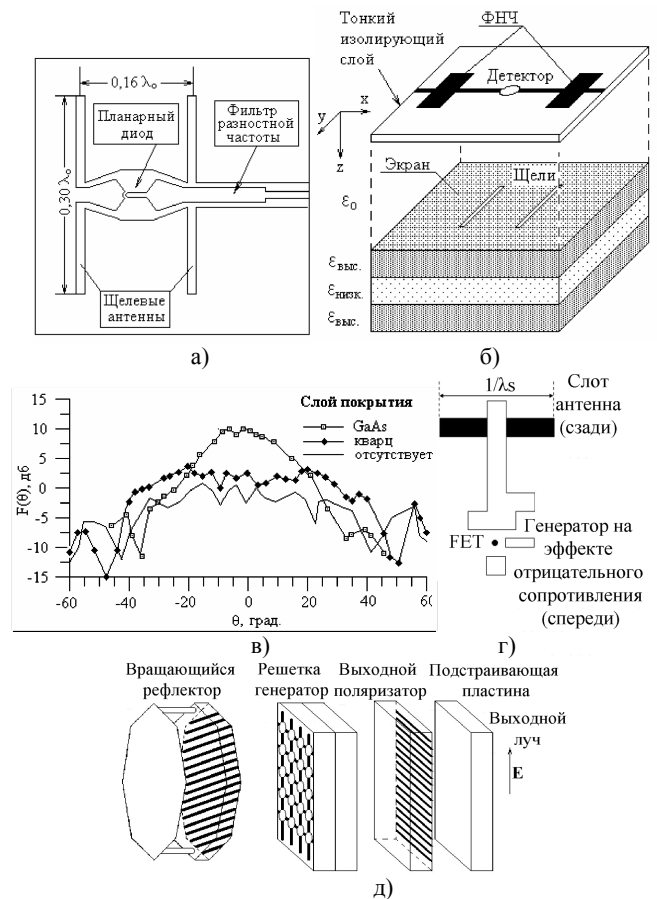


Рис. 12. Двухэлементная приемная антенна нагруженная на диод (а), слаборазделенная антенна-детектор (б), многослойная слаборазделенная антенна детектор (в), многослойная антенна-генератор на полевом транзисторе (г), многослойная антенная решетка (д)

Двухэлементная приемная антенна, нагруженная на диод, применяется как облучатель линзы [31] (рис. 12а). Планарный диод напылен на одну подложку совместно с излучателями и отрезками линий передачи. Аналогичная структура нелинейного элемента присуща и слаборазделенной антенне-детектору [31] (рис. 12б). В примерах конструкции слаборазделенных антенн являются многослойными и содержат как полупроводниковые подложки, так и защитные покрытия. Последние в отдельных случаях позволяют улучшить характеристики антенны (см. рис. 12в).

Многослойность конструкций характерна и для направленных интегрированных антенн, выполняемых на основе решетчатых структур. Например, на рис. 12г

приведен пример антенны-генератора на полевом транзисторе, нагрузкой которого является щелевой излучатель. Такая антенна служит в качестве передающих модулей и может объединяться в антенную решетку (рис. 12д) с целью увеличения излучаемой мощности за счет пространственного сложения мощностей излучаемых отдельными активными элементами, управления лучом и поляризацией [32]. Если стоит задача увеличить коэффициент усиления антенны, ее выполняют в виде интегрированного устройства содержащего активные усилительные приборы и пассивные излучающие элементы на их входе или выходе, тем самым образуя антенну-усилитель [33]. Сетчатая структура позволяет реализовать пространственное сложение мощностей.

Заметим, что, функционально нелинейные антенные решетки на сосредоточенных НЭ (квазираспределенная нелинейность) одновременно являются и потенциально нелинейными электродинамическими структурами с распределенной нелинейностью в силу возможности возникновения в них нежелательных барьеров Шоттки. Влияние нежелательных распределенных нелинейностей пока слабо изучено. Однако, основываясь на известных результатах исследований сосредоточенных нежелательных барьеров Шоттки, можно прогнозировать, что это влияние может быть значительным. Например, в [34] решена задача рассеяния электромагнитных волн сетчатыми структурами, у которых в местах контактов проводников с высокой проводимостью за счет окисления образуются квазираспределенные барьеры Шоттки. Показано, что импедансы переходов Шоттки существенно влияют на отражательные свойства сетчатых структур. Поэтому подобные структуры были выделены в отдельную группу ЭДУ с НЭ и/или МНС – **окисленные контакты и поверхности**.

Влияние нежелательных распределенных барьеров Шоттки в изображенных на рис. 12 интегрированных ЭДУ с НЭ может проявиться при воздействии на них мощных непрерывных и импульсных электромагнитных излучений систем функционального поражения [34]. При воздействии таких систем "вредные" нелинейные эффекты возникают в ЭДУ с НЭ и за счет наличия сосредоточенных НЭ.

