

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**Быстров Р. П., Потапов А. А.**

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009 Москва

По материалам открытой печати проведен анализ результатов исследований и разработок за последние годы в области радиоэлектронной техники применительно к системам космического, воздушного и наземного базирования. Оценивается их народно-хозяйственное и оборонное значение. Рассмотрены результаты исследований антенных систем с обработкой сигнала, намечены пути совершенствования функциональных устройств в радиолокации. Проанализированы возможности применения вычислительной техники в радиолокационных системах. Дана оценка перспектив фундаментальных и поисковых исследований в развитии элементной базы XXI века.

Решающими факторами, оказывающими влияние на устойчивое развитие современных радиолокационных систем и повышение их эффективности, является правильное определение технического облика и обоснование основных технических требований систем. Создание такой техники позволит обеспечивать успешное функционирование в сложных условиях радиоэлектронного противодействия. Основой же для успешной реализации радиолокационной техники будущего является наличие опережающего научно-технического задела. Такой задел сегодня формируется в рамках фундаментальных и поисковых исследований в интересах народного хозяйства и обороны страны. Достижения последних 50 лет в этой области позволили создать не только принципиально новые виды радиолокационной техники, но и привели к появлению новых форм и методов применения таких систем [1-3].

При этом необходимо отметить, что принципиально новые технические характеристики радиолокационных систем любого назначения достигаются, прежде всего, благодаря оптимальному проектированию и конструированию антенн с передающими и приемными устройствами при более совершенной пространственно-временной обработке сигналов на базе современной вычислительной техники [4].

В данной статье на основе открытой научно-технической, в основном зарубежной литературы, рассматриваются наиболее важные из направлений развития и совершенствования антенных систем, отдельных функциональных устройств радиолокационной техники, а также по возможности формулируются наиболее вероятные проблемы и направления их поисковых и прикладных исследований.

1. АНТЕННЫЕ УСТРОЙСТВА

Современные достижения в технике антенн и СВЧ-устройств базируются на последних разработках электроники. Принципиально новые характеристики РЛС любого назначения, как правило, достигаются благодаря органическому слиянию антенны с передающими, приемными устройствами и системой пространственно-временной обработки сигналов. Увеличение числа одновременно работающих РЛС приводит к насыщенности окружающего пространства радиосигналами, что вызывает необходимость электромагнитной совместимости этих систем. Для решения этого вопроса создаются антенные системы, способные адаптироваться к окружающей обстановке [5-8].

Таким образом, общей проблемой в развитии высокоэффективных антенных и функциональных СВЧ-устройств являются разработка новых методов и способов их создания и совершенствования как на основе передовых разработок в области электроники, полупроводниковой техники, технической кибернетики, когерентной радио-оптики, нанотехнологий, так и на базе современной вычислительной техники, позволяющей обеспечить на перспективу разработку эффективных радиолокационных систем различного базирования и назначения.

Антенные устройства широко применяются в различных народнохозяйственных областях – радиолокации, связи, радиоуправлении, а также в системах инструментальной посадки летательных аппаратов, РЭБ, системах наведения и управления оружием, радиотелетриии и т.д.

В настоящее время наибольшее распространение получили остронаправленные сканирующие антенны. Сканирование позволяет осуществлять обзор пространства, сопровождение движущихся объектов и определение их угловых координат. Замена слабонаправленных или ненаправленных антенн в РЛС, находящихся в эксплуатации, остронаправленными сканирующими позволяет не только получить выигрыш за счет увеличения коэффициента усиления антенн, но и в ряде случаев ослабить взаимные влияния одновременно работающих систем. При этом могут быть существенно улучшены помехозащищенность, скрытность действия и другие характеристики РЛС.

Применение технологий фазированных антенных решеток (ФАР) для построения сканирующих остронаправленных антенн позволяет реализовать высокую скорость обзора пространства, способствует увеличению объема информации о распределении источников излучения или отражения электромагнитных волн в окружающем пространстве [9-29]. Прогресс в области устройств СВЧ и способов электрического управления средами позволяет не только создать управляемое фазовое пространство в антенной решетке (т.е. осуществить электрическое сканирование), но и первоначально обработать поступающую информацию

(просуммировать поля, преобразовать частоты, усилить сигнал и т.д.) непосредственно в СВЧ-тракте антенны.

Так, в [9] приводятся соотношения, позволяющие вычислять величину взаимных сопротивлений антенной решетки крестообразных излучателей. Особенностью предложенного метода является учет конечной толщины вибратора, а также выделение особенности функции Грина, позволяющие создавать эффективные вычислительные алгоритмы. Кроме того, приводятся результаты численных исследований влияния отказа учета электродинамических эффектов на величину ОСПШ адаптивной антенной решетки с исключением полезного сигнала на этапе формирования вектора весовых коэффициентов.

В [10] исследована малогабаритная сверхширокополосная антенна, предназначенная для работы в составе двухполяризационной антенной решетки в диапазоне 3.1...10.6 ГГц. Антенна представляет собой комбинацию электрического и магнитных излучателей и выполнена печатным способом на пластине диэлектрика размером 20×30 мм. Приведены результаты исследований антенны во временной области как в качестве самостоятельного излучателя, так и в составе антенной решетки.

Дальнейшее улучшение характеристик РТС с ФАР, таких как разрешающая способность, быстродействие, пропускная способность, дальность обнаружения, помехозащищенность и др. можно обеспечить, совершенствуя методы обработки (в общем случае пространственно-временной) сигналов, излучаемых и принимаемых антенной. При этом антенна становится первичным звеном обработки и в значительной мере определяет основные характеристики РЛС. В зависимости от назначения РЛС и требований к ее характеристикам в настоящее время разрабатываются антенны с различными методами обработки сигнальной информации. Наибольшее распространение в перспективных РЛС получили антенны с обработкой сигнала: самонастраивающиеся, с синтезированным раскрытием (РСА, ИРСА), с временной модуляцией параметров, с цифровой обработкой, с аналоговой пространственно-временной обработкой методом когерентной оптики и т.д. С освоением более коротких волн в антенных системах начинают находить применение голографические методы преобразования входящих электромагнитных волн.

Большое развитие и применение в радиолокации в настоящее время получили активные ФАР (АФАР), представляющие собой сочетание миниатюрных радиолокационных приемо-передающих устройств (активных элементов) [30].

Каждый элемент решетки имеет, например, дипольную антенну, переключатель приема-передачи, усилитель мощности, смеситель, усилитель промежуточной частоты, фазовращатели и схемы управления. Общими узлами РЛС являются синхронизатор, высокочастотное распределительное устройство, вычислитель управления лучом, преобразователи информации и индикатор. Активные элементы позволяют уменьшить потери мощности и повысить чувствительность устройств. Кроме того, все элементы устройства управления лучами при поиске и сопровождении могут работать на оптимальной рабочей частоте.

Дальнейшее развитие РЛС с активными решетками позволит создать поверхностные решетки, которые можно будет размещать вдоль передней кромки крыла, освобождая носовую часть фюзеляжа для других датчиков. Такие ФАР часто называются *конформными*.

В последних публикациях АФАР получают дальнейшее развитие приема импульсов с произвольной поляризацией.

В [31] представлены результаты исследований сверхширокополосной приемной двухполяризационной антенной решетки 4×4, предназначенной для исследования поляризационной структуры электромагнитных импульсов нано- и субнаносекундной длительности. Каждый элемент антенной решетки представляет собой два скрещенных диполя, плечи которых нагружены на усилители на полевых транзисторах. Представлены результаты исследований диаграмм направленности, действующей длины и формы регистрируемых импульсов. Исследованы шумовые характеристики и работоспособность антенны при воздействии мощных электромагнитных импульсов.

В целом, в настоящее время существует и разрабатывается большое многообразие конструкций антенных систем. Наиболее перспективные их типы представлены в общей системе классификации антенн по способу обработки сигнала [5, 8].

Таким образом, применяемые в перспективных РЛС антенны превратились в сложнейшие устройства, имеющие более десятков тысяч излучателей, активных элементов, фазовращателей, управление которыми обеспечивается мощными средствами вычислительной техники.

1.1. Общие проблемы развития антенных систем перспективных РЛС

В качестве общей проблемы в развитии антенных систем РЛС можно определить *повышение их эффективности на основе: внедрения передовых технологий с синтезированным раскрытием, с временной модуляцией параметров, с цифровой обработкой, с аналоговой пространственно-временной обработкой; использования методов когерентной оптики, а также разработки фазированных антенных решеток, имеющих десятки тысяч излучателей, активных элементов, фазовращателей с управлением на базе современной вычислительной техники различной мощности.*

В зависимости от базирования РЛС (космического, воздушного и наземного) для антенных систем при их создании имеют место и соответствующие разработки методологий развития и совершенствования антенных устройств.

