УДК 621.396.67

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ АНТЕНН

Я. Г. СИДОРОВ, А. И. ЛУЧАНИНОВ

На основе аналитического обзора литературных источников рассмотрено современное состояние техники реконфигурируемых антенн. Предложена классификация реконфигурируемых антенн по влиянию изменения электрической конфигурации излучающей системы на параметры антенны, а также по типу управляющих элементов.

On the basis of the analitical review of references state-of-the-art engineering of reconfigurable antennas is surveyed. Classification of reconfigurable antennas on effect of a modification of the electrical pattern of a radiating system on the parameters of the antenna is offered, and also as control elements.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрос интерес к реконфигурируемым антеннам, идея функционирования которых заключается в изменении распределения тока в излучающей структуре (ИС) для изменения параметров антенны, таких как рабочая полоса частот, характеристика направленности, входной импеданс и поляризационные свойства. Одной из областей применения данного типа антенн являются беспроводные технологии передачи данных и доступа в Интернет. В ближайшем будущем различные мобильные устройства должны будут обеспечивать поддержку шести или более технологий, таких как Wi-Fi в разных вариациях, WiMAX, 3G, UWB, Bluetooth, DVB и GPS. Это может быть обеспечено применением реконфигурируемых антенн, возможности которых позволят мобильным устройствам работать с многочисленными протоколами беспроводной передачи данных. Технология таких антенн, в частности, разрабатывается в исследовательском центре компании Intel, и через несколько лет ее развитие может привести к выпуску ноутбуков с интегрированной на уровне платформы поддержкой большого количества беспроводных стандартов, что было продемонстрировано в докладе компании на пекинском форуме IDF Spring 2007 [1]. В рамках этого форума демонстрировался опытный образец радиочастотного модуля для системы с одной реконфигурируемой антенной, поддерживающей технологии IEEE 802.11 (версии a, b и g) и WiMAX (в диапазоне 3,5 ГГц). Одной из наиболее сложных является задача обеспечения наилучшего соотношения сигнал/шум, для чего предлагается использовать в конструкции антенны микроконтроллеры на базе технологии MEMS, которые позволяют формировать необходимое распределение тока в ИС.

1. ТИПЫ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ АНТЕНН

Под реконфигурируемой антенной будем понимать устройство, в состав которого входят излучающая структура и сосредоточенные элементы с управляемыми характеристиками, наличие которых позволяет изменять распределение тока в ИС и, как результат, характеристики антенны (входной импеданс, характеристику направленности, рабочую полосу частот и т.п.).

Реконфигурируемые антенны являются частным случаем реконфигурируемых систем, рассматриваемых в [2], где было предложено разделить такие системы на статически и динамически реконфигурируемые. Согласно этой идеологии к динамически реконфигурируемым антеннам можно отнести устройства с обратной связью (например, самоструктурируемые антенны [3-7]), которые позволяют автоматически изменять свои характеристики в процессе функционирования, а к статически реконфигурируемым антеннам – устройства без обратной связи, т.е. такие, изменение характеристик которых производится при поступлении команды на изменение электрической конфигурации.

В настоящее время известно довольно большое число разработок реконфигурируемых антенн, поэтому представляется целесообразным классифицировать антенны рассматриваемого типа по определенным признакам.

В результате изменения электрической конфигурации антенны могут изменяться входной импеданс, поляризационные характеристики, характеристика направленности и, в общем случае, рабочая полоса частот, в пределах которой другие параметры антенны не выходят за пределы допусков, установленных техническим заданием. Зачастую, в реконфигурируемых антеннах одновременно изменяются несколько параметров, например, характеристика направленности, и параметры, характеризующие рабочую полосу частот, такие как ширина рабочей полосы частот, рабочая частота и диапазон частот (если антенна является многодиапазонной), поэтому возможно выделить такие антенны в отдельный класс. В пределах этого класса антенн для обеспечения требований различных систем в частном случае может требоваться изменение только одного из этих параметров при неизменности второго (например, требуется изменение рабочей частоты либо характеристики направленности при постоянстве остальных параметров).

Управляющие элементы, при помощи которых производится изменение электрической конфигурации антенны, можно условно разделить на две группы – управляющие элементы механического типа (переключатели) и электрического типа (элементы с управляемым импедансом). К управ-

ляющим элементам механического типа можно отнести переключатели, основанные на технологии MEMS, к управляющим элементам электрического типа относятся переключающие PIN-диоды, варикапы и полевые транзисторы, а также переключатели на основе фотоэффекта (фоторезистивные элементы).

Предложенная классификация приведена на рис. 1. Она является далеко не исчерпывающей, и существует еще много других способов классифицировать рассматриваемые системы.

В следующем разделе будут кратко рассмотрены примеры реализации каждого типа реконфигурируемых антенн. Следует отметить, что, как было указано выше, в результате изменения электрической конфигурации антенны может изменяться не один, а несколько параметров, поэтому одна и та же антенна может быть отнесена к нескольким типам реконфигурации.