Функционально нелинейные интегрированные излучающие структуры с распределенной нелинейностью, у которых активные элементы занимают существенную часть площади или всю площадь подложки микросхемы, представлены меньшим количеством реальных разработок. В качестве примера на рис. 13 изображена антенна-генератор [31]. Она представляет собой монолитную интегрированную схему, состоящую из генератора миллиметровых волн и передающей n-GaAs антенны. Основным элементом генератора является распределенный GaAs IMPATT-диод. Схема функционирует на частоте 168 ГГц, при этом КПД излучателя довольно высок (до 80 %). Необходимое распределение проводимости по длине полупроводниковой антенны реализовывалось на этапе ее

изготовления.

Типичными электродинамическими структурами с непрерывной распределенной нелинейностью в некоторых случаях можно считать и антенны-выпрямители (ректенны) которые более подробно будут рассмотрены в другой части цикла статей.

### Метаматериалы

В последнее время область материаловедения сместилась с *изучения свойств* новых материалов в область *конструирования новых материалов*. Появились так называемые **метаматериалы (ММ)**. ММ являются искусственными структурами и демонстрируют физические свойства, не встречающиеся в природе, такие как: отрицательный показатель преломления или поглощение отражения от облученной СВЧ энергией поверхности материала, позволяющие, например, выполнять электромагнитное маскирование объектов; концентрацию электромагнитной энергии в максимально узком секторе пространства; почти нулевую диэлектрическую проницаемость или проницаемость характерную анизотропной среде и т.д. Эти свойства обеспечивают возможность применения ММ в многообразных сферах деятельности человека: в системах широкополосной связи, медицинских приборах с ультравысоким разрешением визуализации, военной технике и т.д. [35]. Например, ММ могут применяться в качестве подложек для печатных миниатюризированных антенн, способствуя снижению размеров излучателей, увеличению их полосы пропускания и КПД. Причем их структура может быть как однородной, так и композитной, образованной из нескольких типов сред с различными свойствами. Подбирая их размеры и соотношения, можно регулировать резонансную частоту печатной антенны. Еще одно конструктивное направление развития микроантенн – использование оболочки из метаматериала в качестве «купола» для штыревого микроизлучателя (рис. 14). С помощью подобной электрически малой антенны (ЭМА) можно преодолеть предел Чу более чем в 1,5 раза. Здесь заметим, что один из родоначальников теории малых антенн Гарольд Вилер, впервые связавший между собой определение приемной ЭМА с ее максимальным размером, а также развивший идеи Чу доказал, что предельная добротность антенн по мере перехода к ЭМА резко возрастает (соответственно, полоса рабочих частот сужается). Таким образом, в антенне на рис. 14 минимальная добротность характеризуется отношением запасенной электромагнитной энергии внутри окружающей антенну сферы к излучаемой за ее пределы мощности. На резонансной частоте в такой конструкции удается реализовать почти 50 Ом активное и нулевое реактивное сопротивления при КПД около 98 – 99% [36].

Как правило, ММ состоят из периодически размещаемых «элементарных ячеек» (строительных блоков) и в большинстве случаев эти блоки содержат металлические элементы на кремниевой подложке, как показано на рис. 15 (слева).

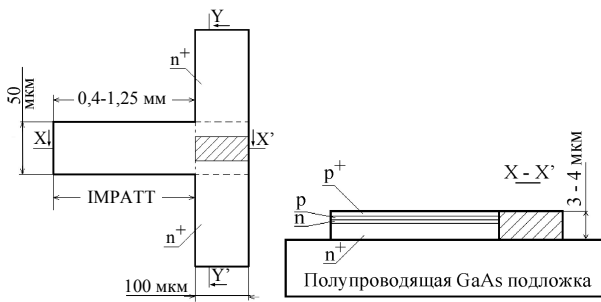


Рис. 13. Нелинейная интегрированная антенна-генератор с распределенной нелинейностью

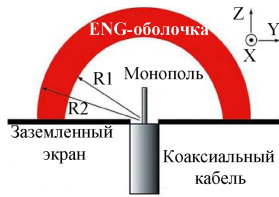


Рис. 14. Штыревой микроизлучатель с оболочкой из метаматериала

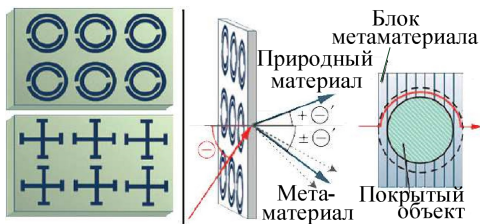


Рис. 15. Метаматериал из периодически размещаемых «элементарных ячеек»

Свойства ММ зависят от геометрии строительных блоков, например, от диаметров колец и размеров зазоров в них (рис. 15). В результате чего, получаемые свойства ММ после их изготовления, постоянны. Такая особенность ограничивает области применения ММ, сдерживает инновации в направлении развития таких материалов. Например, изменение радиуса цилиндрического объекта на рис. 15 или частоты падающей волны требует уже разработки нового ММ покрытия.