Следует особо отметить стремительное развитие техники больших космических антенн (БКА), развертываемых или монтируемых на околоземных орбитах, для работы в составе радиотехнических

комплексов космического базирования, где широкое применение нашли радиолокационные системы. В таблице 1 приведен перечень задач народно-хозяйственного и военного назначения, решаемых с помощью БКА [32-36].

Таблица 1

Радиотехнические системы космического базирования, использующие большие космические антенны и адаптивные антенны

Народно-хозяйственные задачи:	Оборонные задачи:
<ul style="list-style-type: none"> - связные ИСЗ на геостационарных орбитах и низкоорбитальные ИСЗ; - РЛ бокового обзора (БО), РСА*, радиометрические и интерферометрические системы; - навигационные спутниковые системы типа GPS и ГЛОНАСС; - метеоспутники и анализ состояния атмосферы; - геологические ИСЗ для подповерхностного зондирования, анализа и прогноза сейсмической обстановки; - солнечно-космические электростанции; - научные исследования Земли, планет и космического пространства. 	<ul style="list-style-type: none"> - военные системы спутниковой связи (ВССС); - разведка (радиокартографирование); - радиотехническая разведка; - навигационные системы; - контроль космического пространства; - спутниковые средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ); - спутниковые средства радиоэлектронного подавления (РЭП); - средства противоракетной обороны (ПРО) и противовоздушной обороны (ПВО); - космическое электромагнитное оружие.

* Примечание: РСА – радиолокационные системы с синтезированной апертурой

Так, разработка методологии развития и совершенствования антенных устройств космического базирования базируется на решениях научно-технических задач, связанных с созданием геостационарных космических антенн (КА) и низкоорбитальных КА, таких, как развитие техники больших космических антенн (БКА), развертываемых или монтируемых на околоземных орбитах:

- удовлетворяющих предъявляемым требованиям: транспортабельность и малый объем в свернутом положении; малый вес; высокие рабочие характеристики; жесткость конструкции в рабочем положении; надежность срабатывания механизмов развертывания; сохранение заданной геометрии после развертывания; низкая стоимость и простота изготовления, а также жесткость, стабильность юстировки;

- в зависимости от функционального назначения радиосистем создание антенн в конструктивном виде: с развертываемой зеркальной апертурой большого диаметра (десятки и сотни метров), с опорной платформой и установленными на ней элементами с регулируемыми коэффициентами передачи в парциальных каналах (фазированная антенная решетка), с системой, сочетающей оба принципа.

Методология развития и совершенствования антенных устройств воздушного базирования для перспективных РЛС (обнаружения и наведения), где требуются жесткие ограничения по массе и продольному размеру апертуры антенн, основывается на решении задач разработки ФАР и АФАР с электронным сканированием, обеспечивающих высокие значения коэффициента использования поверхности (КИП) антенны, при одновременном обеспечении низкого уровня боковых лепестков диаграммы направленности и при относительно высоких значениях импульсной мощности на один канал ФАР.

Развитие антенных устройств РЛС наземного базирования в настоящее время, как правило, осуществляется в направлении реализации следующих основных научно-технических задач:

- создание активных ФАР (плоских и на поверхностях сложной формы) для диапазонов сантиметровых волн;
- совершенствование остронаправленных антенн с электрическим сканированием в широком секторе углов диапазонов частот 60...100ГГц;
- разработка многочастотных с перекрытием не менее октавы и широкополосных антенн с электрическим сканированием в широком секторе углов для высокоинформативных систем с максимальной помехозащищенностью (применение сверхширокополосных и широкополосных сигналов, перестройка частоты в широком диапазоне, поляризационная селекция и адаптация диаграммы в зависимости от целевой и помеховой обстановки).

1.2. Общие технические решения проблем

Общие технические решения указанных проблем на ближайшее время можно сформулировать следующим образом.

1. Технические решения для развития БКА:

- создание жестких, термостабильных конструкций, сохраняющих заданную форму поверхности и геометрию антенны в течение длительного времени эксплуатации;
- оптимизация алгоритмических решений и вариантов аппаратурной реализации задач стабилизации характеристик высокоточного наведения лучей БКА при наличии тепловых деформаций и частичных отказов элементов антенной системы;

- разработка методов построения разреженных неэквилидистантных ФАР больших размеров с широкоугольным сканированием для систем СС гражданского и военного применения;
- освоение в антенных системах миллиметрового диапазона радиоволн;
- разработка и оптимизация конкретных вариантов антенн РСА и ИРСА для обеспечения задач дистанционного зондирования Земли с высоким разрешением (0,1 ... 0,3 м) и регистрацией стереоскопических изображений.

2. Перспективные антенные устройства целесообразно развивать на основе:

- полупроводниковых фазовращателей в полосковом и микрополосковом исполнении для диапазонов частот до 30...40 ГГц;
- зеркал с локально регулируемой фазой коэффициента отражения для зеркальных остронаправленных антенн с электрическим сканированием в широком секторе углов, работающих в диапазонах частот до 100 ГГц. Для однодиапазонных антенн с относительно низкой излучаемой мощностью зеркала выполняются на основе микрополосковых вибраторных структур с полупроводниковыми коммутаторами. Для многодиапазонных широкополосных антенн, в режиме передачи излучающих большие мощности, зеркала выполняются с использованием ферритовых неоднородно намагниченных пластин;
- линз с электрически управляемым показателем преломления для электрического сканирования лучом в диапазонах частот 60...140 ГГц;
- широкополосных (сверхширокополосных) полосковых и микрополосковых излучателей;
- антенн с электрическими размерами порядка 0,01...0,005 от длины волны (миниатюрные активные антенны) для систем связи и навигации, включая сотовую связь.

1.3. Возможные направления проведения исследований по созданию антенных систем на ближайшую перспективу.

Исследования по созданию перспективных антенных систем, приведенных на рис. 1 (различного назначения, классификации, конструкции и областей применения), необходимо проводить по следующим поисковым направлениям.

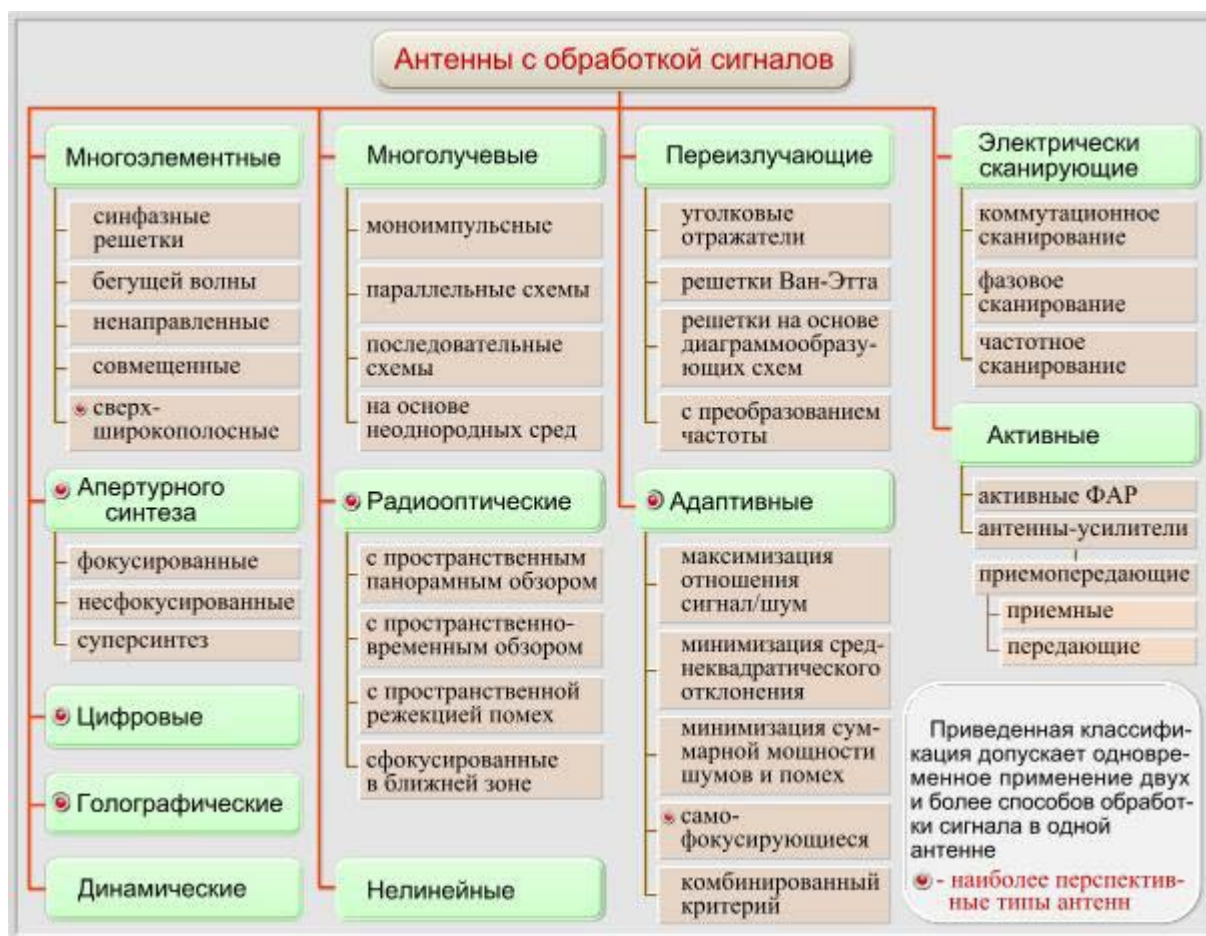


Рис.1. Структурная схема типов перспективных антенн в общей системе их классификации

