

# Перспективные технологии антенных решеток мобильных терминалов спутниковой связи

Perspective technologies of the antenna arrays for mobile satellite communication terminals.

**Вадим Слюсар**, ЦНИИ вооружения и военной техники Вооруженных Сил Украины, д.т.н., профессор  
**Vadim Slyusar**, Principal Research Fellow of the Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine

**А**нализ многочисленных разработок перспективных систем спутниковой связи и их наземной инфраструктуры позволяет сделать вывод, что наиболее актуальными технологиями создания таковых в настоящее время являются цифровое формирование луча на основе цифровых антенных решеток (ЦАР) [1] и применение метаматериалов.

**A**nalysis of the numerous developments in the field of perspective satellite communication systems and their ground infrastructure makes us to conclude that nowadays the most topical technologies for their development are the digital beam forming on the base of digital antenna arrays (DAA) [1] and application of metamaterials.

Использование технологии ЦАР в наземных станциях систем спутниковой связи позволяет обеспечить:

- отслеживание девиаций пространственного положения спутника на орбите без механического вращения зеркала антенны наземной станции, что особенно важно для продления времени работы геостационарных спутников, которые после израсходования топлива для корректирующих двигателей начинают дрейфовать в окрестности расчетной точки, что не позволяет применять для бесперебойной связи с ними традиционные антенные системы;
- повышение пропускной способности каналов связи за счет снижения

потерь при приеме сигналов и увеличения отношения "сигнал/шум", достигаемого в результате когерентного накопления сигналов по полотну решетки;

- обеспечение помехоустойчивости связных каналов в случае возникновения искусственных помех из космоса и из воздуха.

## ЦАР в проекте SANTANA

### Первый этап

Применение ЦАР возможно не только на борту спутников, но и в составе абонентских терминалов. К примеру, германский проект SANTANA (Smart ANTenna terminal), выполнявшийся в 2001–2010 гг., был направлен на создание абонентской антенны с цифровым формированием лучей в интересах широкополосной спутниковой связи [1–5]. В проекте принимали участие Гамбургский технический университет, Институт коммуникации и навигации, Институт высокочастотной техники, а также компании EADS Astrium, IMST, DLR, INF и VIcon. Финансирование осуществлялось Министерством образования и исследований Германии (German Ministry for education and research).

Целью проекта явилась разработка демонстраторов приемной и передающей ЦАР Ка-диапазона (20/30 ГГц), предназначенных для использования в составе портативного терминала. Проект выполнялся в три этапа. В ходе первого были разработаны, изготовлены и исследованы 16-элементные приемные (рис. 1, 2) и передающие модули ЦАР структуры 4x4 элемента.

В аналоговом сегменте приемных и передающих каналов применялось двукратное преобразование частоты. Выходная промежуточная частота приемника равнялась 70 МГц, спектральная полоса сигнала – 20 МГц. Для аналого-цифрового преобразования принятых сигналов использовались 10-разрядные АЦП, по одному на каждый антенный элемент. Оцифровка сигнала производилась через 5/4 периода его второй промежуточной частоты с частотой дискретизации 56 МГц [4]. Такое соотношение частоты дискретизации и промежуточной частоты сигнала позволяет сформировать квадратурные составляющие его напряжений путем разделения их отсчетов на четные и нечетные по номеру следования с последующим прореживанием цифровой выборки с помощью дециматора DDC.

Для формирования излучаемых сигналов использовались микросхемы 4-канальных 10-разрядных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) с частотой тактирования 56 МГц. При этом синтез одного периода аналогового сигнала осуществлялся по 4 цифровым отсчетам, что позволило получить выходной сигнал ЦАП с центральной частотой 14 МГц, подвергаемый далее низкочастотной фильтрации с граничной частотой 23 МГц.