Преодолеть многие из описанных выше ограничений позволяет реализация *программируемых ММ* (ПММ). В ПММ реализованы рассмотренные выше принципы реконфигурации и функциональной электроники путем объединения классического ММ с миниатюрными коммутаторами, изменяющими распределение тока в ММ, с наносетями, подающими сигналы управления [37], и контроллером, управляющим изменением свойств ПММ. В результате чего ММ могут вести себя «пластично» – перестраиваться, менять свои свойства программным путем через компьютерный интерфейс в зависимости от решаемой ПММ задачи или внешней обстановки, при наличии в ПММ чувствительных элементов (датчиков) и интеллектуальных цепей управления [38].

В общем случае ключевой особенностью ПММ является «дискретность» как структуры ММ, так и ее поведения. Например, не каждый угол преломления возможно реализовать из-за невозможности произвольного изменения геометрии ячеек ПММ. Необходимо учитывать и размеры полупроводниковых коммутаторов, которые могут быть сопоставимы с размерами соединяемых металлических патчей (например  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ ). Поэтому одним из наиболее рациональных является подход реализации ПММ на основе коммутационной матрицы на базе МЭМС структур предложенный в [38]. Конструкция такой ПММ приведена на рис. 16. Размеры прямоугольных резонаторов с разделенными кольцами определяют угол преломления электромагнитной волны, падающей на поверхность ПММ.

Параметры же резонаторов определяются программным управлением состояния «включено»/«выключено» переключателей соединяющих/разъединяющих металлические проводники ПММ. В результате можно установить разный угол преломления в каждой точке ПММ и достичь, например, пространственно изменяющейся электрической и магнитной проницаемости, варьируя от больших положительных до отрицательных значений.

Важным является выбор способа изменения свойств ММ, понимание ограничений, которые могут появиться при применении в ПММ того или иного типа коммутатора. Так, например, как было отмечено выше, технология МЭМС обладает рядом недостатков – низкие скорости переключения, высокие напряжения управления и др. При этом как альтернативу МЭМС можно применять не только полупроводниковые коммутаторы, а и графены, углеродные нанотрубки, жидкие кристаллы и другие материалы [39]. В [40] предложены варианты реализации ПММ с оптически переключаемыми частями. На рис. 17 изображен шаблон ПММ на основе графенового слоя [41] с локально изменяемой проводимостью. Привлекательным свойством графена является его переменная прозрачность для электромагнитных волн при изменении электростатического поля (емкостного смещения) между подложкой и сегментами графенового слоя (рис. 17) [42]. По существу поверхность ПММ становится управляемой матрицей, на которой в любой момент можно сформировать любые нужные структурные блоки ПММ.

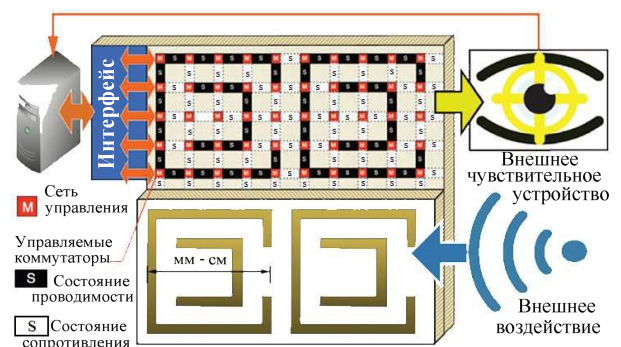


Рис. 16. Конструкция программируемых метаматериалов



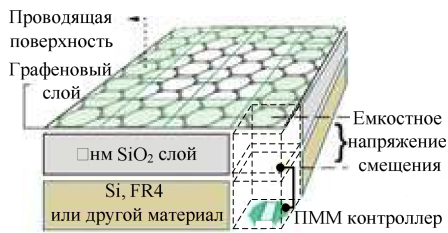


Рис. 17. Шаблон программируемого метаматериала на основе графенового слоя с локально изменяемой проводимостью

Недостатком такого подхода является то, что для создания рисунков проводящих ячеек с хорошим разрешением необходимо большое число ПММ контроллеров со сложными и разветвленными цепями управления. Это значительно усложняет производство и стоимость таких устройств. Кроме того, графен взаимодействует только с электромагнитными волнами, распространяющимися вдоль его поверхности [42], что ограничивает использование таких ПММ, например, при электромагнитной маскировке объектов. Однако у планарных ММ есть свой «уникальный» набор применений. Такого рода ПММ могут быть основой для нового класса графеновых электронных схем, позволяющих программным способом формировать собственные шаблоны ПММ, выполняющие определенные задачи на поверхности ПММ, включая антенны, а затем стирать их и формировать совершенно другие шаблоны в реальном масштабе времени.