Многоэлементные и многолучевые антенные системы:

- многочастотные антенны с синтезированной апертурой и круговой поляризацией для ИСЗ, обеспечивающие более высокие разрешение и скорость сбора данных, более гибкое изменение режимов формирования изображений и возможность изменения ширины полосы обзора;
- целевые антенные решетки с равнофазным распределением напряжения на щели и с согласованным входом;
- микрополосковые антенные системы для размещения их на ракетах, самолетах и других объектах, не нарушая их аэродинамических качеств, ввиду их малых весов, низкосилуэтности, конформности и дешевизны;
- антенные системы с широкополосными ФАР, обладающие полосой пропускания не менее двух октав диаграммы направленности и наибольшими габаритами, не превышающими 0,2 наибольшей рабочей длины волны, как правило, для многолучевых РЛС.

Электрически сканирующие антенные системы:

- ФАР с электронным сканированием диаграммы направленности на основе применения твердотельных активных сканеров, где приемно-передающие и излучающие модули выполняются по технологии изготовления монолитных ИС СВЧ в миллиметровом диапазоне волн и являются основным элементом РЛС военного назначения наземного и бортового базирования;
- антенные решетки с электронным сканированием и с введением фазовой коррекции для областей применения в пассивных головках самонаведения ракет на излучающие РЛС противника.

Антенные системы апертурного синтеза:

- РСА для радиотехнических систем высокого разрешения для дистанционного зондирования, картографирования, обнаружения наземных и надводных объектов в условиях плохой видимости с летательных аппаратов (космических, воздушных), путем когерентного сложения изображений, получаемых в РСА при повторных наблюдениях и со сжатием сигналов по дальности (37-40).

Радиооптические антенные системы:

- на основе применения оптических, акустооптических анализаторов спектра для обработки радиосигналов, основанные на методах с пространственно-панорамным или пространственно-временным обзором, а также с пространственной режекцией помех и фокусировкой в ближней зоне (41-45).

Адаптивные антенные системы (46-52):

• ФАР с обработкой сигналов и с повышенной помехозащищенностью (адаптацией) при воздействии на неё источников активных помех, функционирование которых предусматривает применение: максимизации отношения сигнал/шум, минимизации среднеквадратического отклонения, минимизации суммарной мощности шумов и помех, самофокусирования, комбинации критериев и др. (находят широкое применение в РЛС обнаружения и сопровождения наземных объектов в условиях естественных и организованных помех);

• системы, состоящие из нескольких ФАР и дающие возможность формирования луча, направленного в сторону источника сигнала и обеспечивающего подавление помех фоновго типа; адаптация параметров антенны производится путем формирования весовых коэффициентов на входе демультимплексора с помощью системы фильтровых рядов (с переключаемыми емкостями), управляемых цифровым процессором с конвейерной обработкой сигнала (чаще размещается на самолетах и спутниках и при реализации подводных коммуникационных устройств).

Активные антенные системы (53-59):

- на основе ФАР с активными усилителями;
- с возможностью одновременной генерации нескольких независимых лучей для облучения заданных областей пространства без облучения других областей;
- со сканированием диаграммы направленности в секторе $4 \square$ рад;
- с системой терморегулирования ФАР с элементами из сплава с памятью, которые выполняют одновременно функции датчиков и исполнительных устройств, что повышает надежность системы и снижает массу, а также энергоемкость.

Цифровые антенные системы с обработкой сигналов (60-65):

- двухантенные (двухпортовые) и трехантенные (трехпортовые) РСА, обеспечивающие обнаружение объектов, измерение их радиальных скоростей и угловых координат путем цифровой обработки эхо-сигналов;
- с ФАР, где оцифровка и адаптивное формирование лучей выполняется на уровне субрешеток.

2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

2.1. Функциональные устройства и элементная база

Важнейшую роль в развитии РЛС играют достижения в области вакуумной электроники. Рождение современной вакуумной электроники можно связать с рядом открытий и технических достижений, среди которых важное место занимают изобретение спиральной ЛБВ, разработка диспенсерного катода, освоение простых металлокерамических конструкций. Эти разработки относятся к концу 40-х-началу 50-х годов, т.е. к тому же времени, что и изобретение транзисторов. В 60-е и 70-е годы происходит непрерывное улучшение

параметров традиционных усилителей. В 70-е и 80-е годы появляются новые концепции, связанные с разработкой гиротронов и усилителей с лазерами на свободных электронах. В дальнейшем активно развиваются гироприборы усилительного типа (гирос-ЛБВ и гироклистроны), которые в отличие от традиционных усилителей “медленной волны” не имеют ограничений по мощности, связанных с проблемами теплоотвода и электрической прочности. Если в ЛБВ на ЦСР 3-мм диапазона максимальная импульсная мощность не превышает 5кВт, а средняя – 500Вт, то в современных гироклистроны уровень мощности почти в 20 раз выше. Дальнейшие разработки в области гиросусилителей будут направлены на расширение полосы пропускания и сокращение размеров приборов [5, 66].

В [67,68] приведен подробный анализ состояния и перспектив развития средств генерации, также и остальной элементной базы, а также сравнительные характеристики мощностей вакуумных, полупроводниковых, релятивистских приборов и лазеров диапазона миллиметровых и сантиметровых волн в 90-х годах. Отмечаются особенно значительные успехи в развитии вакуумной техники. Необходимо обратить особое внимание на характеристики излучения миниатюрных низковольтных клистронов и широко диапазонных ЛОВ разработки Выставкина Н.А., Голанта М.Б., Девяткова Н.Д. и Сеницына Н.И., которые открывают новые перспективы применений миллиметровых волн [6, 7, 67, 69-73].

Так в работах [6, 69] проводится сравнительный обзор состояния исследований и разработок сверхчувствительных сверхпроводниковых наноболометров-сенсоров для матричных изображающих радиометров терагерцового диапазона частот. Показано, что для достижения максимально высокой чувствительности: (1) наиболее перспективны наноболометры, работающие на разогреве электронов с совмещенным поглотителем излучения и сенсором на краю сверхпроводникового перехода (СКП) в отличие от болометров, у которых поглотителем излучения являются подвешенные мембраны, а термодатчиком – СКП; (2) размеры СКП должны быть предельно малыми, вплоть до 20–30 нанометров, а рабочая температура сверхнизкой, вплоть до 30–40 мК.

Обсуждаются принципы построения и выходные характеристики нового класса мощных низковольтных многолучевых ЛБВ на цепочках связанных многозачорных резонаторов с поперечно-протяженным типом взаимодействия для бортовых радиолокационных и телекоммуникационных систем коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

Показано, что для построения в диапазоне 15-220 ГГц высокоэффективных радиолокационных систем бортового назначения в их источниках излучения желательнее использовать выходные усилители мощностью несколько сотен Вт–единицы кВт.

Применяемые в наземных радиосистемах мощные высоковольтные однолучевые многорезонаторные клистроны и ЛБВ на основе цепочки связанных резонаторов (ЦСР) не позволяют применительно к бортовым системам реализовать требуемые электрические и массогабаритные параметры как самих приборов, так и их источников питания.

В этом отношении выгодно отличаются конструкции СВЧ усилителей, использующие низковольтный, многолучевой электронный пучок. Благодаря большой электронной проводимости при значениях ускоряющего напряжения в пределах 1-5 кВ, в данных приборах в диапазоне 15-40 ГГц достигается коэффициент усиления 30-50 дБ и электронный КПД 15-20%, а при применении коллектора-рекуператора – технический КПД 35-45%. Низкое ускоряющее напряжение и высокий технический КПД позволяют использовать малогабаритный источник питания. Но в виду того, что поперечный размер СВЧ зазора в резонаторах конечный, а в электронной пушке нельзя реализовать компрессию многолучевого пучка, ток пучка принципиально ограничен. Его увеличение возможно только за счет увеличения плотности тока. Однако, например, на частоте 30 ГГц и ускоряющем напряжении ~ 5 кВ даже при плотности тока ~ 50 А/см² величина тока пучка будет меньше 0,7 А. В результате выходная СВЧ мощность не превышает 1 кВт. При этом срок службы термокатода и, следовательно, прибора в целом, уменьшается до нескольких сотен часов. В низковольтных многолучевых приборах размеры резонаторов изменяются пропорционально длине волны и ускоряющего напряжения. Поэтому возникают трудности изготовления их малоразмерных деталей с допусками 0,05-0,25 мкм. Это относится также к конструкции многолучевой электронной пушки и к ряду других функциональных узлов. Данные технологические трудности обуславливают высокую стоимость сборки и низкий процент выхода приборов.