### Второй этап

На втором этапе (SANTANA-2) за счет использования указанных базовых модулей был создан демонстратор 64-элементной (8x8) приемопередающей ЦАР. Конструктивное выполнение цифрового сегмента приемной системы предусматривало размещение на одной плате цифровой обработки 8 микросхем, содержащих 4-канальные АЦП, выходные отсчеты которых поступали на ПЛИС для последующего цифрового диаграммообразования [4]. Аналогичным образом была реализована системотехника цифро-

### Ключевые слова:

цифровые антенные решетки, цифро-аналоговые преобразователи, Ка-диапазон, метаматериал, фазированная антенная решетка

### Keywords:

Digital Antenna Array, Digital-to-Analog Converter, Ka-band, Metamaterial, Phased Antenna Array

Партнер раздела



**Космическая связь**  
 Федеральное государственное унитарное предприятие

www.rsc.ru

вого синтезатора сигналов передающей системы. При этом на одной плате размещалось 8 микросхем 4-канальной ЦАП.

В ходе испытаний был проведен дуплексный обмен данными между 64-элементной ЦАР и самолетом, который двигался на высоте 3 км со скоростью 250 км/ч. При этом была достигнута скорость передачи "вверх" 400 кбит/с (при частоте несущей 30 ГГц, ширине полосы частот 600 кГц и модуляции BPSK) и "вниз" – 28 Мбит/с (при частоте несущей 20 ГГц, ширине полосы частот 18,9 МГц и модуляции QPSK).

### Третий этап

В рамках третьего этапа направление исследований было сосредоточено на решении задач системной интеграции, в ходе которого предполагались создание 256 (512)-элементной приемопередающей спутниковой ЦАР по модульному принципу и ее исследование.

В ходе третьего этапа проекта решались также следующие проблемы: цифровое формирование многолучевой диаграммы направленности; коррекция неидентичностей характеристик приемных каналов; независимая адаптация параметров отдельных лучей к изменению условий передачи сигналов; сопровождение многочисленных разнотипных подвижных объектов.

### Универсальность методов расширяет область применения

Универсальность методов цифрового формирования луча позволяет применить отработанные в рамках проекта SANTANA решения в родственных областях, в частности для дистанционного радиомониторинга Земли, радиолокационной разведки (Space Based RADAR). В целом же идеи, положенные в основу проекта, заметно опередили свое время и существующий на тот момент уровень технологий.

В ходе реализации проекта его участники столкнулись с необходимостью решения проблемы обработки значительных по объему и скорости следования потоков цифровых данных, поступающих от большого количества антенных элементов решетки, даже с учетом децимации отсчетов АЦП. На момент завершения проекта SANTANA было принято решение

использовать в дальнейших разработках принцип формирования из исходной апертуры нескольких подрешеток с последующим выполнением цифрового диаграммообразования по их выходам. Это позволит уменьшить вычислительную нагрузку, сократив количество связей между радиочастотным сегментом и цифровой логикой. Вместо того чтобы управлять отдельно взятым антенным элементом, в этом случае можно регулировать характеристики целиком строки или столбца антенных элементов. Такое управление может осуществляться не только в цифровом виде, но и с помощью фазовращателей на радиочастоте.

### Антенны поверхностной волны

Одна из альтернативных концепций по отношению к применению ЦАР – использование в абонентском оборудовании спутниковых систем связи активных антенных систем на основе метаматериалов.

Просматривая публикации по вопросам реализации приемопередающих антенн в наземных терминалах Ka- и Ku-диапазонов для организации спутниковой связи в движении, искусственному читателю нетрудно найти сведения о том, что компания Kymeta Corporation обещает к 2015 г. представить на рынок антенну с электронным сканированием луча на основе метаматериала [6]. Примечательно, что даже Inmarsat заключил с этой компанией соглашение по применению таких антенн для подвижных абонентов будущей спутниковой многолучевой сети Global Xpress.

Чтобы обстоятельно разобраться в принципе работы антенн компании Kymeta Corp., имеет смысл изучить патентный портфель этой фирмы. Однако, как выяснилось на момент написания этих строк, в патентной

базе данных США фирма Kymeta Corp. не фигурирует в числе патентообладателей. Последующая попытка патентного поиска, предпринятая в отношении руководства данной фирмы, оказалась более успешной. Учитывая, что директором Kymeta Corporation является Натан Кандц (Nathan Kundtz), дальнейший поиск был проведен с использованием его имени в качестве ключевых слов. Это позволило обнаружить 6 патентов США, а также патенты WPO, касающиеся применения метаматериалов в антенной технике, в которых Натан Кандц является соавтором [7–15].