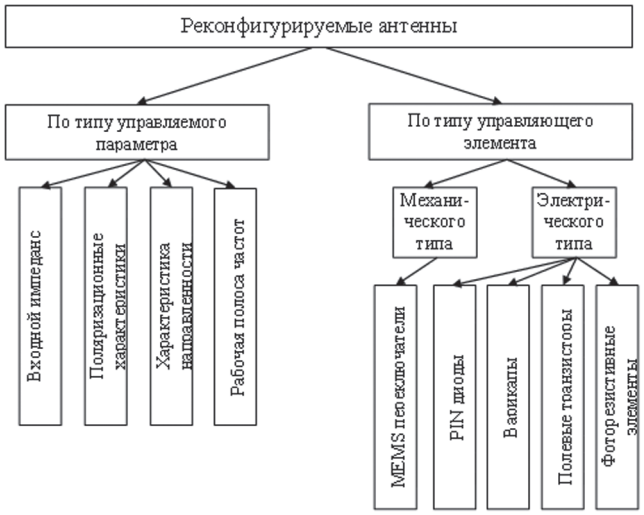


Рис. 1. Классификация реконфигурируемых антенн

2. ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ АНТЕНН

2.1. Примеры антенн, классифицированных по типу управляемого параметра

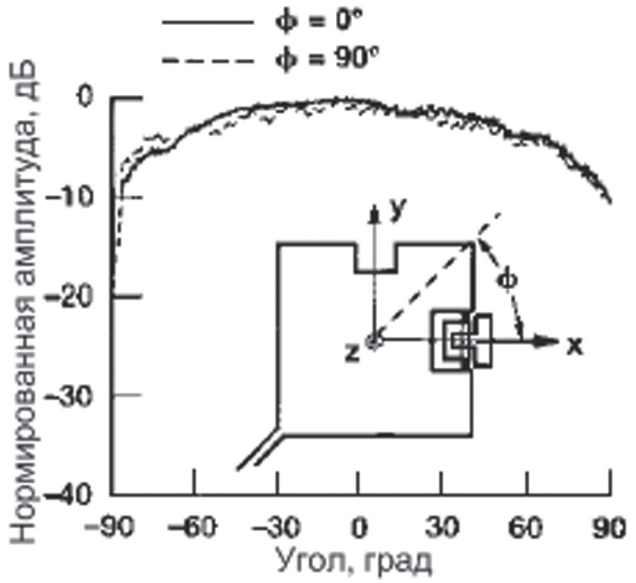
К антеннам с изменяемым входным импедансом можно отнести конструкции, предложенные в [8] и [9], в которых одна из групп переключателей предназначена для обеспечения согласования входного импеданса антенны на заданных рабочих частотах, а другая – для изменения соответственно рабочей полосы частот и характеристики направленности. Так, например, в трехдиапазонной микрополосковой щелевой реконфигурируемой антенне с двумя группами MEMS-переключателей [8], предназначенной для работы в диапазонах GSM 1800 МГц и 1900 МГц и в частотном диапазоне Bluetooth 2400 МГц, одна группа MEMS-переключателей предназначена для обеспечения переключения диапазонов рабочих частот, а вторая группа – для обеспечения согласования входного сопротивления антенны.

Примерами антенн с управляемыми поляризационными характеристиками могут служить микрополосковая антенна прямоугольной формы с реконфигурируемым щелевым излучателем для систем беспроводной связи [10] и прямоугольная микрополосковая антенна, у которой поляризация на фиксированной частоте может изменяться с круговой на линейную (рис.2) при помощи интегрированных в структуру антенны MEMS-переключателей [11].

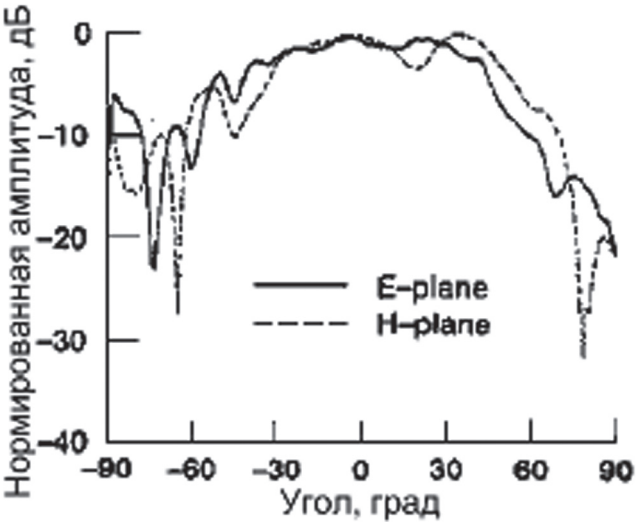
К антеннам с изменяемыми рабочим диапазоном частот и характеристикой направленности можно отнести реконфигурируемые антенны, описанные в [9, 12-14]. В качестве примера рассмотрим реконфигурируемую микрополосковую антенну, интегрируемую в общую структуру ноутбука, допускающую изменение как характеристики направленности, так и рабочей частоты, в качестве управляющих элементов которой использованы MEMS-переключатели [12]. Реконфигурируемая антенна в данном примере представляет собой квадратную микрополосковую спираль, имеющую один виток (рис. 3), расположенную над экраном. Общая длина спирали составляет 80 мм, и определяется приблизительно одной длиной волны при желаемой базовой рабочей частоте. Первым элементом управления является расположенный на расстоянии приблизительно равном четверти длины волны от точки питания переключатель, во включенном состоянии (G) замыкающий спираль на экран; вторым элементом управления является переключатель, размыкающий спираль в выключенном состоянии (O). При включении первого переключателя и выключении второго (GO-конфигурация) антенна ведет себя в большей степени как короткозамкнутый четвертьволновой резонатор с паразитным элементом (оставшаяся секция спирали), способствующим поддержанию согласования входного импеданса и созданию отклоненной на 450 диаграммы направленности (рис. 4). Для изменения рабочей частоты антенны активируется только второй переключатель (NO-конфигурация), при этом антенна работает как разомкнутый одноволновый резонатор, что приводит к сдвигу рабочей частоты с 3,7 ГГц к 6 ГГц.

К антеннам с управляемыми диапазоном частот и, в частности, рабочей частотой относятся реконфигурируемые антенны, предложенные в [8, 10, 15, 16, 17-25]. В качестве первого примера можно привести двухдиапазонную реконфигурируемую антенну-диполь с MEMS-переключателями в качестве управляющих элементов, работающую на частотах 4,86 ГГц (коэффициент отражения равен -10,2 дБ) и 8,98 ГГц (коэффициент отражения равен -21,6 дБ) [17]. Вторым примером является двухдиапазонная реконфигурируемая антенна, представляющая собой антенную решетку размером 3x3 из микрополосковых излучателей прямоугольной формы, соединенных между собой MEMS-переключателями, что позволяет антенне изменять электрическую конфигурацию в тече-

ние нескольких микросекунд в соответствии с заданными требованиями для обеспечения работы различных систем в диапазонах частот 1-2 ГГц и 8-12,5 ГГц [18]. Также в качестве примеров можно привести широкополосную реконфигурируемую микрополосковую антенну прямоугольной формы с полосами рабочих частот 18 ГГц и 28 ГГц для спутниковых систем [19] и реконфигурируемые по частоте от 770 ГГц до 1570 ГГц (рис.5) миниатюрные трехмерные фрактальные антенны в виде «деревьев» [20]. Еще одним примером реконфигурируемых антенн с изменяемой рабочей частотой является многочастотная фрактальная антенна, элементы которой соединяются или разъединяются при помощи MEMS-переключателей для достижения большего количества резонансов, в качестве основы для которой выбрана классическая фрактальная антенна Серпинского [21].