ПММ могут выступать в качестве частотно-селективных устройств (*металлических частотно-избирательных материалов (МЧИМ)*). Известно, что МЧИМ, являющиеся периодическими структурами и состоящие из непрерывных или разомкнутых проводников, обладают различными характеристиками, представляющими интерес в тех случаях, когда МЧИМ используются в качестве рефлекторов антенн или антенных обтекателей. Для изменения структуры МЧИМ с непрерывной на разомкнутую, в ее состав включают активные нелинейные элементы, что позволяет переключением структуры с непрерывной на разомкнутую формировать различные ДН поля дипольной антенны (сканировать ДН или изменять ширину главного лепестка и уровень боковых лепестков).

МЧИМ, состоящие из непрерывных и разомкнутых проводников по разному ведут себя, при этом им свойственно наличие частотных диапазонов, в которых отсутствует режим распространения электромагнитной энергии. МЧИМ с непрерывными проводниками (двумерные (2D) решетки) и с разомкнутыми (трехмерные (3D) решетки) обладают абсолютно различным поведением, даже если они имеют те же самые значения периодичности решетки и диаметры проводников. Так на рис. 18а, для МЧИМ с непрерывными проводниками, возбуждаемого плоской волной в которой вектор напряженности электрического поля параллельный проводникам, коэффициент отражения равен 1 от 0 Гц до частоты среза, которая

зависит от физических параметров. Эта первая полоса затухания сменяется диапазоном с режимом распространения. Максимумы распространения в этом диапазоне соответствуют максимуму множителя системы МЧИМ, что позволяет уменьшить уровень боковых лепестков решетки. В случае разомкнутых проводников отклик МЧИМ определяется геометрией структуры – шагом решетки, толщиной и длиной проводников. Эта дуальность между непрерывными и дискретными МЧИМ становится еще более важной, когда частота может быть выбрана внутри другой полосы пропускания (противоположной первой).

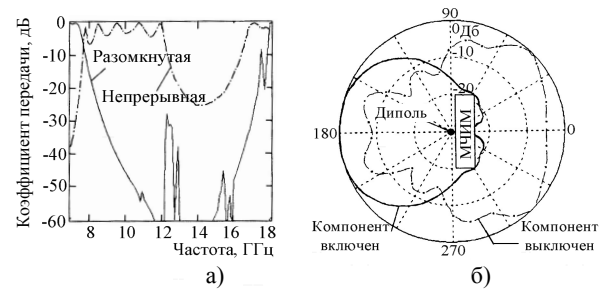


Рис. 18. Коэффициент передачи и диаграмма направленности дипольной антенны над активными металлическими частотно-избирательными материалами с непрерывными и разомкнутыми проводниками

На рис. 18б приведена ДН, полученная для случая, когда дипольная антенна, размещенная над активным МЧИМ, возбуждается на частоте затухания МЧИМ с непрерывной и разомкнутой структурой. Форма ДН указывает на то, что структура ведет себя подобно рефлектору, когда активные элементы включены, или подобно рассеивающей решетке, когда они выключены.

Когда диполь помещен в структуру МЧИМ, то либо его частота настройки находится в границах полосы затухания и поле в дальней зоне мало, либо частота настройки находится в пределах полосы пропускания и ДН имеет максимумы в направлении максимумов множителя решетки структуры. В первом случае, ряд проводников может быть отключен с тем, чтобы образовать направляющую структуру. Поле распространяется в этой структуре и ДН такая же, как и у открытого конца волновода [43].

Часто некоторые из непрерывных проводников заменяют активными проводниками (рис. 19а). Диполь может возбуждаться на частоте в полосе затухания структуры с непрерывными проводниками (рис. 19б). Однако, когда активные компоненты выключены, то ряд активных проводников становится эквивалентным ряду разомкнутых, поле распространяется вдоль этого ряда и формируется широкий главный лепесток ДН. Когда же активные компоненты включены, то структура МЧИМ подобна структуре с непрерывными проводниками, главный лепесток ДН здесь выключен. Активные элементы могут быть включены во всех четырех ортогональных направлениях для кругового сканирования.