Кроме того, в Интернете доступна также диссертация Натана Кандца, выполненная им в 2009 г. на соискание ученой степени доктора философии (PhD) в университете Дюка, в которой исследуются вопросы применения метаматериалов при решении задач электродинамики [16]. Анализ указанных патентных материалов, а также публикаций с участием Натана Кандца (например, [17]) позволяет сделать вывод, что в разработках Kymeta Corp. речь идет о разновидности антенн поверхностной волны (Leaky-wave).

### Управляемые метаматериалы

В традиционных антеннах данного типа сканирование пространства осуществлялось путем изменения частоты питающего сигнала. В рассматриваемой концепции частота излучения остается фиксированной, а особым

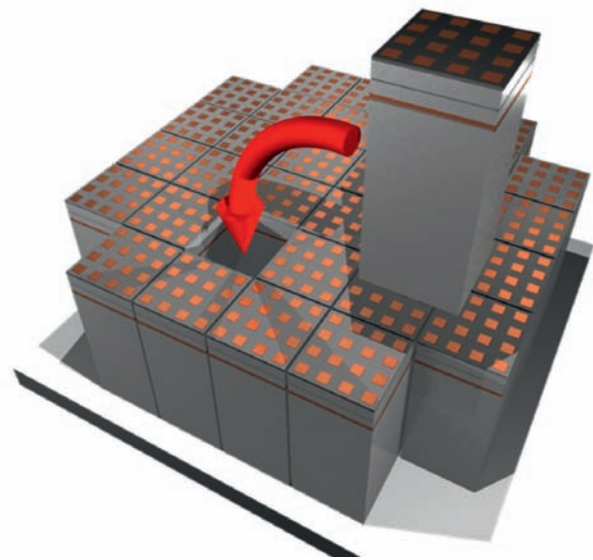
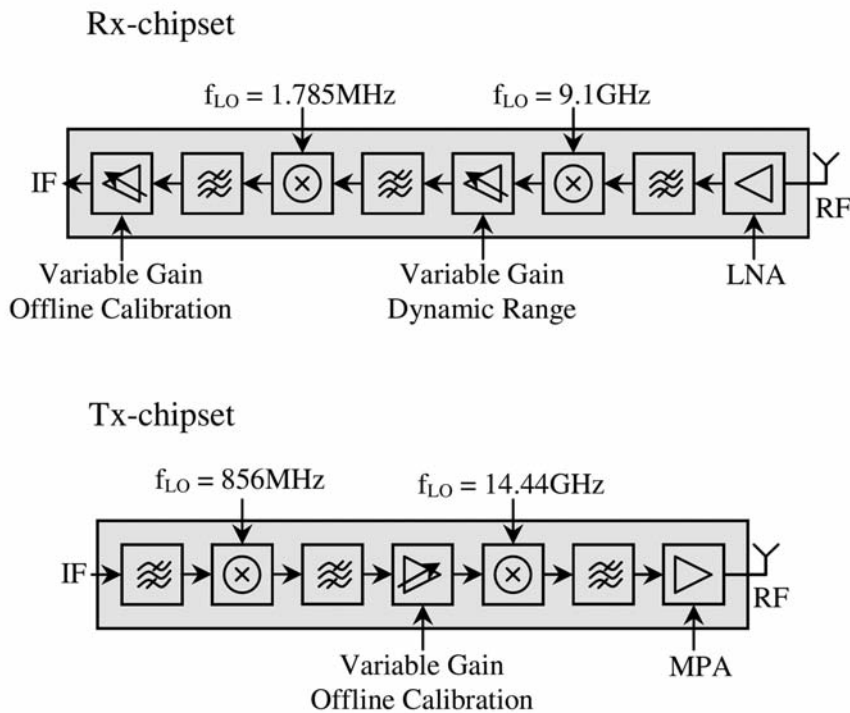


Рис. 1. Приемная многомодульная ЦАР [3]



**Рис. 2.** Один из вариантов структуры аналогового сегмента приемного и передающего каналов ЦАП в проекте SANTANA [4]

образом изменяются лишь электромагнитные параметры материала антенны, в качестве которого используется так называемый метаматериал [18–20].