Таким образом, в известных конструкциях низковольтных многолучевых усилителей возможности увеличения выходной мощности и снижения трудоемкости изготовления по сравнению с достигнутым уровнем практически исчерпаны. Это затрудняет продвижение в область более высоких частот. В тоже время за рубежом разработаны высоковольтные усилители типа «Millitron» с полосой 3-20% и выходной СВЧ мощностью до 1 кВт при 30 ГГц и выше 150 Вт при 100 ГГц [69, 74, 75]. Они предназначены для широкого использования в перспективных радиосистемах различного значения, прежде всего, РПД миллиметрового диапазона. Это требует создания в данном диапазоне частот отечественных низковольтных многолучевых усилителей с большой выходной мощностью.

В [76] отмечается, что за последние годы в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН проведен целый ряд исследований, посвященный проблемам вакуумной микроэлектроники. Показано, что приборы вакуумной микроэлектроники по сравнению с твердотельными приборами имеют ряд преимуществ: обладают более высоким быстродействием из-за движения электронов в вакууме; функционирование приборов не зависит от температурных условий, они могут работать,

например, на поверхности Венеры (450 К) или, наоборот, в открытом Космосе (4 К); устойчивы к воздействию радиации.

Изучены функциональные возможности вакуумных интегральных схем, основанных на распределенном взаимодействии СВЧ-полей и электронных потоков, предложен ряд микроэлектронных вакуумных СВЧ-приборов с распределенным взаимодействием на основе матриц полей эмиттеров. В целом, исследования в области физики твердого тела, радиофизики полупроводниковых приборов и электроники в настоящее время получают свое дальнейшее развитие и достигнуты значительные успехи.

Проведенные в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН многолетние исследования по акустоэлектронике, микроволновой акустике и в области акустооптики, также создавали прочную основу для создания новых образцов приемо-передающей аппаратуры.

Можно привести многочисленные примеры таких исследований, получивших статус пионерских и основополагающих работ, как [76]:

изучение эффектов и явлений, связанных с распространением высокочастотных (свыше 1 МГц) ультразвуковых волн в твердых телах и их взаимодействием с электромагнитными полями и носителями заряда;

использование поверхностных акустических волн (ПАВ) в электронике и обоснование применения слоистой структуры пьезоэлектрик-полупроводник в качестве базовой конструкции акустоэлектронных приборов;

изучение поперечного акустоэлектрического эффекта на ПАВ, на котором базируются современные устройства быстрого преобразования Фурье, свертки, корреляции и другие методы обработки радиосигналов, и также введение в акустоэлектронику периодических структур на поверхности твердого тела и создание ряда элементов обработки радиосигналов на этой основе;

изучение резонансных и нелинейных акустооптических явлений в твердых телах, получивших внедрение акустооптических приборах специальной аппаратуры и др.

Благодаря классической работе [77], в которой впервые указывалось на перспективное использование поверхностных акустических волн (ПАВ) для обработки сигналов, состоялось становление и началось активное развитие акустоэлектроники, как нового направления в области твердотельной радиоэлектроники и радиоэлектронных компонентов для систем и аппаратуры передачи и обработки информации (САПОИ). Среди всех акустоэлектронных устройств господствующее положение на рынке САПОИ занимают фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [78, 79] (свыше 10 млрд. долларов США в 2002 г.). Важнейшей особенностью, обеспечивающей постоянное и быстрое внедрение фильтров на ПАВ в современные информационные системы, является отсутствие настройки и возможность совмещения процессов изготовления с микро и нано технологиями, высокая температурная стабильность, высокая надежность, малые массогабаритные характеристики.

Безусловно прогнозировать достижения в области развития элементной базы радиотехнических устройств достаточно сложно, это является самостоятельным научным вопросом. Поэтому вернемся к нашей основной целевой задаче – на основе имеющихся материалов сформулировать основные проблемы и тенденции развития функциональных устройств и элементной базы радиолокационных систем. Но, тем не менее, именно указанные ниже положения могут определить возможности развития элементной базы на будущее, функциональные возможности РЛС и их массогабаритные параметры.

Итак, в качестве общей проблемы в развитии функциональных устройств и элементной базы для РЛС можно определить как *совершенствование приемо-передающих устройств, усилителей, устройств обработки информации на основе традиционной СВЧ (вакуумная радиоэлектроника: ЛБВ, гиротроны, многолучевые клистроны, СВЧ-модули) и полупроводниковой техники, так и создание устройств и элементов за счет использования новых, бурно развивающихся на современном этапе технологий с использованием акустоэлектроники, микроволновой акустики и акустооптики, схмотехники, интегральных схем, квантовой наноэлектроники, эпитаксиальных гетероструктур, пленок высокотемпературных сверхпроводников, магнитоакустических элементов, нано- и микроэлектромеханических систем и др.*

2.2. Общие технические решения проблемы

С целью кардинального улучшения характеристик радиолокационных систем разработка техники функциональных устройств элементной базы целесообразна в следующих ключевых направлениях:

- *уменьшение топологических размеров элементов, сопровождающееся увеличением производительности, повышением функциональных возможностей и снижением стоимости интегральных схем (ИС);*
- *дальнейшее повышение степени интеграции ИС ($10^{10} \dots 10^{12}$ элементов на $см^2$) и модульных сборок (электровакуумных и твердотельных электронных приборов);*
- *переход от гибридных радиочастотных ИС к монолитным ИС;*
- *быстрое освоение диапазона частот свыше 100 ГГц с использованием технологий квантовой наноэлектроники (электронных приборы на квантово-размерных эффектах – туннельно-резонансные диоды, полевые туннельно-резонансные транзисторы);*
- *создания двух- и трехвыводных СВЧ приборов на основе нанотехнологии;*

- снижение стоимостей малогабаритных передающих устройств мощностью $\sim 50 \dots 80$ Вт в диапазоне частот 18 ... 40 ГГц (для РЛС, средств РЭБ и связи);
- создание нового поколения усилителей сигналов в диапазоне 4...150 ГГц на основе технологий эпитаксиальных гетероструктур: арсенида галлия (GaAs) – для миниатюрных, маломощных приемных устройств; карбида кремния (SiC) – для мощных (300...500 Вт) РЛС диапазона 3...10 ГГц; нитрида галлия – для высокомощных РЛС диапазона более 10 ГГц; фосфида индия (InP) – для РТС диапазона 100...150 ГГц;
- создание транзисторов на гетеропереходах (размером менее 50 нм), работающих без применения криогенного охлаждения в диапазоне свыше 300 ГГц;
- разработка мощных ($\sim 100 \dots 120$ Вт) транзисторных (статического индуцирования) усилителей мощности для рабочего диапазона 3...5 ГГц;
- широкое внедрение микроволновых, в основном пассивных, устройств на основе пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП): линий передачи, резонаторов, фильтров, мультиплексоров, фазовращателей, переключателей и ограничителей, антенных систем, а также гибридных устройств, представляющих собой сочетание полупроводниковых и ВТСП-элементов, и высокостабильных генераторов с использованием структур типа диэлектрический резонатор/ВТСП-пленка;
- создание устройств, обеспечивающих многочастотные режимы генерации сигналов в диапазоне до 150 ГГц, на основе слоистых бигиротропных структур феррит-полупроводников с применением железо-иттриевого граната и сильно анизотропного феррита;
- широкое применение в РЛС быстродействующих акустооптических устройств спектрального анализа сигналов (фильтров с быстрой перестройкой по частоте), волоконно-оптических синтезаторов радиосигналов (10...200 ГГц) и каналов передачи информации (с пропускной способностью 3...10 Гбайт/с), магнитоакустических элементов уплотнения (сжатия) широкополосных сигналов и т.д.;
- повышение скорости преобразования сигналов (до $10^{10} \dots 10^{12}$ преобразований в секунду) и разрешающей способности (до 18...20 разрядов) при одновременном снижении уровня собственных шумов;
- использование природных и искусственных алмазов в высокочастотных твердотельных приборах РТС для обеспечения их функционирования в экстремальных условиях;
- построение устройств обработки сигнальной информации на основе гибридных оптоэлектронных процессоров, оптических соединений (10...30 ГГц) и оптических ЗУ большого объема памяти;
- массовое производство функциональных узлов приемо-передающих устройств на основе технологий нано- и микроэлектромеханических систем (МЭМС);
- создание сверхминиатюрных устройств радиоэлектроники (для диапазона 500...1000 ГГц), реализованных полностью на сверхпроводящих элементах;
- создание основных радиоэлектронных компонентов (конденсаторов, резисторов, транзисторов) на основе использования углеродных нанотрубок.