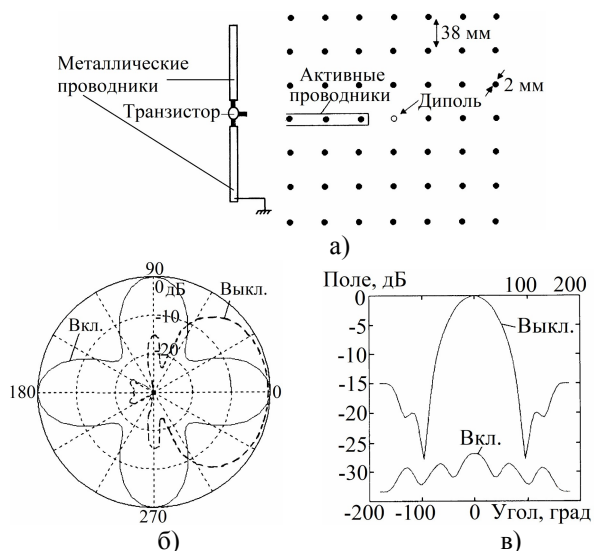


Рис. 19 Диаграмма направленности дипольной антенны над активными металлическими частотно-избирательными материалами с непрерывными активными проводниками

На частоте, соответствующей первому максимуму множителя решетки непрерывной структуры, когда активные компоненты включены, ДН имеет узкие лепестки в четырех ортогональных направлениях (рис. 19в), при условии, что структура симметрична. Когда коммутаторы выключены, структура имеет разомкнутые проводники в соответствующем направлении. Поскольку распространение энергии в разомкнутой структуре более интенсивное по сравнению с первой модой распространения у непрерывной структуры, ДН имеет широкий лепесток вдоль разомкнутой структуры (рис. 19в).

В качестве еще одного примера рассматриваемых материалов можно представить реконфигурируемый «пиксельный экран» для частотно перестраиваемого ретранслятора [44]. Отметим, что ретрансляторы являются привлекательным решением для расширения зон покрытия и повышения качества обслуживания абонентов беспроводных сетей связи. Особый интерес представляют ретрансляторы использующие одну и ту же частоту для приема и дальнейшей передачи сигнала. Это обуславливает их важнейшие преимущества с точки зрения простоты, стоимости, времени ожидания и управления сетью связи. Основная проблема при проектировании компактных частотных повторителей заключается в хорошей электромагнитной развязке, необходимой между двумя антеннами.

Для уменьшения взаимной связи между двумя антеннами предлагаются различные методы, например, использование поляризационного разнесения [45], метод устранения самоинтерференции [46] или метод электромагнитного экрана. В последнем случае в качестве изоляторов применяются различные структуры – экранирующие металлические пластины [47], частотно-селективные экраны [48], оптимизированные плоскости заземления [49]. Однако эти методы являются одночастотными, узкополосными и очень чувствительными к допускам и изменениям окружающей среды. Для устранения этих недостатков Daniel Rodrigo с командой исследователей предложили использовать

реконфигурируемый пиксельный экран для динамической настройки взаимной связи между двумя антеннами в ретрансляторе. Внешний вид такого ЭДУ приведен на рис. 20. Экран состоит из решетки 6×6 электрически небольших металлических патчей размером 87 мм, что составляет примерно половину длины волны. Радиочастотные переключатели (р-и-п диоды) расположены между каждой парой соседних патчей и управляются при помощи компьютера. Реконфигурируемые элементы расположены в плоскости равноудаленной от двух антенн. Это, в отличие от других вариантов, когда коммутируемые патчи находятся вблизи каждой антенны и обеспечивают в основном влияние на каждую антенну индивидуально, обеспечивает гораздо лучший контроль над взаимной связью излучателей. Высота и толщина диполей, а также их расстояние оптимизированы для получения максимального диапазона перестройки частоты.

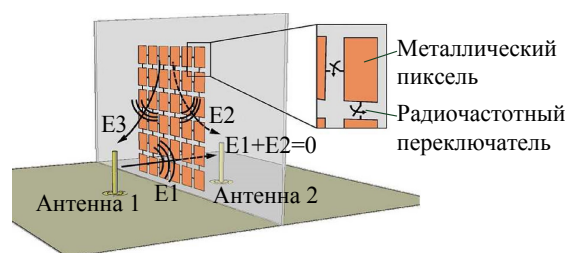


Рис. 20. Поляризационное разнесение антенн с использованием реконфигурируемого пиксельного экрана

Настройка частоты работы ретранслятора и необходимая развязка антенн может осуществляться динамично перераспределяя ВЧ-токи на экране путем соединяя/разъединяя определенным образом патчей экрана. В результате электрическая конфигурация экрана должна быть таковой, чтобы поле рассеянное экраном компенсировало прямое поле первой антенны, создаваемое вблизи второй антенны. Помимо обеспечения высокой развязки между двумя антеннами этот подход позволяет обеспечить и высокий коэффициент усиления сигнала без ущерба для стабильности системы. При этом выбор конфигурации коммутатора представляет собой задачу многокритериальной оптимизации, при которой коэффициент связи между двумя антеннами и коэффициент отражения у каждой антенны совместно минимизируются.