а



б

Рис. 2. Диаграммы направленности антенны при круговой поляризации (*а*) и линейной вертикальной поляризации (*б*) [11]

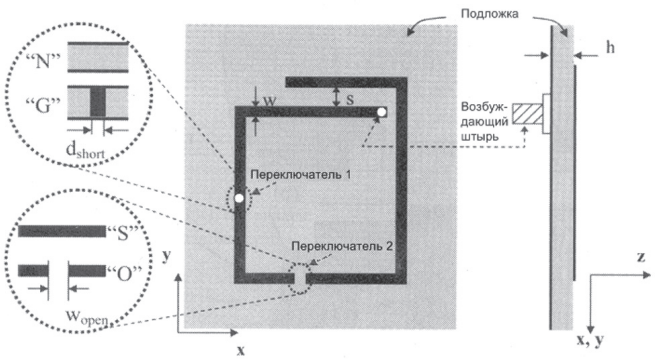
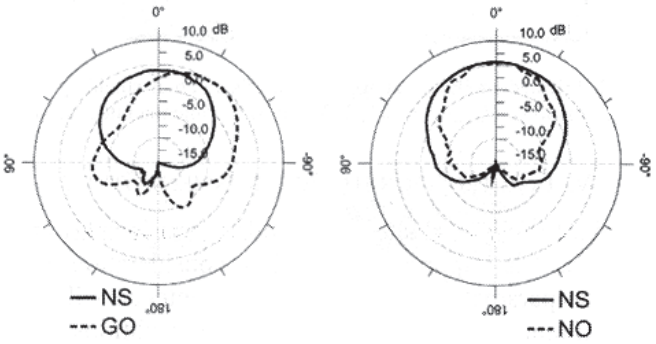


Рис. 3. Реконфигурируемая антенна с элементами управления [12]



а *б*

Рис. 4. Диаграммы направленности антенны для конфигураций с изменяемой диаграммой направленности (*а*) и частотой (*б*) [12]

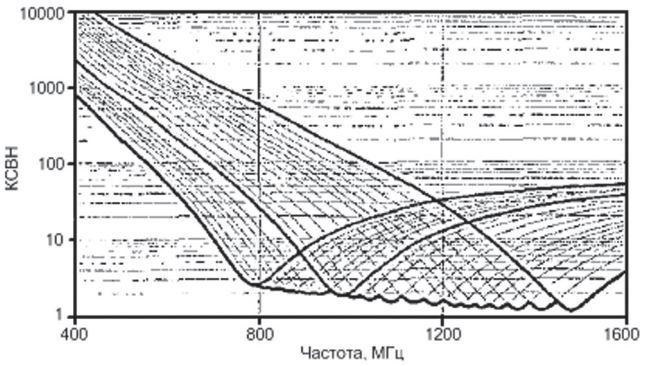


Рис.5. Зависимости КСВН от частоты для каждого состояния антенны в процессе реконфигурации [20]

К антеннам с управляемой характеристикой направленности можно отнести реконфигурируемые антенны, описанные в [26-33]. В качестве первого примера можно привести реконфигурируемые микрополосковые антенны для миллиметровых волн с изменяемой характеристикой направленности, представляющие собой решетки из 4-х элементов, работающие в диапазоне 24 ГГц [26]. Вторым примером является антенна для беспроводных устройств с изменяемой характеристикой направленности, работающая на частоте 2,4 ГГц [27]. Она представляет собой решетку размером 11×11 элементов, расположенную над экраном, находящимся с обратной стороны подложки, состоящую из 121 микрополоскового излучателя прямоугольной формы и 204 переключателей, 200 из которых соединяют излучатели, а оставшиеся 4 –

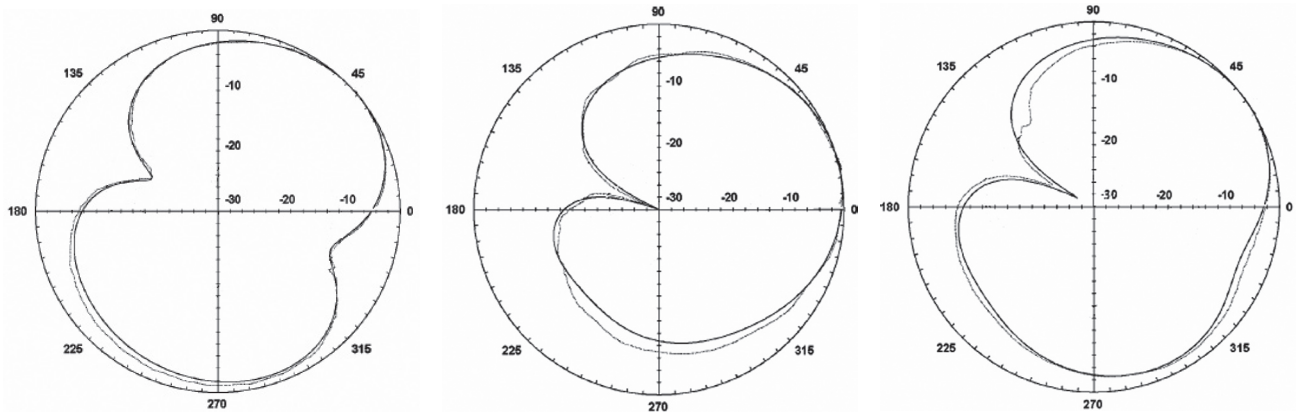


Рис. 6. Диаграммы направленности для различных электрических длин спирали, полученные в результате моделирования и путем экспериментальных измерений [28]

во включенном состоянии осуществляют замыкание на экран. Следующим примером является спиральная прямоугольная антенна, реконфигурируемая с помощью MEMS-переключателей, интегрированных на общую со спиралью подложку с малыми потерями [28]. Изменение распределения тока, приводящее к изменению характеристики направленности (рис. 6), достигается изменением электрической длины спирали. Эта антенна обеспечивает коэффициент усиления в пределах 3...6 дБ.