2.3. Возможные направления проведения поисковых работ и ожидаемые результаты

2.3.1. Поисковые работы

1. По созданию перспективных функциональных узлов и элементной базы различного назначения, классификации, конструкции и областей применения:
 - расширения области применения ЛБВ в сравнении с полупроводниковыми усилителями как в низкочастотную, так и в высокочастотную часть, используемых в настоящее время рабочих диапазонов частот в усилителях для космических передатчиков;
 - разработки мощных СВЧ-модулей как для военного, так и для коммерческого использования, как в космической, так и в наземной связи;
 - создания миниатюрных ЛБВ для быстро развивающегося направления мощных модулей при освоении все более высокочастотных диапазонов, вплоть до 40 ГГц и более;
 - создания клистронов на основе приборов с многоступенчатым коллектором;
 - создания для транспортируемых и бортовых радиолокационных систем усилителя со скрещенными полями (УСП), обеспечивающего высокий КПД, малые размеры и относительно низкое рабочее напряжение;
 - создания приборов СВЧ диапазона частот, содержащие две структуры, анодную и катодную, с согласованными дисперсионными характеристиками;
 - создания функциональных узлов приемо-передающих устройств на основе технологий нано- и микроэлектромеханических систем (МЭМС);
 - создания сверхминиатюрных устройств радиоэлектроники (для диапазона 500...1000 ГГц), реализованных полностью на сверхпроводящих элементах;
 - - создания основных радиоэлектронных компонентов (конденсаторов, резисторов, транзисторов) на основе использования углеродных нанотрубок.

2. По созданию функциональных устройств и элементной базы для создания радиолокационных систем (датчиков) распознавания (радиовидения) в терагерцовом диапазоне радиоволн («окна прозрачности»: 0.88, 0.96 и 1.3 мм).

2.3.2. Ожидаемые результаты

1. При разработке мощных СВЧ-модулей появляется возможность получить:

- в диапазонах (2 и 6 ГГц) мощности порядка 100 Вт на твердотельных передатчиках при их компактной конструкции, а также расширение диапазона мощных модулей военного назначения от 6...18 ГГц до 2...18 ГГц и 18...35 ГГц и выше (последнее обстоятельство может иметь принципиальное значение при создании перспективных систем РЭП);

- средние мощности от 40 до 200 Вт, усиление до 50 дБ и полосы частот до трех и более октав. Требования к импульсным характеристикам, необходимые для РЛС, легко реализуются путем введения быстродействующего модулятора с наносекундным временем нарастания и спада импульсов при частоте повторения импульсов сотни килогерц. В зависимости от назначения модули могут работать на частотах в диапазоне от 2 до 45 ГГц. Общий КПД оптимизированных узкополосных конструкций достигает 50%, а многооктавных широкополосных – более 35%.

2. При создании мощных ЭВП миллиметрового диапазона (8 и 3 мм) для РЛС на приборах: гируклистрон, гируЛБВ, пениотрон могут быть реализованы мощности до 100 кВт в импульсе.

3. Для транспортируемых и бортовых радиолокационных систем привлекательными становятся усилители со скрещенными полями (УСП), имеющие высокий КПД, малые размеры и относительно низкое рабочее напряжение. УСП с эмитирующим катодом («основанием») обычно обеспечивают невысокие коэффициенты усиления 8...15 дБ в полосе пропускания в среднем 10...15% при высоком КПД 35...60% и имеют уровни шума от -45 до -55 дБ/МГц. В УСП с катодным возбуждением – новом приборе, где входной ВЧ-сигнал подается в катодную замедляющую структуру, удалось радикально улучшить характеристики усилителя обратной волны с замкнутым потоком. Высокий коэффициент усиления и пониженный уровень шума были получены в 1,25-мегаваттной УСП.

4. При создании приборов СВЧ диапазона частот, содержащих две структуры, анодную и катодную, с согласованными дисперсионными характеристиками может быть реализован коэффициент усиления 30 дБ в полосе частот 12% и при уровне шума ниже -75 дБ/МГц. При работе на полную мощность при напряжении 30 кВ КПД усилителя может составить 69%.

5. Создание сверхминиатюрных устройств радиоэлектроники (для диапазона 500...1000 ГГц), могут быть реализованы полностью на сверхпроводящих элементах.

В ближайшем будущем могут также быть созданы сверхпроводниковые структуры для усиления преобразованного сигнала и его цифровой обработки в реальном масштабе времени.

Разработанная конструкция позволит достичь шумовой температуры, близкой к квантовому пределу. Проведенные испытания отдельного пикселя (единичного элемента) матричного интегрального приемника подтверждают достижение на частоте 500 ГГц следующих параметров: диапазон перестройки ~70 ГГц, минимальная шумовая температура ~ 100 К (дальнейшая оптимизация входного и выходного трактов приемника позволила достичь на частоте 470 ГГц рекордную (для устройств этого класса) двухполосную шумовую температуру – 40 К, а диаграмма направленности интегрального приемника: ширина основного максимума – 4 градуса, уровень боковых лепестков не более – 17 дБ).

Особенно важным результатом здесь является то, что в окончательной конструкции многоэлементного приемника взаимовлияние отдельных пикселей не сказывается на функционировании полной матрицы приемных элементов (в многоэлементном приемнике на частоте 500 ГГц уже достигнута шумовая температура ~150 К). Ожидается, что при серийном производстве одна микросхема интегрального приемника будет стоить в 20...30 раз меньше, чем один традиционный генератор того же диапазона на лампе обратной волны с магнитом и высоковольтным блоком питания.

3. ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Очевидно, что важнейшие характеристики радиолокационных систем обнаружения, автоматического распознавания, наведения и т.п. будут определяться эффективностью разработанных к тому времени методов проектирования радиолокационной техники, алгоритмов адаптивной обработки сигналов, достигнутой производительностью обработки информации (уровнем совершенства оптических или квантовых процессоров, технологий распределенных вычислений) и быстродействием запоминающих устройств большого объема [5, 80, 81].

В последние годы в области создания средств обработки данных были достигнуты определенные подвижки. Эти подвижки во многом обязаны той трезвой оценке создавшейся ситуации, которая была осуществлена на уровне органов, ответственных за заказы техники. Было признано, что сложившееся отставание в области компьютерных технологий от развитых в промышленном отношении стран преодолеть в обозримой перспективе не удастся. Поэтому было принято решение о допущении в опытных образцах ВВТ средств обработки данных, построенных на базе покупных компонентов.

Такое решение позволило практически поставить вопрос о производстве средств электронно-вычислительной техники (ЭВТ) для военного применения, близких по своим характеристикам к зарубежным аналогам [67].

Анализируя данные последних работ в данном направлении необходимо помнить, что технические средства военного назначения, в силу ряда дополнительных требований, выдвигаемых в военной сфере (повышенная устойчивость к воздействию факторов внешней среды, более жесткие требования по энергетике и т.п.), по своим функциональным характеристикам обычно заметно уступают на заданном временном интервале коммерческим образцам [67, 82].

Вместе с тем, следует заметить, что развитие компьютерных технологий военного применения с учетом некоторого временного сдвига, как правило, повторяет этапы, пройденные коммерческой техникой. Иными словами, то, что сегодня достигнуто в коммерческих образцах, завтра будет реализовано в военных. Причем, как показывает опыт, временной разрыв при этом постоянно сокращается.

Основу средств обработки и передачи информации составляют микроэлектронные компоненты – большие и сверхбольшие интегральные схемы, являющиеся главными компонентами современных ЭВМ и аппаратуры передачи данных. В своем развитии электронные микросхемы прошли ряд этапов, характеризующихся степенью интеграции компонентов на одном кристалле схемы: от схем с малой и средней интеграцией (МИС и СИС) до сверхбольших интегральных схем (СБИС), количество элементов на кристалле которых измеряется тысячами. Один из основателей фирмы “Intel” Г.Мур еще в 1965 г. предсказал, что плотность размещения (степень интеграции) транзисторов на одном кристалле микросхемы будет увеличиваться вдвое каждые два года. Эта тенденция выполняется достаточно строго до наших дней.

На практике это означает, что с ростом степени интеграции микросхем увеличивается быстродействие процессоров, возрастает емкость оперативных запоминающих устройств, а также улучшается надежность устройств. Последнее обстоятельство связано с тем, что с ростом степени интеграции элементов все большее число межсоединений электронных устройств реализуется на внутреннем (внутри кристалла), где они существенно более надежны, чем межсоединения на внешнем уровне (между кристаллами).

Результаты анализа развития персональных ЭВМ за последние два десятилетия показывают, что за относительно короткий промежуток времени достигнуты весьма значительные успехи в плане увеличения емкости внешних запоминающих устройств (ЗУ) (накопителей на жестком диске). Этих успехов удалось добиться во многом благодаря переходу к магниторезистивным головкам, обладающим более высокой чувствительностью по сравнению с прежними тонкопленочными седуктивными головками. По оценкам специалистов на данной технологии возможно повышение плотности записи информации (емкости накопителя) ещё в несколько раз.