Максимальное усиление ретранслятора ограничивается степенью электромагнитной развязки между двумя штыревыми излучателями. За счет реконфигурации экрана удалось получить 42% перестройку рабочей частоты ретранслятора в S-диапазоне волн (с 2,19 до 3,49 ГГц) и достичь надежного экранирования излучения на уровне 50 дБ (рис. 21а). Полоса пропускания ретранслятора составила порядка 1-3% (возможна вариация от 20 до 80 МГц за счет изменения степени экранирования), а КПД, несмотря на большое количество коммутаторов, очень высок и составляет в среднем 93%. На рис. 21б приведены измеренные ДН рассматриваемой структуры для случая, когда она имела полосу пропускания 20 МГц и частота

настройки была 2,25, 2,50, 2,75 и 3 ГГц. Видно, что форма ДН практически не изменяется с перестройкой репитера. Коэффициент усиления составляет порядка 5 дБи, что соответствует случаю, когда вместо пиксельного экрана стоит сплошной экран такого же размера.

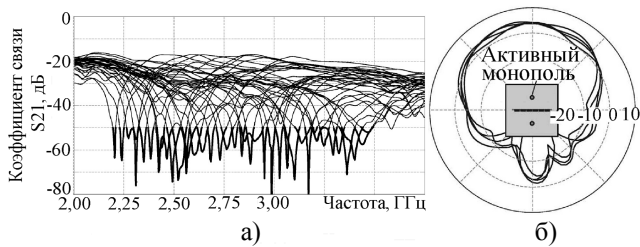


Рис. 21. Коэффициент связи при электромагнитной развязке между двумя штыревыми излучателями за счет реконфигурации экрана

В завершение рассмотрения ММ отметим, что при их реализации еще существует множество проблем. Наиболее значимые среди них следующие.

- Отсутствие «универсальных» математических моделей анализа ПММ для применения их на первых этапах процесса проектирования. Для анализа ПММ могут быть использованы такие известные математические методы как теория эффективных сред; метод конечных разностей во временной области (FDTD); метод конечных элементов (FEM); метод конечных интегралов (FIT) и др. Но известные модели на их основе не учитывают влияние коммутаторов, цепей управления и т.д., не оптимизируют структуру ПММ с точки зрения минимизации коммутаторов и других элементов при сохранении заданных функциональных возможностей.

- Реализация в ПММ технологии «наносетей» с большим числом элементов управления (коммутации), цепей управления, питания и т.п.

- Жесткие ограничения по питанию узлов ПММ, по уровню сигналов управления.

- Необходима эффективная адресация большого количества элементов управления.

- Разработка сложного программного обеспечения для связывания адресов элементов управления с определенными конфигурациями ПММ.

- Высокие требования к вычислительной сложности протоколов обмена данными для увеличения скорости реконфигурации ПММ.

- Реализация устойчивости ПММ к частым ошибкам (схем коррекции ошибок) в цепях управления, связанных с помехами (взаимным влиянием элементов), интерференцией и отказами оборудования.

Отметим еще одну особенность. При разработке конкретного модуля ПММ на раннем этапе проектирования следует сделать рациональный выбор относительно проводного или беспроводного характера управления и подачи питания ММ. «Проводной» подход может быть проще в реализации, но в ряде случаев может потребоваться применение методов мультиплексирования по времени для обхода сложности конструирования сетей управления, субмикронной ее разводки, для уменьшения электромагнитных помех, которые будут влиять на производительность и характеристики ПММ. Соответственно преимущество же

«беспроводного» подхода заключается в отсутствии проводящей сети управления за поверхностью ПММ, что весьма актуально в случае большого числа элементов управления. Тем не менее, этот способ реализации добавляет дополнительный уровень сложности в реализации команд управления и отклика через радиоволновые или инфракрасные линии связи.