2.2. Примеры антенн, классифицированных по типу управляющего элемента

К антеннам с управляющими элементами механического типа можно отнести реконфигурируемые антенны с MEMS-переключателями, рассмотренные в [8, 10-12, 14, 15, 17, 18, 21, 24, 25, 28, 29, 32, 34].

Примером реконфигурируемой антенны с интегрированными в излучающую структуру MEMS-переключателями служит антенна типа «волновой канал» (рис.7), имеющая рабочую частоту равную 5,78 ГГц при разомкнутых переключателях и 2,4 ГГц – при замкнутых переключателях [25].

а *б*

Рис. 7. Реконфигурируемая антенна типа «волновой канал» [25]: *а* — переключатели разомкнуты (f = 5,78 ГГц); *б* — переключатели замкнуты (f = 2,4 ГГц)

Другим примером реконфигурируемой антенны с MEMS-переключателями является микрополосковая квадратная спиральная антенна [29], содержащая в своей структуре согласующие элементы (рис. 8), с возможностью изменения характеристики направленности. По принципу действия она подобна рассмотренной ранее антенне, предложенной в [12]. Еще одним примером является реконфигурируемая антенна с микрополосковым излучателем прямоугольной формы, использующая MEMS-переключатели для переключения между рабочими частотами 25 ГГц и 24,6 ГГц [24]. Она разработана таким образом, чтобы размеры антенного элемента при изменении частоты не увеличивались, что позволяет использовать его в фазированных антенных решетках.

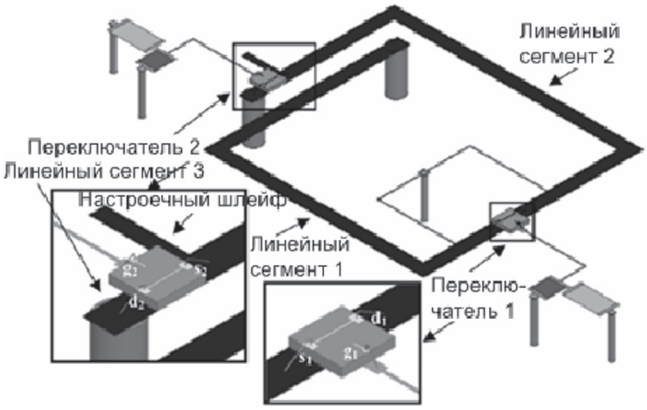


Рис. 8. Реконфигурируемая антенна с интегрированными MEMS-переключателями и согласующими цепями [29]

К антеннам с управляющими элементами электрического типа можно отнести антенны, предложенные в [9, 10, 13, 14, 16, 22, 23, 30-33]. Их, в свою очередь, можно разделить на четыре группы по виду управляющих элементов, в качестве которых могут выступать PIN-диоды [9, 10, 23, 30-32], варикапы [22, 33], полевые транзисторы [14, 16] и фоторезистивные элементы [13].

Рассмотрим примеры антенн, относящиеся к первой группе. В качестве первого примера приведем щелевую реконфигурируемую антенну с изменяемыми характеристикой направленности и рабочей частотой, у которой щелевой излучатель имеет форму круга и в качестве управляющих элементов используются PIN-диоды [9]. В изготовленной антенне излучающая структура находится на одной стороне диэлектрической подложки, а микрополосковая линия питания и согласующая цепь – на другой (рис. 9). Центральная рабочая частота антенны равна 5,8 ГГц, и путем реконфигурации согласующей цепи она изменяется до значений 5,2 ГГц и 6,4 ГГц (рис. 10). PIN-диоды, установленные на соответствующих позициях (±450) (рис. 11), используются для реализации короткого замыкания щели и, тем самым, изменения характеристики направленности антенны (рис. 12).

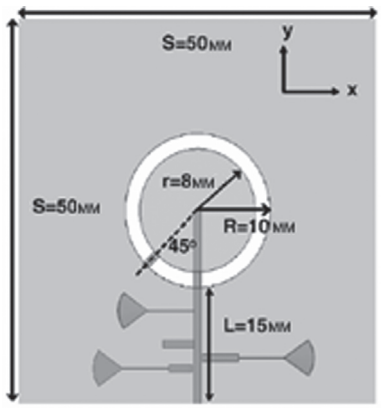


Рис. 9. Эскиз щелевой антенны [9]

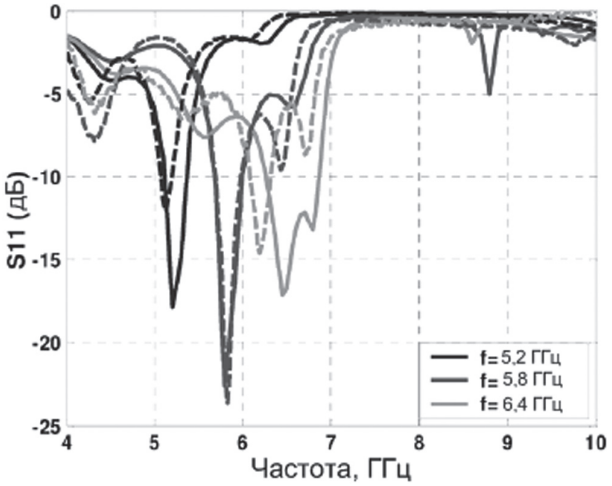


Рис. 10. Результаты моделирования (сплошная линия) и измерений (пунктирная линия) коэффициента отражения для трех различных частот [9]

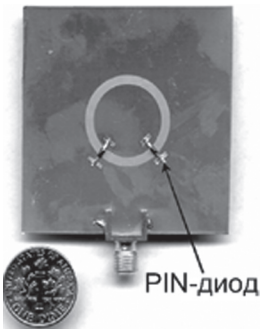


Рис. 11. Фотография лицевой части изготовленной кольцевой щелевой антенны [9]