В данном случае имеет место расширенная по сравнению с [18–20] трактовка понятия метаматериала как среды с локально регулируемыми диэлектрической  $\epsilon$  или/и магнитной  $\mu$  проницаемостями, в том числе в области, далекой от резонанса, что позволяет оперировать не только в зоне их отрицательных значений, но и в широком диапазоне положительных величин  $\epsilon$  и  $\mu$ . В принципе данная трактовка метаматериалов действительно имеет право на жизнь, поскольку в природе подобных материалов не существует.

По сути, в данном случае имеет место проявление известного закона развития технических систем, который сформулировал Г.С. Альтшуллер, создатель теории решения изобретательских задач [21]: развитие систем идет в направлении повышения их управляемости. Сначала были созданы пассивные метаматериалы с фиксированными отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей, а затем была предложена возмож-

ность активного управления величиной этих параметров, причем управление распространилось и на режимы функционирования метаматериалов с положительными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$ .

### Это уже было?

Идея антенн поверхностной волны на основе линий передачи из метаматериалов не является новой [22]. Следует отметить, что даже переход к использованию пассивных (неуправляемых) метаматериалов типа CRLH-линий передачи [18–20] позволил в случае одномерной антенны поверхностной волны получить положительный эффект – сканирование лучом в обе стороны от нормали к линейной антенне [22] (рис. 3). В обычных антеннах поверхностной волны возможно отклонение луча лишь в одну сторону от нормали, как бы ни изменялась частота сигнала. При использовании метаматериалов изменение направления излучения в зависимости от частоты происходит следующим образом [23]:

- на частоте резонанса  $\omega_0$  электромагнитное излучение концентрируется в направлении, перпендикулярном плоскости антенны;

- на частотах выше резонансной величины ( $\omega > \omega_0$ ) излучение фокусируется в направлении распространения электромагнитной волны вдоль линии передачи;
- на частотах, меньших резонанса ( $\omega < \omega_0$ ), излучение происходит в обратном направлении, со смещением луча в сторону порта питания антенны (source).

### Как отказаться от частотного сканирования?

Однако недостатком частотного сканирования является требуемое для его реализации непостоянство частоты сигнала, что существенно усложняет построение средств телекоммуникаций.

Чтобы обеспечить сканирование пространства при неизменной частоте электромагнитных колебаний, конструкция антенны может изготавливаться из нескольких вариантов управляемых метаматериалов в зависимости от принципа управления параметрами метаячеек.

Простейший в смысле физики используемых процессов, но не с точки зрения технической реализуемости вариант предполагает использование реконфигурируемых с помощью MEMS-элементов ячеек метаматериала. Изменяя геометрию элементарных излучателей метаячейки, можно сменить ее резонанс по частоте в ту или иную сторону. В результате удастся дискретно управлять параметрами излучения сформированной из них антенны, например переключая максимумы главных лучей диаграммы направленности в заранее заданные, фиксированные по угловому направлению положения.

Истоки другого подхода к созданию антенн поверхностной волны уходят корнями в публикации, описывающие управляемые с помощью варакторов метаматериалы. В них для управления емкостью метаячейки предлагается использовать варакторные диоды, включаемые, например, в разрез сплит-резонатора. Это обеспечивает более гибкое управление ориентацией максимума диаграммы направленности, в том числе и непрерывное по пространственным координатам.

В рамках широко представленного в ряде публикаций подхода, в случае

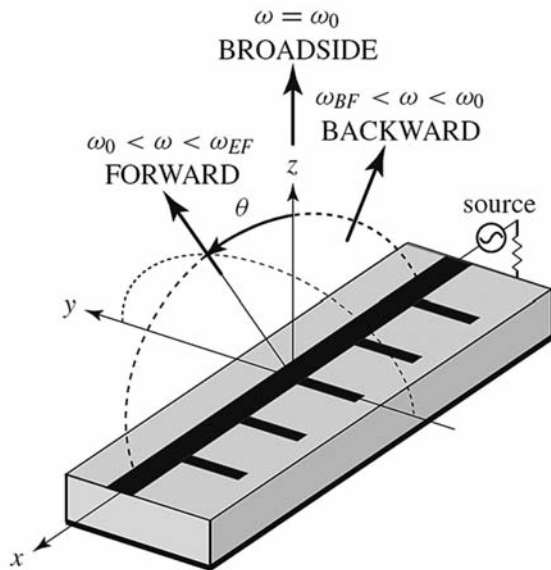


Рис. 3. Принцип частотного сканирования в антенне поверхностной волны на основе нерегулируемого метаматериала [23]

применения линий передачи CRLH-емкость, входящая в ячейку, заменяется варакторным диодом, емкостные свойства которого регулируются подводящим извне управляющим напряжением. К примеру, в [24] описана антенна поверхностной волны на основе линии передачи из метаматериала с управляемыми с помощью варакторов емкостями ячеек метаматериала при фиксированной частоте излучения.