## Выводы

Из представленного материала обзорной статьи видно, что включение в ЭДУ НЭ и/или МНС позволяет существенно расширить функциональные возможности традиционных устройств, получить возможность изменять и управлять их характеристиками. Однако, наряду с получением положительных эффектов разработчик сталкивается с необходимостью решения специфических проблем на этапе проектирования ЭДУ – подбора НЭ с нужными характеристиками; проектирования цепей управления НЭ; решения вопросов взаимного влияния структуры ЭДУ, НЭ, цепей управления и обработки данных; создания алгоритмов коммутации и т.д. Все эти проблемы показали необходимость создания и развития алгоритмов проектирования и математических моделей ЭДУ с НЭ. Для развития некоторых ЭДУ, понимания особенностей их характеристик и функционирования необходимо проведение множества натуральных и числовых экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. H.K. Pan and J. Tsai, "Reconfigurable antenna technology for multi-radio platforms," in *Intel Developer Forum, Session MPGS006, San Francisco, 2007* [Online]. Available: [http://inteldeveloperforum.com.edgesuite.net/fall\\_2007/d3/MPGS006/index.html](http://inteldeveloperforum.com.edgesuite.net/fall_2007/d3/MPGS006/index.html).
2. S. Yang, C. Zhang, H.K. Pan, A.E. Fathy, and V.K. Nair "Frequency Reconfigurable Antennas for Multiradio Wireless Platforms," *IEEE microwave magazine*, pp. 66-83, 2009.
3. G.P. Jin, D.L. Zhang, and R.L. Li, "Optically controlled reconfigurable antenna for cognitive radio applications," *IET Electron. Lett.*, Vol. 47, No. 17, pp. 948–950, 2011.
4. Y. Tawk, A.R. Albrecht, S. Hemmady, G. Balakrishnan, and C.G. Christodoulou, "Optically pumped frequency reconfigurable antenna design," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, Vol. 9, pp. 280–283, 2010.
5. Y. Tawk, "Demonstration of a cognitive radio front end using an optically pumped reconfigurable antenna system (OPRAS)," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 60, No. 2, pp. 1075–1083, 2012.
6. D. Patron, A.S. Daryoush, and K.R. Dandekar, "Optical control of reconfigurable antennas and application to a novel pattern-reconfigurable planar design," *IEEE J. Lightw. Technol.*, Early access article, 2014.
7. L.N. Pringle, P.H. Harms, S.P. Blalock, G.N. Kiesel et al., "A reconfigurable aperture antenna based on switched links between electrically small metallic patches," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, pp. 1434–1445, 2004.
8. J.T. Bernhard "Reconfigurable Antennas. Series synthesis lectures on antennas. Lecture 4," *Series Editor: Constantine A. Balanis, Arizona State University Morgan & Claypool Publishers*, 65 p., 2007.
9. C.G. Christodoulou, Y. Tawk, S.A. Lane, and S.R. Erwin, "Reconfigurable antennas for wireless and space applications," *IEEE*, Vol. 100, No. 7, pp. 2250–2261, 2012.
10. J. Costantine, Y. Tawk, S.E. Barbin and C.G.