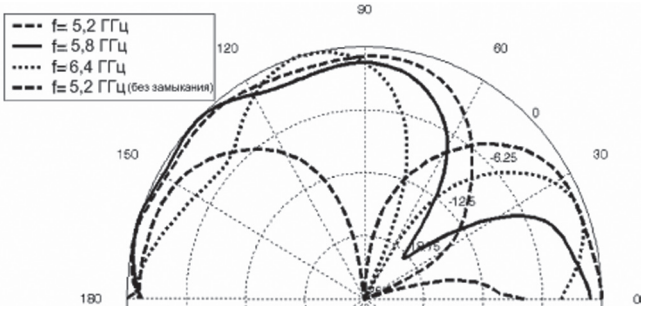


Рис. 12. Диаграммы направленности для случая, когда щелевой излучатель замыкается диодом, расположенным на позиции 2250 [9]

Другим примером реконфигурируемой щелевой антенны с PIN-диодом в качестве управляющего элемента может служить резонансная щелевая структура с размером, равным половине длины волны на частоте 600 МГц, нагруженная на ряд переключательных PIN-диодов, переключение рабочей частоты которой осуществляется изменением распределения тока путем изменения электрической длины этой структуры [23]. Данная антенна имеет четыре резонансных частоты в диапазоне 550-900 МГц, на которых было достигнуто хорошее согласование (коэффициент отражения от входа не более –15 дБ), не требующее применения специальных согласующих цепей.

Концепция, основанная на использовании полупроводниковой подложки для создания поверхностных PIN-диодов, предназначенных для изменения распределения тока в антенне, предложена в [30] и [31]. Разработанные реконфигурируемые антенны имеют фиксированные частоты, 7,9 ГГц и 33,5 ГГц соответственно, и предоставляют возможность управления характеристикой направленности.

Антенны, в которых в качестве управляющих элементов выступают варикапы предложены в [22] и [33]. В двухдиапазонной щелевой антенне с изменяемой частотой реконфигурация обеспечивается двумя варикапами [22], расположенными вдоль щели (рис. 13), и рабочие частоты зависят не только от значений емкостей, но и от расположения варикапов на щели. В предложенной антенне использованы два одинаковых варикапа, значения емкостей которых варьируются от 0,5 пФ до 2,5 пФ, при этом обеспечивается два диапазона рабочих частот антенны — от 1,1 ГГц до 1,5 ГГц и от 1,7 ГГц до 2,9 ГГц (рис.14). Суммарная длина щели составляет 62 мм, размеры подложки – 15×11 см, толщина подложки – 0,5 мм.

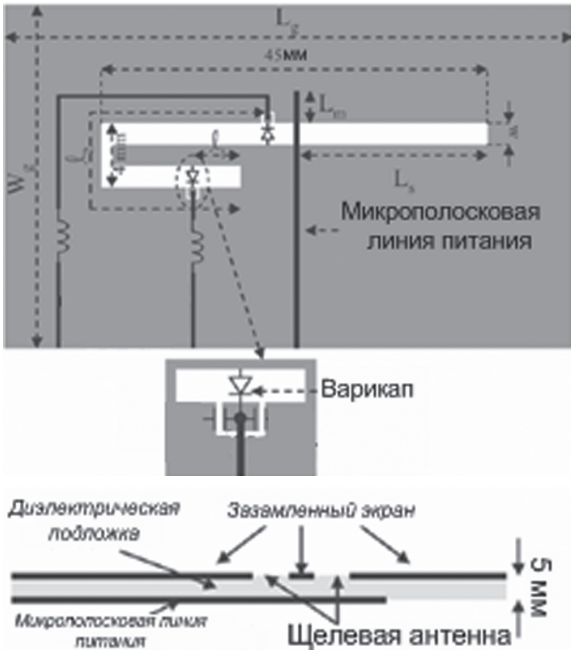
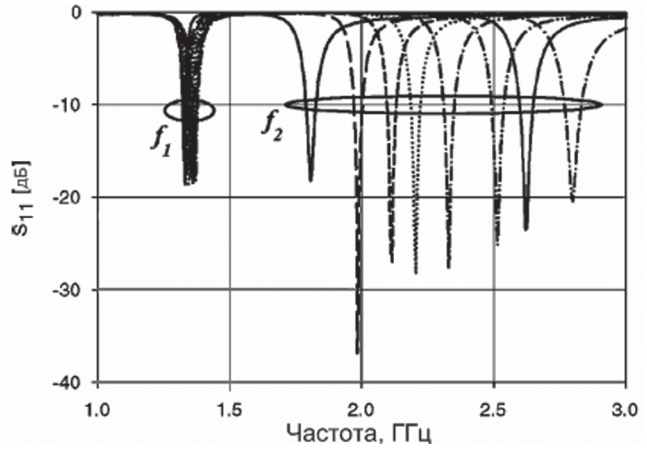
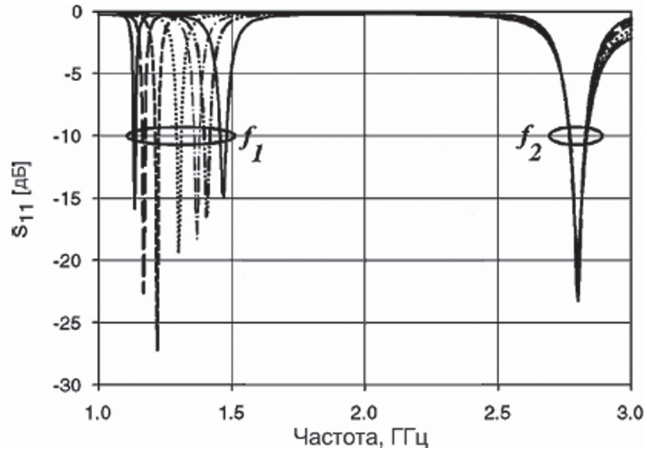


Рис. 13. Двухдиапазонная щелевая антенна с двумя варикапами в качестве управляющих элементов (вид сверху и сбоку соответственно) [22]



а



б

Рис.14. Зависимость коэффициента отражения от частоты для двухдиапазонной перестраиваемой щелевой антенны (рис. 13): *а* — рабочая частота в первом диапазоне рабочих частот фиксирована, а рабочая частота во втором диапазоне рабочих частот – изменяется; *б* — рабочая частота в первом диапазоне рабочих частот изменяется, а во втором – фиксирована [22]

Другим примером антенн с варикапами в качестве управляющих элементов является антенна вытекающей волны [33], реализованная с помощью структуры электронно-управляемой линии передачи (ЛП) на подложке из метаматериала (рис.15), в которой предусмотрена возможность регулировки угла излучения и ширины диаграммы направленности. Эта структура предоставляет возможность сканирования по углу на фиксированной частоте, что достигается модуляцией емкостей структуры при помощи регулировки напряжения обратного смещения, приложенного к варикапам. Регулировка ширины диаграммы направленности достигается за счет неоднородности структуры, образующейся при подаче на варикапы напряжения смещения с неоднородным распределением. Предложенная структура антенны, включающая в себя последовательно и параллельно включенные варикапы для оптимального согласования импедансов и максимального диапазона перестройки, содержит 30 ячеек. Реализованный прототип демонстрирует возможности непрерывного сканирования в диапазоне от 500 до –500 путем изменения напряжения обратного смещения от 0 до 21 В при работе на частоте 3,33 ГГц (рис. 16).