Дальнейший прогресс в части этого вида массовой памяти связывается с переходом на более чувствительные головки на основе эффекта спин-клапан, которые способны обеспечить дальнейшее увеличение емкости ЗУ примерно на порядок.

Физическое ограничение на плотность записи информации, называемое супермагнитным пределом, соответствует поверхностной плотности 50-100 Гбит/дюйм². Однако ряд специалистов считает, что этот предел будет преодолен с появлением новых материалов и новых структур дискового покрытия.

Особого внимания заслуживает вопрос перспективы развития оптических дисков, особенно удобных для военных приложений, связанных с обработкой цифровой картографической информации. Существующие CD-ROM и CD-R диски уже позволяют оперировать емкостью в несколько Гбайт информации. Ожидается, что в ближайшей перспективе в этой области будут доминировать более совершенные DVD-диски, емкость которых доведена также до нескольких Гбайт. В качестве дальнейшей перспективы можно назвать, по-видимому, голографическую массовую память, вызывающую наибольший интерес у разработчиков внешних запоминающих устройств (ВЗУ).

Анализ вопросов развития средств связи и передачи данных в военных системах АСУ показывает, что в данном случае целесообразно выделить два уровня информационного воздействия в автоматизированных системах военного назначения (ВН): *локальный и территориальный.* Под *локальным* уровнем будем понимать информационное воздействие в рамках командных пунктов (КП) и пунктов управления (ПУ) войсковых формирований и штабов. *Территориальный* уровень характеризуется информационным обменом между КП (ПУ) подчиненных, вышестоящих и взаимодействующих формирований.

На локальном уровне в стационарных условиях возможно развертывание кабельной сети для организации информационного обмена. Это помимо прочего позволяет упростить многие проблемы, связанные с обеспечением скрытности управления.

Кабельные сети передачи данных позволяют обеспечивать весьма высокие скорости передачи информации.

В настоящее время уже *достаточное распространение получили сети на волоконно-оптических каналах с быстродействием в несколько Гб/с.* На подходе сети, построенные на новых принципах с быстродействием, измеряемым в 10Гб/с (10Gigabit Ethernet) и более.

Использование же беспроводной связи, в том числе и космической, позволяет обеспечить скорости передачи информации по одному каналу, измеряемые десятками Кб/с, в отдельных случаях – единицами Мб/с. Ожидать значительного прогресса в этом отношении в ближайшей перспективе достаточно проблематично. *Вместе с тем, структура и характеристики потоков информационного взаимодействия в*

оперативном и тактическом звеньях таковы, что основные информационные потребители органов управления на территориальном уровне могут быть удовлетворены за счет выделения необходимого количества каналов беспроводной связи.

В качестве подтверждения актуальности решаемых задач по развитию способов и методов обработки радиолокационных сигналов и передачи информации потребителю в реальном масштабе времени интересно привести две работы, выполненные за последнее время.

В [82, 83] дается описание архитектуры и программной реализации сигнального процессора, предназначенного для первичной обработки радиолокационной информации в режиме реального времени. Обработка сигналов в процессоре включает: адаптивное усиление и фильтрацию сигнала с режекцией помех, некогерентное накопление сигнала и многоканальное его обнаружение с адаптацией порога к уровню помех, а также обработку сигнала в CFAR-фильтре. Программная реализация процессора представляет собой систему программ, включающую программы моделирования радиолокационных данных и программы обработки данных. Получена оценка параллелизма программной реализации процессора.

Реконфигурируемая архитектура мультипроцессорной системы обработки сигналов сверхширокополосной РЛС в реальном времени освещается в [83].

Здесь приводится полный анализ параметров системы обработки сигналов в реальном времени сверхширокополосной (UWB) РЛС. Обработка сигналов UWB РЛС является многоцелевой задачей и требует интенсивной вычислительной процедуры с применением параллельной сети мультипроцессоров, способных эффективно завершать поставленные задачи. В результате сравнения преимуществ и недостатков различных типов мультипроцессоров предложена реконфигурируемая архитектура системы обработки сигналов в реальном времени UWB РЛС. Проверка применимости предложенной архитектуры в реальных системах подтвердила ее высокие показатели, гибкость и реконфигурируемость.

Общая характеристика влияния производства средств вычислительной техники на развитие радиолокационных систем представлена на рис. 2.

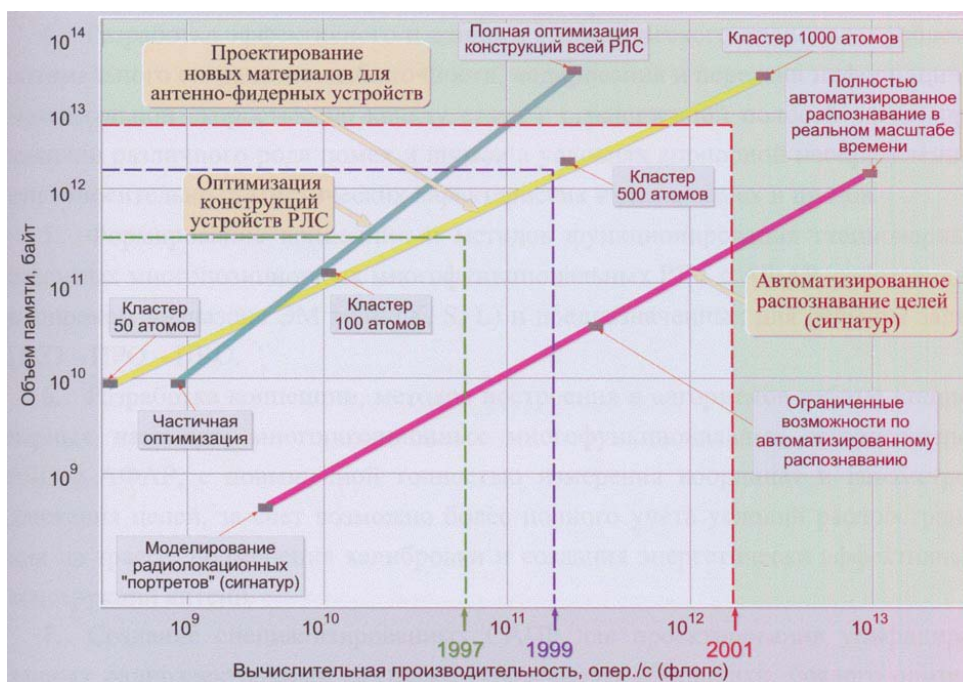


Рис. 2. Общая характеристика влияния роста производительности средств вычислительной техники на развитие РЛС.

На основании изложенного можно заключить.

1. Последние два десятилетия характеризуются весьма существенным прогрессом в области компьютерных технологий, обусловившим значительное возрастание функциональных возможностей средств обработки и передачи информации. Более того, на сегодняшний день не существует сомнений в том, что этот прогресс продолжится как в ближайшей, так и более отдаленной перспективе.

2. Потребности (предъявляемые требования) в вычислительных ресурсах для решения большого объема задач как гражданского, так и военного назначения, оцененные даже с учетом сегодняшних представлений о применении электронной техники, не могут быть в полной мере удовлетворены за счет создаваемых средств ЭВМ. Положение может еще более усугубиться, если учесть появление новых применений ЭВМ в военном деле.