- Christodoulou "Reconfigurable Antennas: Design and Applications," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 103, No. 3, pp. 424-437, 2015.
11. H.J. De Los Santos, "RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications," Norwood, MA: Artech House, 280 p., 2002.
  12. N. Maluf and Kirt, "Williams An Introduction to microelectromechanical systems engineering," 2nd ed., Artech House microelectromechanical library, 2004.
  13. G.M. Rebeiz and J.B. Muldavin, "RF MEMS Switches and Switch Circuits," *IEEE Microwave Magazine*, Vol. 1. – pp. 59-71, 2001.
  14. Z.D. Milosavljevic, "RF MEMS switches," *Mikrotalasna revija*, Vol. 10, № 1, pp. 2-8, 2004.
  15. L. Dussopt, G.M. Rebeiz, "Intermodulation distortion and power handling in RF MEMS switches, varactors, and tunable filters," *IEEE Transactions on MTT*, Vol. 51, № 4, pp. 1247-1256, 2003.
  16. R.F. Harrington, "Reactively controlled directive arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 26, pp. 390-395, 1978.
  17. S. Zhang, "A Pattern Reconfigurable Microstrip Parasitic Array: Theory, Design, and Applications," PhD dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2005.
  18. E. Kiely, G. Washington and J.T. Bernhard, "Design and development of smart microstrip patch antennas," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, No. 6, pp. 792-800, 1998.
  19. E. Kiely, G. Washington and J.T. Bernhard "Design, actuation, and control of active patch antennas," *SPIE International Society for Optical Engineering*, Vol. 3328, pp. 147-155, 1998.
  20. J.T. Bernhard, E. Kiely and G. Washington, "A smart mechanically-actuated two-layer electromagnetically coupled microstrip antenna with variable frequency, bandwidth, and antenna gain," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 49, pp. 597-601, 2001.
  21. J. Costantine, Y. Tawk, J. Woodland, N. Floam and C.G. Christodoulou, "Reconfigurable antenna system with a movable ground plane for cognitive radio," *IET Microw., Antennas Propag.*, early access, 2014.
  22. D.M. Poza, and V. Sanchez "Magnetic tuning of a microstrip antenna on a ferrite substrate," *Electronics Letters*, Vol. 24, pp. 729-731, 1988.
  23. J. Perruisseau-Carrier, M. Tamagnone, J.S. Gomez-Diaz, M. Esquius-Morote, and J.R. Mosig, "Resonant and leaky-wave reconfigurable antennas based on graphene plasmonics," *Int. Symp. Antennas Propag.*, pp. 136-137, 2013.
  24. L. Liu and R.J. Langley, "Liquid crystal tunable microstrip patch antenna," *IET Electron. Lett.*, Vol. 44, No. 20, pp. 1179-1180, 2008.
  25. F.N. Ayoub, "Frequency-tunable patch array using highly anisotropic liquid crystal," *IEEE Int. Symp. Antennas Propag.*, 2014.
  26. B.T. Perry, C.M. Coleman, B.F. Basch et al., "Self-structuring antenna for television reception," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 162-165, 2001.
  27. D. Langoni, M.H. Weatherspoon, E. Ogunti, and S.Y. Foo, "An overview of reconfigurable antennas: Design, simulation, optimization," *IEEE 10th Annu. Wireless Microw. Technol. Conf.*, pp. 1-5, 2009.
  28. F.C. Jain and R. Bansal "Monolithic semiconductor antennas for millimeter wave Si and GaAs integrated circuit technologies," *Int. Journal of Infrared and Millim. Waves*, Vol. 6, No 2, pp. 141, 1985.
  29. A. Fathy, A. Rosen, H. Owen, F. McGint et al., "Silicon-based reconfigurable antennas - Concepts, analysis, implementation, and feasibility," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 51, pp. 1650-1661, 2003.
  30. A. Dreher, N. Niklasch, F. Klefenz and A. Schroth "Antenna and receiver system with digital beamforming for satellite navigation and communications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 51, No. 7, pp. 1815-1821, 2003.
  31. J.A. Navaro, K. Chang "Integrated Active Antennas and Spatial Power Combining," New York: John Wiley & Sons, 368 p., 1996.
  32. J. Lin and T. Itoh, "Active integrated antennas," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-42, pp. 2186-2194, 1994.
  33. B. Robert, T. Razban and A. Papiernik, "Compact amplifier integration in square patch antenna," *Electron. Lett.*, Vol. 28, No. 19, pp. 1808-1810, 1992.
  34. В.В. Панов, А.П. Саркисян, "Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения," *Зарубежная радиоэлектроника*, № 10, 11, 12. – с. 3-11, 1993.
  35. G.V. Eleftheriades and K. G. Balmain, "Negative-Refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications," Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2005.
  36. Электронный ресурс: [http://itc.ua/articles/antenny\\_dlya\\_mobilnyh\\_primenenij\\_itogi\\_budu\\_shhego\\_45853/](http://itc.ua/articles/antenny_dlya_mobilnyh_primenenij_itogi_budu_shhego_45853/)
  37. I.F. Akyildiz, F. Brunetti, and C. Blázquez, "Nanonetworks: A new communication paradigm," *Comput. Netw.*, Vol. 52, No. 12, pp. 2260-2279, 2008.
  38. C. Liaskos, A. Tsioliaridou, A. Pitsillides et al. "Design and Development of Software Defined Metamaterials for Nanonetworks," *IEEE Circuits and systems magazine*, pp. 12-25, 2015.
  39. N.I. Zheludev and Y.S. Kivshar, "From metamaterials to metadevices," *Nat. Mater.*, Vol. 11, No. 11, pp. 917-924, 2012.
  40. K. Fan, X. Zhao, J. Zhang, K. Geng, et al., "Optically tunable terahertz metamaterials on highly flexible substrates," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, Vol. 3, No. 6, pp. 702-708, 2013.
  41. H.-S. Wong and D. Akinwande, "Carbon Nanotube and Graphene Device Physics," Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011.
  42. A. Vakil and N. Engheta, "Transformation optics using graphene," *Science*, Vol. 332, No. 6035, pp. 1291-1294, 2011.
  43. G. Poilasne, P. Pouliguen, K. Mahdjoubi, C. Terret et al. "Radiation characteristics of and half wavelength dipole inside metallic photonic band gap structure," *Antennas Propagat. Soc.*, Atlanta, GA, 1998.
  44. D. Rodrigo, E. Diaz and L. Jofre "Reconfigurable Pixel-Layer Isolator for Frequency-Tunable On-Frequency Repeaters," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 13, pp. 475-478, 2014.
  45. W.T. Slingsby and J. McGeehan, "Antenna isolation measurements for on-frequency radio repeaters," *9th Int. Conf. Antennas Propag.*, Vol. 1, pp. 239-243, 1995.
  46. P. Larsson and M. Prytz, "MIMO on-frequency repeater with self-interference cancellation and mitigation," *69th IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 1-5, 2009.
  47. Y. Rikuta, H. Arai, and Y. Ebine, "Mutual coupling suppression of two dipole antennas backed by optimized reflector," *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, Vol. 2, pp. 276-279, 2002.
  48. S.-J. Kim, F.J. Harackiewicz, M.-J. Park, T. Kim et al. "Isolation enhancement between two closely mounted antennas for indoor repeater systems," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol. 53, No. 3, pp. 697-700, 2011.
  49. F. Zhu, J. Xu, and Q. Xu, "Reduction of mutual coupling between closely-packed antenna elements using defected ground structure," *3rd IEEE Int. Symp. Microw., Antenna, Propag. EMC Technol. Wireless Commun.*, pp. 1-4, 2009