Угол наклона луча в указанной CRLH-антенне определяется частотой сигнала. Заменяя конденсаторы, включенные в CRLH-ячейки, на варакторные диоды, можно регулировать не только угол наклона луча для заданной частоты сигнала, но и ширину луча. Для отклонения луча в заданное угловое положение изменение управляющего напряжения на варакторах должно быть линейным, с регулярным приращением от диода к диоду на фиксированную величину, значение которой определяется заданным угловым смещением луча от нормали к плоскости антенны. Для настройки требуемой ширины луча распределение напряжений на варакторах должно, напротив, быть неоднородным. Возможна комбинация этих двух подходов, когда требуемый для отклонения луча линейный закон изменения управляющих напряжений на варак-

торах дополняется его неоднородными девиациями. В упомянутой выше работе [24], например, приведен результат исследования демонстрационного образца антенны поверхностной волны, функционирующей на частоте 3,33 ГГц и образованной 30 ячейками метаматериала со встроенными варакторными диодами, в которой достигается область отклонений луча в секторе от 50 до -49 град. путем изменения управляющих напряжений на варакторах от 0 до 21 В. Максимальный коэффициент усиления данной антенны может сохраняться на уровне 18 dBi в значительном диапазоне угловых отклонений луча за счет возможности изменения ширины луча по уровню половинной мощности до 200% по сравнению со случаем однородного смещения напряжений на варакторах. Наличие нелинейных эффектов в варакторах практически не влияет на качество функционирования всей системы связи, которая обеспечивала скорость передачи данных до 10 Мбит/с.

Аналогичным образом реализуется управление положением луча и в двух угловых плоскостях (рис. 4). Небольшие по габаритам парциальные антенные решетки могут конфигурироваться в фазированную антенную решетку (ФАР) более крупных размеров с общим фазовым центром.

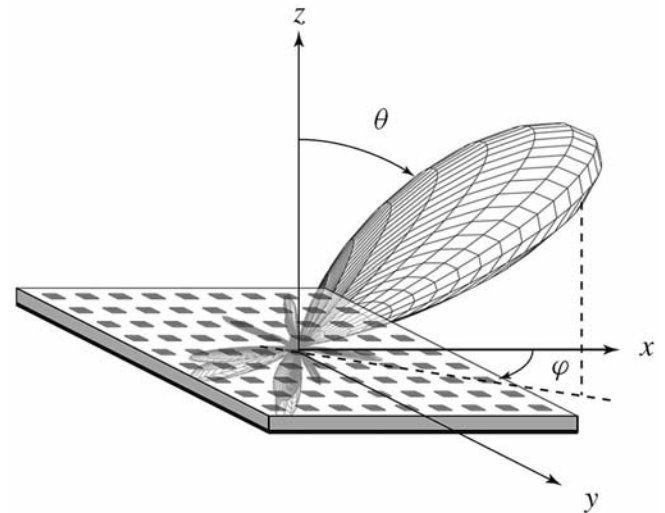


Рис. 4. Двумерное сканирование лучом в антенне поверхностной волны на основе электрически управляемого метаматериала

### Линзы из метаматериалов

Наряду с использованием метаматериалов как основы создания антенн поверхностной волны, другим направлением их применения в спутниковых терминалах может быть изготовление радиопрозрачных обтекателей ФАР или ЦАР. Иллюстрацией такого рода является предложенная в [25] конструкция плоской, горизонтально расположенной ФАР, окруженная оболочкой из специально профилированного метаматериала с отрицательными значениями диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостей (рис. 5). Указанный метаматериал в данном случае выполняет роль преломляющей линзы, обеспечивающей расширенный сектор сканирования пространства главным лучем диаграммы направленности ФАР с охватом угловых направлений, близких к линии горизонта. В данном случае использован метаматериал с неуправляемыми параметрами. Поэтому дальнейшее развитие данной идеи может идти по пути применения электрически управляемых метаматериалов, аналогично антеннам Kymeta Corporation, что позволит отказаться от варьирования толщиной метаматериала по мере смещения от зенитной области обтекателя к плоскости основания ФАР.