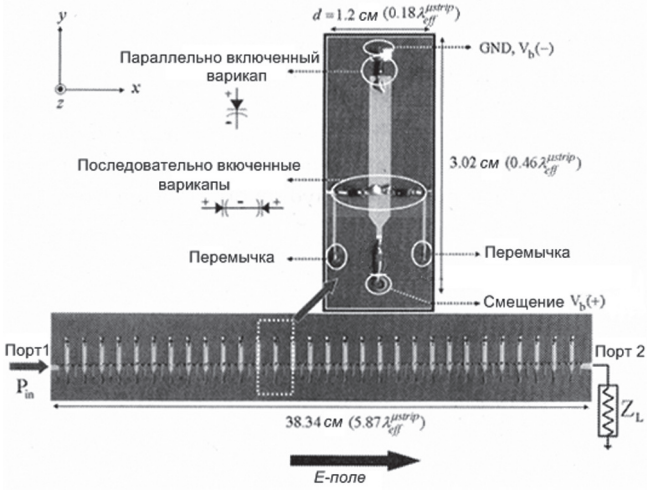


Рис. 15. Прототип 30-элементной управляемой напряжением структуры ЛП, на котором также показано увеличенное изображение одной ячейки. Поляризация Е-поля вдоль направления оси *x* [33]

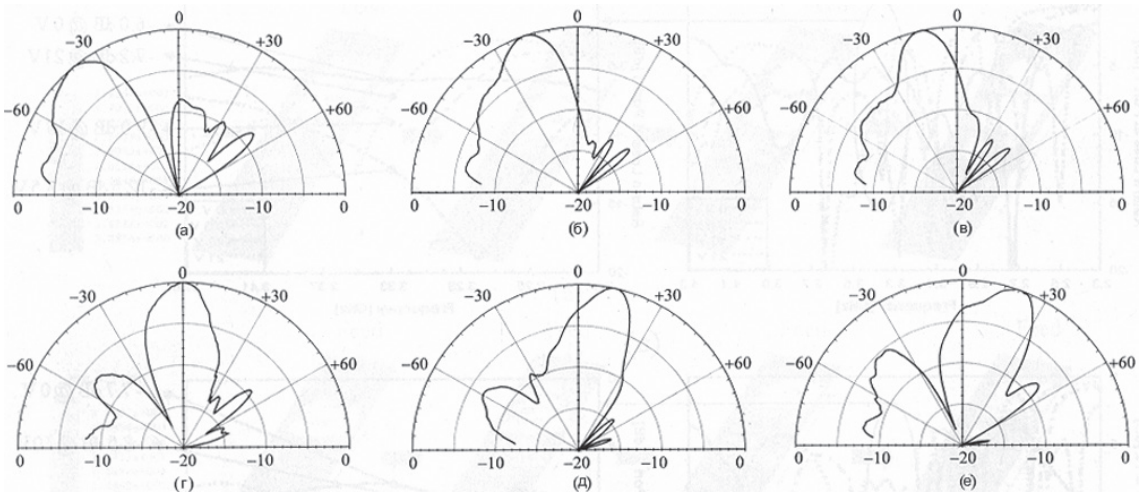


Рис. 16. Диаграммы направленности в Е-плоскости (масштаб – в дБ) при различных напряжениях обратного смещения: V = 18 В (*а*); 10 В (*б*); 8 В (*в*); 3,5 В (*г*); 2 В (*д*); 1,5 В (*е*) [33]

Примером реконфигурируемой антенны с полевыми транзисторами в качестве управляющих элементов может служить рассматриваемая в [14] конструкция. В ней использование полевых транзисторов позволяет переключаться между широкополосным режимом с малым усилением и узкополосным режимом с большим усилением, управлять характеристикой направленности. Для получения требуемой конфигурации используется алгоритм генетического поиска наилучшего решения по заданному критерию (например, обеспечение заданного коэффициента усиления в узкой полосе частот). В процессе анализа авторами было определено, что наибольшее влияние на рабочую полосу частот оказывает емкость переключателей (исследовались переключатели на полевых транзисторах с емкостью 45 пФ), которая ограничивает верхнюю рабочую частоту на уровне примерно 1,75 ГГц.

К реконфигурируемым антеннам с управляющими фоторезистивными элементами можно отнести предложенную в [13] антенну с кремниевыми фоторезистивными переключателями (рис. 17), у которой могут изменяться рабочая частота и характеристика направленности. В излучающей системе используется печатный диполь, на каждом плече которого расположено по одному фоторезистивному переключателю, каждый из которых облучается светом инфракрасного лазера. Антенна имеет три резонансных частоты – 2,26 ГГц (оба переключателя замкнуты), 2,7 ГГц (один переключатель замкнут, второй – разомкнут), 3,15 ГГц (оба переключателя разомкнуты). Получен коэффициент отражения от входа не более –7 дБ и коэффициент усиления не менее 1 дБ во всем диапазоне рабочих частот. Изменение характеристики направленности достигается при работе на частоте 2,7 ГГц, когда один из переключателей замкнут, а второй – разомкнут (рис. 18).