Таким образом, в качестве фундаментальных исследований в области развития средств обработки информации на период ближайшей перспективы остается изыскание новых путей и способов удовлетворения потребностей в обработке информации в реальном масштабе времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров Р.П., Канн Е.В., Садыков Р.Р., Фролов С.С. Анализ современных методов военной радиолокации и обоснование направлений их дальнейшего развития // Вопросы оборонной техники, 2005, сер.16, вып.3-4, с.6-11
2. Быстров Р.П., Соколов А.В., Чесноков Ю.С. Методы современной военной радиолокации // Вооружение. Политика. Конверсия, 2004, № 5, с. 36-40.
3. Быстров Р.П., Кузнецов Е.В., Соколов А.В. Функциональные устройства и элементная база радиотехнических устройств // Вооружение. Политика. Конверсия, 2004, № 6, с.30-35.
4. Акиншин Р.Н., Быстров Р.П., Кузнецов Е.В., Михайлов Д.Ю., Соколов А.В., Чесноков Ю.С. Развитие радиоэлектронной техники радиолокационных систем // Успехи современной радиоэлектроники, 2005, № 10, с. 24-58.
5. Акиншин Н.С., Румянцев В.Л., Прцюк С.В. Поляризация селекция и распознавание радиолокационных сигналов. - Тула.: Лидар, 2000. – 310 с.
6. Выставкин А.Н., Коваленко А.Г. и др. Сверхпроводниковые наноболометры - сенсоры на горячих электронах для сверхчувствительных матричных радиометров терагерцового диапазона частот / Труды 3 Всероссийской научно-технической конференции (ВНТК) «Радиолокация и радиосвязь», 26-30 окт. 2009, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. – с. 378-381.
7. Хлопов Г.И. Когерентная радиолокация в миллиметровом диапазоне // Успехи совр. радиоэлектроники, 1999, с.3-27.
8. Белоцерковский Г.Б. Антенны. - М.: Оборонгиз, 1962. – 492 с.
9. Звездина Ю.А., Лабунько О.С. Оценка влияния взаимных сопротивлений крестообразных вибраторов на отношение сигнал/помеха+шум в ААР / Труды 3 ВНТК «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 26-30 окт. 2009. – с. 26-31.
10. Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Малогабаритная плоская антенна как элемент сверхширокополосной двухполяризационной решетки / Труды 3 ВНТК «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 26-30 окт. 2009. – с. 77-82.
11. Крахин О.И., Зенин В.А. Теплоэнергетическая установка для ФАР / Труды 3 ВНТК «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 26-30 окт. 2009. – с. 749-751.
12. Мищенко С.Е., Махов Д.С., Старченко А.В. Метод синтеза антенной решетки по требованиям к форме диаграммы направленности и вариации нормы тока в раскрыве / Труды 3 ВНТК «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 26-30 окт. 2009. – с. 100-103.
13. Прилуцкий А.А. Излучение из периодической системы волноводов с многослойным магнитоэлектрическим заполнением в поперечном сечении / Труды 3 ВНТК «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 26-30 окт. 2009. – с. 58-61.
14. Heer Christoph, Link Jurgen. The LightSAR X-band sensor design and performance // EUSAR'98: European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, 25-27 May, 1998. Berlin: VDE; Offenbach: VDE. 1998, с. 79-82.
15. Carande Richard E. Adding value to next generation SAR data: a remote sensing business imperative // EUSAR 2000: 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich, 23-25 May, 2000. Berlin; Offenbach: VDE. 2000, с. 61.
16. Lu Shanwei, Gao Wenjun, Li Sichao, Diao Hainan. Beijing hangkong hangtian daxue xuebao // J. Beijing Univ. Aeron. and Astronaut.– 1998.– 24, № 2.– С. 133-136.
17. Uematsu Masahiro, Ojima Takashi, Takahashi Nobuharu, Goto Naohisa, Hirokawa Jiro, Ando Makoto. Slotted leaky waveguide array antenna: Пат. 5579019 США, МКИ6 Н 01 А 13/10/; Nippon Steel Corp., Naohisa Goto.- № 580787; Заявл. 29.12.95. Оpubл. 26.11.96. Приор. 7.10.93, № 5-276152 (Япония); НКИ 343/771.
18. Ломан В.И., Ильинов М.Д., Гоцуляк А.Ф. Микрополосковые антенны // Зарубежная радиоэлектроника, 1985, №10, с.99-115
19. Menzel W., Wolff I. – Nachrichtenelektronik, 1979, № 1.
20. Dianzi xuebao // Acta electron., 1996, 24, № 6, p. 5-9.
21. Electr.Let., 1996, 32, № 19, p. 1741-1742.
22. Suckrow S. Microstrip-Antennen // Funkschau, 1998, № 6, p. 67-68.
23. IEEE Proc. Microwaves, Ant. and Propag.-1995-142, № 6, p. 495-497.
24. Буянов Ю.И., Бульбин Ю.В., Дирин В.Н., Супгко В.П., Чуйков В.Д. Пат. 2111584 Россия, МКИ6 Н 01 Q 9/02/. Инж.-радиофиз. центр Сиб. физ.-техн. ин-та, Дирин В.Н.- № 96123317/09. Заявл. 16.12.96. Оpubл. 20.5.98. Бюлл. № 14.
25. Rau Richard, McClellan James H. Analytic models and postprocessing techniques for UWB SAR // IEEE Trans. Aerosp. and Electron. Syst., 2000, 36, № 4, p. 1058-1074.
26. Ишкова Э.А., Евсиков М.В. // Антенны, 1998, № 1, с. 36-42.
27. Lihoshi Akira, Tohya Ken-ichi; Honda Giken Kogyo K.K. Multibeam radar system: Пат. 5579010 США, МКИ6 G 01 S 13/60/— № 449822. Заявл. 24.5.95. Оpubл. 26.11.96. Приор. 27.5.94, № 6-137993 (Япония); НКИ 342/70.
28. Sullivan Anders, Damarla Raju, Geng Norbert, Dong Yanting, Carin Lawrence. Ultrawide-band synthetic aperture radar for detection of unexploded ordnance: modeling and measurements // IEEE Trans. Antennas and Propag., 2000, 48, №9, p.1306-1315.
29. Sherwood William J., Rodeffer Charles E., Rodeffer Mark A., Winegard Co. Deployable satellite antenna for use on vehicles. Пат. 5528250 США, МКИ6 Н 01 Q 1/32/- № 400333. Заявл. 7.3.95. Оpubл. 18.6.96; НКИ 343/711.
30. Быстров Р.П., Садыков Р.Р., Соколов А.В. Развитие антенных систем для радиотехнических систем различного базирования // Радиоэлектроника (Электронная версия), ИРЭ РАН, 2005, с. 28.

31. Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Активная антенная решетка для приема импульсов с произвольной поляризацией / Труды 3 ВНТК «Радиолокация и радиосвязь», ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН, 26-30 окт. 2009.– с.36-41.
32. Sherwood William J., Rodeffer Charles E., Rodeffer Mark A. Deployable satellite antenna for use on vehicles: Пат. 5528250 США, МКИ6 Н 01 Q 1/32; Winegard Co.- № 400333. Заявл. 7.3.95. Оpubл. 18.6.96; НКИ 343/711.
33. Tanaka Masato, Matsumoto Yasushi, Takahashi Takashi // Tsushin sogo kenkyujo kiho // Rev. Commun. Res. Lab., 1997, 43, № 3, p. 417-426.
34. Matsumoto Yasushi, Kozono Shinichi // Tsushin sogo kenkyujo kiho // Rev. Commun. Res. Lab., 1997, 43, № 3, p. 391-395.
35. Smith Bruce A. Large deployable antenna developed for Thuraya // Aviat. Week and Space Technol, 1998, 148, №14, p.72-73.
36. Herique A., Phalippou L., Ramongassie S. High resolution SAR constellation for risk management // CEOS SAR Workshop, Toulouse, 26-29 Oct., 1999. Noordwijk: ESTEC, 2000, p. 287-292.
37. Suess M., Vb'lker M., Wilson J.J.W., Buck C.H. Superresolution: Range resolution improvement by coherent combination of repeat pass SAR images // EUSAR'98: European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, 25-27 May, 1998. Berlin: VDE; Offenbach: VDE. 1998, p. 565-569.
38. Lohner A. Application and characteristic of high resolution estimation techniques for range compression in SAR systems // EUSAR 2000: 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich, 23-25 May, 2000. Berlin; Offenbach: VDE. 2000.
39. Vignaud L. Target features extraction in SAR/ISAR images: high resolution bright points extraction and wide angle tracking techniques // EUSAR 2000: 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich, 23-25 May, 2000. Berlin; Offenbach: VDE. 2000, p. 595-598.
40. Berizzi F. ISAR imaging of targets at low elevation angles // IEEE Trans.Aerosp. and Electron.Syst.,2001,37,№ 2, p.419-435.
41. Введение в интегральную оптику: Сб. ст., пер. с англ., п/ред. Т.А. Шмаонова. – М.: Мир, 1977.
42. Cayrefourca I., Schaller M., Fourdin C. Optical switch design for true time delay array antenna // IEE Proc. Optoelectron. [IEE Proc. J] – 1998.– 145, № 1.– С. 77-82.
43. Клеев А.И., Ямала Х. // Радиотехника и электроника, 1997, т. 42, № 7, с. 801-807.
44. Cai Y., Brener I., Lopata J., Wynn J., Pfeiffer L., Federici J. Design and performance of singular electric field terahertz photoconducting antennas // Appl. Phys. Lett., 1997, v. 71, № 15, p. 2076-2078.
45. Левшин В.П., Стручев В.Ф. Адаптивные фазированные антенные решетки с ограниченным числом степеней управления // Зарубежная радиоэлектроника, 1982, № 1, с. 31-42.
46. Ломан В.И., Комаров В.М., Нестеренко И.К. Адаптивные антенные решетки в системах широкополосной связи // Зарубежная радиоэлектроника, 1983, № 5, с. 3-23.
47. Уидроу, Мантей, Гриффитс, Гуд. / ТИИЭР, 1976, т. 55, № 12.
48. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении -М.: Сов. радио, 1978.
49. Ground target tracking with STAR radar. Koch W., Klemm R. IEE Proc. Radar, Sonar and Navig. 2001, 148, № 3, с.173-185.
50. A maximum-likelihood beamspace processor for improved search and track. / Davis Richard M., Fante Ronald L. // IEEE Trans. Antennas and Propag. 2001, 49, №7, с. 1043-1053.
51. Phased array multiple area nulling antenna architecture: Пат. 5579016 США, МКИ6 Н 01 Q 3/22 / Wolcott James L., Wong William C., Westall Kenneth E.; TRW Inc.- № 531262; Заявл. 20.9.95; Оpubл. 26.11.96; НКИ 342/378.
52. Пат. 2110076 Россия, МКИ6 GOS 3/38 / Голик А.М., Шпенст В.А., Чирков Д.Ю., Клейменов Ю.А., Бондарь Э.Л.- №96115842/09. Заявл. 31.7.96. Оpubл. 27.4.98. Бюл. №12.
53. Пат. 2101809 Россия, МКИ6 Н 01 Q 3/26 / Хершфилд Эдвард, Мэттьюс Эдгар У. (мл.), Лу Хауард Х.; Спейс Системз/Лорал, Инк. (US).— № 9400059/09; Заявл. 4.1.94; Оpubл. 10.1.98, Бюл. № 1.
54. Alternative of active array technology use in spaceborne L-band SAR. / Armand N., Goriachkin O., van't Klooster K., Makridenko L., Neiman I., Osipov I., Shishanov A., Zakharov A.// EUSAR 2000: 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich, 23-25 May, 2000. Berlin; Offenbach: VDE. 2000, с. 369-371.
55. Retrodirective array tracking prediction using active element characterisation. / Toh B. Y., Fusco V. F., Buchanan N. B. // Electron. Lett. 2001. 37, № 12, с. 727-728.
56. Electron. Lett.-1996-32, N19- 1742-1743.
57. IEE Proc. Microwaves, Ant. and Propag.[IEE Proc. H]-1995-142, N 6 - с 498.
58. Крахин О.И., Резников Д.А., Смирнов А.А. //Теория и техн. космич. тросов и трансформируемых систем /Моск. техн. университет связи и информат.-М.,-1997.-с.50-58.
59. Hirsh W.// Electron. Austral.-1997- 59, N 10.-pp 81-83.
60. Фикс Я.А. Цифровые методы передачи информации по многолучевым радиоканалам. / Зарубежная радиоэлектроника, № 6, 1982. –с. 3-20.
61. Ин. печать об экон., науч.-техн. и воен. потенц. гос. - участн. СНГ и техн. средствах его выявл. Сер. Техн. средства развед. служб кап. гос. / ВИНТИ.— 1997.— № 8.— С. 32-42.
62. Two-port synthetic aperture radar system for radar detection of targets: Пат. 5563601 США, МКИ6 G 01 S 13/90 / Cataldo T. J.; Northrop Grumman Corp.— № 766309; Заявл. 16.8.85; Оpubл. 8.10.96; НКИ 342/25.
63. Simulator of ocean scenes observed by polarimetric SAR / Cochin C., Buriat S., Saillard J., Delhommeau G. // EUSAR 2000: 3rd European Conf. on Synthetic Aperture Radar, Munich, 23-25 May, 2000. Berlin; Offenbach: VDE. 2000, с. 277-280.
64. Paine A.S. Optimal adaptive processing for domain factorised element-digitised array radar // IEEE Proc. Radar, Sonar and Navig., 2001. 148, № 2, с. 81-88.
65. Переслегин С.В., Доставалов М.Ю., Иванов А.Ю. Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды // 3-я Всероссийская научная конференция, Муром, 17-18 июня, 1999: Сб. докл. - Муром: Изд-во Муром. ин-та ВлГУ, 1999, с. 273-275.
66. Быстров Р.П., Выставкин А.Н., Голант М.Б., Мериакри В.В., Кошелец В.П., Синецын Н.И., Соколов А.В. Миллиметровые и субмиллиметровые радиоволны: электровакуумные приборы, газовая и лучеводная спектроскопия, элементы и устройства сверхпроводниковой электроники (посвящена академику Девяткову Н.Д.) // Зарубежная радиоэлектроника, 1997, № 11, с. 3-31.

67. Быстров Р.П., Потапов А.А., Соколов А.В. Миллиметровая радиолокация с фрактальной обработкой сигналов. Под ред. Р.П. Быстрова и А.В. Соколова. - М.: Радиотехника, 2005. – 367с.
68. Акиншин Н.С., Борзов А.Б., Быстров Р.П., Румянцев В.Л., Самойлов С.И., Соколов А.В. Радиоизмерительные и электронные системы в короткой части миллиметрового диапазона радиоволн // Зарубежная радиоэлектроника, № 5, 1999, с. 22–66.
69. Гуляев Ю.В., Захарченко Ю.Ф., Сеницын Н.И. Новый класс мощных низковольтных многолучевых ЛБВ на цепочках связанных многозачерных резонаторов с поперечно-протяженным типом взаимодействия для бортовых радиолокационных и телекоммуникационных систем коротковолновой части миллиметрового диапазона волн // Журнал радиоэлектроники, 2009, № 10, с. 9-18.
70. Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н. Генерация и излучение мощных пикосекундных электромагнитных импульсов. / Труды 3 ВНТК «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 26-30 окт. 2009. – с. 760.
71. Сеницын Н.И., Гуляев Ю.В., Девятков Н.Д., Голант М.Б., Алексеенко А.М., Захарченко Ю.Ф., Торгашов Г.В. Возможности вакуумной микроэлектроники на пути к построению СВЧ вакуумных интегральных схем // Радиотехника, 1999, № 4, с. 8-17.
72. Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К. Микроволновое ЭЦР вакуумно-плазменное воздействие на конденсированные среды в микроэлектронике (физика процессов, оборудование, технология) // Зарубежная электронная техника, 1997, № 1, с. 77-120.
73. Гуляев Ю.В., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В., Чернозатонский Л.А., Косаковская З.А., Захарченко Ю.Ф. Нанотрубные углеродные структуры - новый материал эмиссионной электроники // Микроэлектроника, 1997, т. 26, № 2, с. 84-88.
74. Патент на изобретение № 2239256 «Многолучевой клистрон», авторы: Гуляев Ю.В., Захарченко Ю.Ф., Сеницын Н.И., приоритет от 24.04.2003.
75. Гуляев Ю.В., Захарченко Ю.Ф., Сеницын Н.И. Перспективы развития нового класса низковольтных многолучевых электровакуумных СВЧ приборов с распределенным поперечно-протяженным взаимодействием // Радиотехника и электроника, 2005, т. 50, № 9, с. 1198-1206.
76. Никитов С.А. К 70-летию академика Гуляева Ю.В. // Радиоэлектроника, 2005, № 5, с. 2-10.
77. Гуляев Ю.В., Пустовойт В.И. Усиление поверхностных волн в полупроводниках // ЖЭТФ, 1964, т.47, №6, с.2251-2253.
78. Гуляев Ю.В. Акустоэлектроника – российский приоритет // Радиоэлектроника и управление, 2002, 2-3, с. 55-61.
79. Багдасарян А.С. Устройства на поверхностных акустических волнах в системах и средствах связи // Инженерная микроэлектроника, 2002, 8(71), с.33-39.
80. Безкорвайный М.М., Костогрызов А.И., Львов В.М. Инструментально-модулирующий комплекс для оценки качества функционирования информационных систем // Вооружение. Политика. Конверсия, 2001, №2, с. 303.
81. Попов И.В. Сетевая война // Советская Россия, № 3, 19.01.2010.
82. Даскалов П., Янева Д., Гешева Е. // Инф. технол.- 1998.- № 1.- С. 37-41.
83. Chen Nuxing, Deng Ge, Su Yi. Guofangkeji daxue xuebao // J. Nat. Univ. Def. Technol., 1998, v. 20, № 1, p. 68-72.

DEVELOPMENT RADIOELECTRONIC ENGINEERING AERIALS

Bistrov R. P., Potapov A. A.

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS
Mokhovaya str., 11-7, Moscow, 125009, Russia

Summary Review contains the analysis of probing and developments for the last years, devoted to achievement of radio electronic engineering in of space, aerial and terrestrial (above-water) systems value. The results of studying of antenna systems with processing of a signal, perfecting of the functional devices and element base in radar and communication are considered. The possibilities of application of devices of computer technology in radar-tracking systems are analyzed. The perspectives of fundamental and search investigations in development of element base of radar engineering XXI of century are estimated.

Быстров Рудольф Петрович, член-корреспондент РАЕН, д.т.н., с.н.с., заслуженный деятель науки РФ, в.н.с. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009 Москва, ул.Моховая, 11, корп.7, к.328, тел. 629-3406, rudolf@cplire.ru
Потапов Александр Алексеевич, академик РАЕН, д.ф.-м.н., гл.н.с. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7, к.328, тел. (495)629-3406, potapov@cplire.ru; www.potapov-fractal.com.