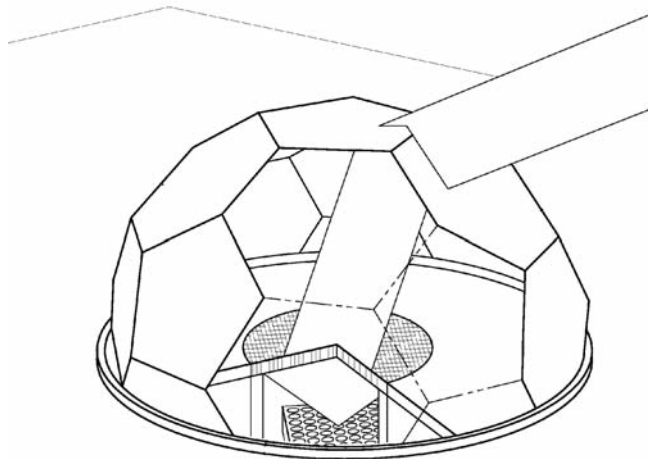
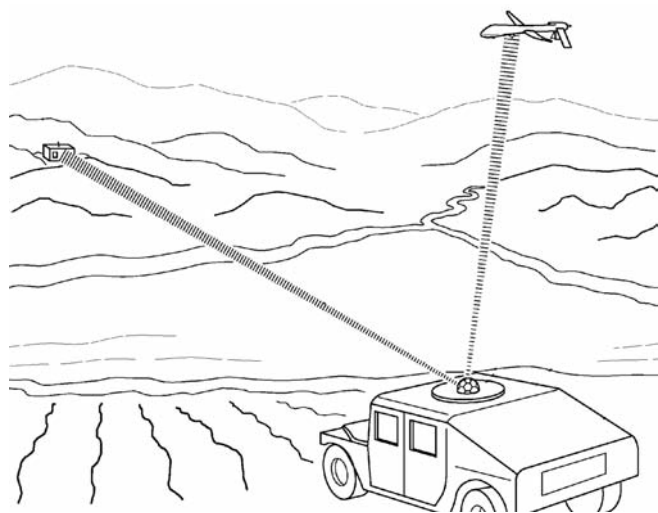


Рис. 5. Обтекатель ФАР из метаматериала [25]

### Всё впереди

Рассмотренные особенности реализации ЦАР и антенн на метаматериалах раскрывают общие принципы их выполнения и не описывают всех нюансов и ноу-хау, применяемых в конкретных технических решениях при производстве антенн. Остается надеяться, что, несмотря на многие технологические и технические проблемы, разработчикам новых технологий все же удастся выйти на мировой рынок с серийными изделиями, и потребители смогут на практике оценить возможности новых спутниковых антенн.