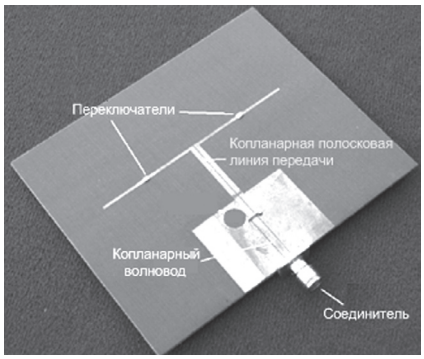


Рис. 17. Фотография реконфигурируемой антенны с фоторезистивными управляющими элементами [13]

2.3. Самоструктурируемые антенны

Самоструктурируемые антенны (ССА) являются устройствами, объединяющими в своем составе реконфигурируемые антенны и систему управления. ССА, предложенные в [3-7], представляют собой совокупность проводников, которые связаны между собой переключателями, управляемыми микропроцессором (рис. 19). Качество функционирования ССА определяется 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.

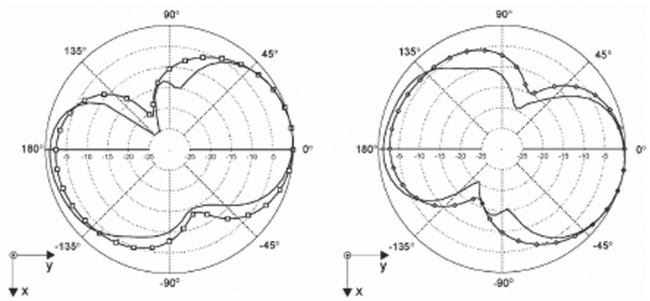


Рис. 18. Диаграммы направленности в Е-плоскости реконфигурируемой антенны с фоторезистивными управляющими элементами (рис. 18), работающей на частоте 2,7 ГГц при замыкании переключателей соответственно в левом и правом плечах диполя [13]

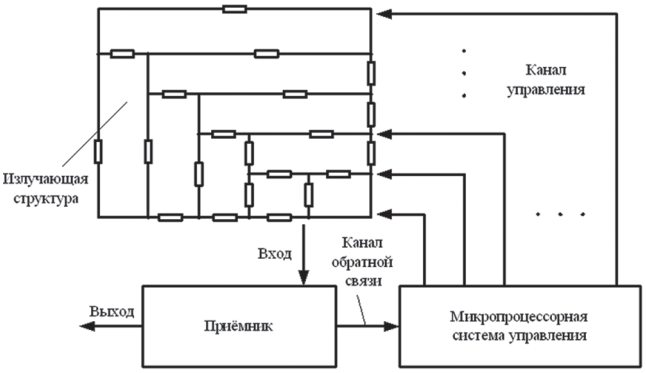


Рис.19. Блок-схема ССА [3]

Самоструктурируемые антенны имеют специфические свойства, которые могут быть использованы для решения разнообразных прикладных задач [3]. На основе концепции ССА могут быть реализованы широкополосные антенны, мобильные и приспосабливаемые антенны, произвольно расположенные антенны, непроектируемые антенны и жизнестойкие антенны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье на основании аналитического обзора современного состояния техники реконфигурируемых антенн предлагается их классификация и приводятся примеры антенн в соответствии с этой классификацией. Антенны данного типа в настоящее время являются перспективными, однако, наряду со значительными успехами в области изучения и разработки таких антенн, остается ряд нерешенных вопросов, что не позволяет

в полной мере раскрыть их возможности. К ним, в частности, относятся:

1) Отсутствие математической модели, учитывающей свойства управляющих элементов, которые в общем случае являются нелинейными, что оказывает влияние на характеристики всей системы. Автору известна лишь одна работа, в которой рассмотрена довольно частная модель, описывающая это влияние [35]. Общая математическая модель антенны с нелинейными элементами, предложенная в статьях [36] и [37], является довольно сложной, и для ускорения процесса поиска требуемой конфигурации она нуждается в доработке, целью которой является увеличение эффективности данной модели.

2) Отсутствие процедуры оптимального выбора формы излучающей системы и места включения переключающих элементов. Эта задача может быть решена на основе методик, предложенных в [38-42] для оптимизации тонкопроволочных антенн малых размеров с использованием генетических алгоритмов. Вопрос разработки подобных методик для проектирования реконфигурируемых антенн представляет интерес и является одним из ключевых для дальнейших исследований.

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору Я.С. Шифрину за полезные советы, способствовавшие улучшению качества работы.

Литература.

[1] *Ягофаров Т.* IDF Spring 2007: репортаж из столицы Поднебесной // Компьютерное Обозрение. 2007. № 17-18 (586). С. 24-39.

[2] System level design of reconfigurable systems-on-chip / Nikolaos S. Voros, Konstantinos Masselos. Springer, 2005. 232 p.

[3] *Coleman C.M., Rothwell E.J., Ross J.E., Nagy L.L.* Self-structuring antennas // IEEE Antenna's and Propagation Magazine. 2002. Vol. 44, N 3. P. 11-22.

[4] *Perry B. T., Coleman C. M., Basch B. F. et al.* Self-structuring antenna for television reception // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001. P. 162-165.

[5] *Perry B. T., Coleman C. M., Rothwell E.J. et al.* Effect of switch failure on the performance of a self-structuring antenna // IEEE AP-S International Symposium and URSI Radio Science Meeting. 2002.

[6] *Perry B.T., Nanzer J.A., Rothwell E.J. et al.* A comparison of several self-structuring antenna templates // IEEE AP-S International Symposium and URSI Radio Science Meeting. – 2003.

[7] *Rothwell E. J., Ross J. E., Preschutti S.* A complimentary self-structuring sntenna for use in a vehicle environment // IEEE AP-S International Symposium and URSI Radio Science Meeting. 2004. P. 2321-2324.

[8] *Onat S., Alatan L., Demir S.* Design and implementation of a triple-band re-configurable microstrip antenna // Proceedings of the 1st European Microwave Integrated Circuits Conference, Manchester (UK). 2006. P. 326-329.

[9] *Nikolaou S., Bairavasubramanian R., Lugo C.* Pattern and frequency reconfigurable annular slot antenna using PIN diodes // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, N 2. P. 439-448.

[10] *Yang F., Rahmat-Samii Y.* Patch antenna with switchable slots (PASS): reconfigurable design for wireless communications // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2002. P. 462-465.

[11] *Simons R. N., Chun D., Katehi Linda P.B.* Polarization reconfigurable patch antenna using microelectromechanical systems (MEMS) actuators // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2002. P. 6-9.

[12] *Huff G. H., Feng J., Zhang S. et al.* Directional reconfigurable antennas on laptop computers: simulation, measurement and evaluation of candidate integration positions // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004. Vol. 52, N 12. P. 3220-3227.

[13] *Panagamuwa C. J., Chauraya A., Vardaxoglou J. C.* Frequency and beam reconfigurable antenna using photoconducting switches // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, N 2. P. 449-454.

[14] *Pringle L. N., Friederich P. G., Blalock S. P. et al.* GTRI reconfigurable aperture design // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2002. P. 473-476.

[15] *Zhang C., Yang S., Pan H.K et al.* Development of reconfigurable mini-nested patches antenna for universal wireless receiver using MEMS // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2006. P. 205 – 208.

[16] *Cidronali A., Lucci. L., Pelosi G. et al.* A reconfigurable printed dipole for quad-band wireless applications // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2006. P. 217 – 220.

[17] *Kiriazi J., Ghali H., Ragaie H., Haddara H.* Reconfigurable dual-band dipole antenna on silicon using series MEMS switches // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2003. P. 403-406.

[18] *Weedon W. H., Payne W. J.* MEMS-switched reconfigurable antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001. P. 654-657.

[19] *Lee A.W.M., Kagan S.K., Wong M. et al.* Measurement and FEM modeling of a reconfigurable-patch antenna for use in wideband Gapfiller satellite system // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2003. P. 379-382.

[20] *Petko J. S., Werner D. H.* Reconfigurable miniature three dimensional fractal tree antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2003. P. 371-374.

[21] *Anagnostou D., Chryssomallis M. T., Lyke J. C., Christodoulou C. G.* Re-configurable Sierpinski gasket antenna using RF-MEMS switches // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2003. P. 375-378.

[22] *Behdad N., Sarabandi K.* Dual-band reconfigurable antenna with a very wide tunability range // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, N 2. P. 409-416.

[23] *Peroulis D., Sarabandi K., Katehi Linda P. B.* A planar VHF reconfigurable slot antenna // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001. P. 154-157.

[24] S*imons R. N., Chun D., Katehi Linda P.B.* Reconfigurable array antenna using microelectromechanical systems (MEMS) actuators // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001. P. 674-677.

[25] *Ali M. A., Wahid P. A.* Reconfigurable Yagi array for wireless applications // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2002. P. 466-468.

[26] *Caillet M., Lafond O., Himdi M.* Reconfigurable microstrip antennas in millimeter waves // IEEE MTT-S, International Microwave Symposium Digest. 2006. P. 638-641.

[27] *Chen W., Fan M., Hao Q., Feng Z.* A novel reconfigurable discrete antenna // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2003. P. 411-414.

[28] *Jung C. W., Lee M. J., Li G. P., De Flaviis F.* Reconfigurable scan-beam single-arm spiral antenna integrated with RF-MEMS switches // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, N 2. P. 455-463.

[29] *Huff G. H., Bernhard J. T.* Integration of packaged RF MEMS switches with radiation pattern reconfigurable square spiral microstrip antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol.54, N. 2. P. 464-469.

[30] *Yashchyshyn Y., Modelski J.* A reconfigurable leaky-wave microstrip antenna // European Microwave Week Conference Proceedings, Paris (France). 2005. P. 237-240.

[31] *Yashchyshyn Y., Modelski J.* Reconfigurable semiconductor antenna // CADSM'2007. – Polyana (Ukraine). 2007. P. 146-149

[32] *Yang S. S., Luk K.* Design of a wide-band L-probe patch antenna for pattern reconfiguration or diversity applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol.54, N 2. P. 433-438.

[33] *Lim S., Carloz C., Itoh T.* Metamaterial-based electronically controlled transmission-line structure as a novel leaky-wave antenna with tunable radiation angle and beamwidth // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2004. Vol. 52, N 12. P. 2678-2690.

[34] *Brown E. R.* On the gain of a reconfigurable-aperture antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2001. Vol. 49, N 10. P. 1357-1362.

[35] *De Flaviis F., Coccioli R., Itoh T.* Non Linear Analysis and Evaluation of Distortion Introduced by Micro Electromechanical Switches in Reconfigurable Antenna Systems // Proc. IEEE AP-S IEEE AP-S International Symposium, Davos, Switzerland. 2000.

[36] *Лучанинов А. И., Шифрин Я. С.* Математическая модель антенны с сосредоточенными нелинейными элементами // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 9. С. 3-21.

[37] *Шифрин Я. С., Лучанинов А. И., Посохов А. С.* Структурная модель антенны с нелинейными элементами // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2001. № 122. С. 22-34.

[38] *Altshuler E. E.* Electrically small self-resonant wire antennas optimized using a genetic algorithm // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2002. Vol. 50, N 3. P. 297-300.

[39] *Altshuler E. E., Linden D. S.* An ultrawide-band impedance-loaded genetic antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004. Vol. 52, N 11. P. 3147-3150.

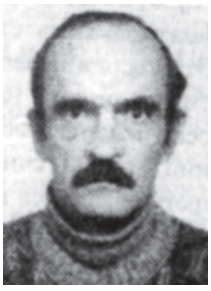
[40] *Werner D. H., Werner P.L., Church K. H. et al.* Genetically engineered dual-band fractal antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2001. Vol. 3. P. 628-631.

[41] *Pantoja M. F., Ruiz F. G., Bretones A. R. et al.* GA design of small wire antennas // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2004. Vol. 4. P. 4412-4415.

[42] *Pantoja M. F., Ruiz F. G., Bretones A. R. et al.* GA design of small thin-wire antennas: comparison with sierpinsky-type prefractal antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, N 6. P. 1879-1882.

Поступила в редколлегию 10.03.2008

Сидоров Ярослав Геннадьевич, аспирант кафедры ОРТ ХНУРЭ. Область научных интересов: антенны, нелинейные эффекты в электродинамике.



Лучанинов Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры ОРТ ХНУРЭ. Область научных интересов: прикладная электродинамика, теория антенн, нелинейные процессы в радиофизике.