### Литература

1. Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки в системах спутниковой связи // Первая миля. Last mile (Приложение к журналу "Электроника: наука, технология, бизнес"). – 2008. – № 4. – С. 10–15; № 5. – С. 16–20.
2. Arne F. Jacob. SANTANA. Smart Antenna Terminal // DLR-Workshop "Aktive Antennen". – Bonn-Oberkassel. – 2005. – 22–23 November.
3. Dreher A. Smart Antenna Terminal for Broadband Mobile Satellite Communications at Ka-Band / A. Dreher, A. Geise and other. [online]. Доступ через [http://www.aeroday2006.org/sessions/C\\_Sessions/C2/C23.pdf](http://www.aeroday2006.org/sessions/C_Sessions/C2/C23.pdf).
4. Geise A. Smart antenna terminals for broadband mobile satellite communications at Ka-band / A. Geise, F. J. Arne, K. Kuhlmann and other // INICA 2007, International Conference on Antennas. – Munich, 2007. – 28–30 March. – P. 199–204.
5. Stark A. SANTANA: Advanced electronically steerable antennas at Ka-Band / A. Stark, A. Dreher, H. Fischer, A. Geise and other // Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. – Berlin, 2009. – 3rd European Conference on 23–27 March. – P. 471–478.
6. Анпилогов В.П. О фазированных антенных решетках Ka-диапазона на основе метаматериала // Технологии и средства связи. – 2013. – № 5. – С. 66–67.
7. Bily A. Surface scattering antennas / A. Bily, A. K Boardman, N. Kundtz and other. – August 2012: U.S. Patent 20120194399-A1.
8. Bowers J.A. JR: Metamaterial surfaces. Searete a liability corporation / J. A Bowers, R. A Hyde, N. Kundtz and other. – January 2012: U.S. Patent 20120018653-A1.
9. Bowers J.A. Metamaterial surfaces. Searete a liability corporation of the State of Delaware / J. A Bowers, R. A Hyde, N. Kundtz and other. – January 2012: U.S. Patent 20120019431-A1.
10. Bowers J.A. JR: Metamaterial surfaces. Searete a liability corporation of the state of Delaware / J. A Bowers, R. A Hyde, N. Kundtz and other. – January 2012: U.S. Patent 20120019432-A1.
11. Bowers J.A. JR: Metamaterial surfaces. Searete a liability corporation of the State of Delaware / J. A Bowers, R. A Hyde, N. Kundtz and other. – January 2012: U.S. Patent 20120019892-A1.
12. Smith D. R. Metamaterial waveguide lens. Duke University / D.R Smith, N. Kundtz, J. Hunt. – November 2012: U.S. Patent 20120286897-A1.
13. Smith D. R. A Metamaterial Waveguide Lens / D. R Smith, N. Kundtz, J. Hunt. – Oct. 26, 2012: Patent WO/2012/145640.
14. Smith D. R. B: Lenticles. Gradient Index Lenses and Methods with Zero Spherical Aberration / D. R Smith, N. Kundtz. – Univ Duke. – Aug. 15, 2012: Patent EP2486432-A1.
15. Kundtz N. Surface Scattering Antennas. – Apr. 19, 2012: Patent WO/2012/050614.
16. Kundtz N. Advances in Complex Artificial Electromagnetic Media / Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. – Department of Physics. Graduate School of Duke University. – 2009. – 129 p.
17. Kundtz N. Metamaterial Surface Antenna Technology: A new generation of electrically scanned arrays / N. Kundtz, A. Bily, J. Dallas, and other // 42nd Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE-2012) [online]. Доступ через <http://www.pqeconference.com/pqe2012/Abstract-Book-auth.pdf>.
18. Слюсар В.И. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2009. – № 7. – С. 70–79.
19. Слюсар В.И. Метаматериалы в конструкции антенн // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2009. – № 8. – С. 66–70.
20. Слюсар В.И. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. Last Mile (Приложение к журналу "Электроника: Наука, Технология, Бизнес"). – 2010. – № 3–4. – С. 44–60.
21. Альшуллер Г.С. Найти идею: введение в теорию решения изобретательских задач // Новосибирск: Наука. Сиб. отд. – 1986. – 209 с.
22. Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (обзор) / И.Б. Вендик, О.Г. Вендик // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, вып. 1. – С. 3–28.
23. Caloz Ch. Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications (the engineering approach) / Ch. Caloz, T. Itoh. – A John Wiley & Sons, Inc., 2006. – 352 p.
24. Lim S. Metamaterial-Based Electronically Controlled Transmission-Line Structure as a Novel Leaky-Wave Antenna with Tunable Radiation Angle and Beamwidth / S. Lim, C. Caloz, T. Itoh // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2004. – Vol. 52, № 12. – December. – P. 2678–2690.
25. Lam T.A. Steering radio frequency beams using negative index metamaterial lenses / Tai Anh Lam, Minas Hagop Tanielian, Claudio Gilbert Parazzoli, John Stephen Derov. – Jul. 16, 2013: U.S. Patent 8487832 B2.

Ваше мнение и вопросы по статье  
присылайте по адресу

tss@Groteck.ru

Партнер раздела



**Космическая связь**  
Федеральное государственное унитарное предприятие

[www.rscg.ru](http://www.rscg.ru)