

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ НЕПОДВИЖНЫХ И ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Нефедов С.И., Нониашвили М.И., Лаговьер А.А., Голубцов М.Е.
НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрены перспективы развития миллиметрового диапазона длин волн для построения различных радиолокационных систем. Приводятся результаты работ, проводимые в НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана в мм диапазоне и экспериментальные результаты по обнаружению объектов техники на фоне подстилающей поверхности

В современной радиолокации существует несколько областей, в которых выбор как можно более высокой рабочей частоты является основным, если не единственным средством достижения тактико-технических характеристик проектируемых систем.

Общими критериями выбора длины волны в таких системах являются:

- достижение высокого углового разрешения при ограниченных размерах антенного устройства;
- невысокие требования к зависимости дальности обнаружения от метеорологических условий, обычно предъявляемые либо к системам ближнего радиуса действия, либо к системам заатмосферного базирования.

Актуальным направлением является применение мм диапазона в РЛС сопровождения целей и ракет (ССЦР) зенитных ракетных комплексов (ЗРК) для обнаружения и высокоточного сопровождения низколетящих целей. Применение ССЦР мм диапазона позволит повысить точность измерений и решить проблему борьбы с «антиподами».

Еще одним важным направлением является разработка РЛС авиационного или космического базирования мм диапазона для наблюдения за космическими объектами. Отсутствие потерь в атмосфере и ограниченные размеры антенного устройства делает предпочтительным использование мм диапазона. Для обеспечения дальности обнаружения не менее 1000 км при максимальных линейных размерах антенны не более 2 м требуется средняя мощность передающего устройства не менее 5 кВт, которая может быть обеспечена гирорезонансными приборами.

Основными направлениями разработок РЛС для распознавания объектов в мм диапазоне радиоволн являются [1,9]:

- изыскание новых принципов создания систем радиовидения, работающих в условиях дождя и тумана;
- изучение предельного сверхразрешения по дальности методом перестройки несущей частоты передатчика (применение в РЛС широкополосных сигналов);
- использование возможности применения в радиолокационных системах на ЛА антенных систем с синтезированной апертурой;
- использование адаптивных методов пространственно-временной фильтрации радиолокационных сигналов на фоне различных типов помех;
- реализация алгоритмов, позволяющих эффективно и за минимальное время решать задачи обнаружения, селекции, разрешения и распознавания целей;
- использование различий в спектрах флуктуации амплитуд, фаз и поляризационных характеристик отраженного сигнала объекта;
- развитие многочастотного и многопозиционного радиолокационного обнаружения, позволяющего получить информацию о форме объекта, его размерах, особенно в случаях, когда длина волны соизмерима с размерами элементов объекта.

Повышенное внимание к разработкам в мм диапазоне связано и с активным развитием элементной базы. Этот процесс основан на внедрении мм диапазона в коммерческие системы связи и разработке новых технологий ведущими фирмами производителями и производстве компонентов на серийных заводах. Разработанные новые технологии производства твердотельных усилительных приборов, мощных электровакуумных приборов, антенно-

фидерных устройств позволяют перейти от экспериментальных образцов радиолокаторов мм диапазона к их серийному производству. В последнее время созданы приемные устройства в коротковолновой части мм диапазона, которые по чувствительности практически не уступают устройствам см диапазона. Успехи, достигнутые в разработке когерентных гетеродинных приборов и антенно-фидерных устройств, дают основание ставить вопрос о создании автоматизированных РЛС обнаружения объектов.

Многочисленные публикации указывают на то, что мм радиоволны находят широкое применение в различных радиотехнических системах как в России, так и за рубежом [2-3]. В первую очередь усилия ученых и инженеров направлены на создание активных и пассивных систем обнаружения наземных и воздушных объектов, управления воздушным движением, управления высокоточным оружием. Анализ состояния работ по освоению мм диапазона радиоволн показывает, что в начале третьего тысячелетия следует ожидать поступления на вооружение стран блока НАТО высокоэффективных систем оружия, основанных на использовании техники мм диапазона радиоволн. В таблице 1 приведены обобщенные данные зарубежных образцов РЛС наведения.

Табл. 1 – Обобщенные данные зарубежных образцов РЛС наведения

Наименование системы	Характеристики системы
РЛС обнаружения и управления оружием	
Моноимпульсная РЛС управления огнем противотанковых ракет	РЛС с повышенной скрытностью за счет управления мощностью излучения, оптимального подбора параметров сигнала и его поляризации. Рабочие частоты 94 и 140 ГГц. Разработка ведется с 1981 г. фирмой «Sperry», США
Танковая РЛС «Startle» обнаружения наземных целей и целеуказания	РЛС со сжатием импульсов и ЛЧМ. Рабочие частоты 94 и 230 ГГц. Дальность действия по танку 3...5 км при мощности излучения передатчика 1,5 Вт и чувствительности приемника 10~2 Вт/Гц. Сканирование лучем антенны диаметром 35 см в пределах 3,45° по углу места и 20° по азимуту. Диапазон измерения скорости цели 2...50 км/ч, количество одновременно обрабатываемых целей - 20. Разработка ведется с 1983 г фирмой «Rockwell», США
Радиолокационная система наведения противотанковых ракет третьего поколения типа «Апач»	Рабочая частота 240 ГГц. Разрабатывается фирмой «Rockwell», США
РЛС стрельбы артиллерии, радиолокационный прицел	Рабочая частота 94 ГГц. Разработка ведется фирмой «Standard Electric Lorens», ФРГ
Системы на летательном аппарате	
Твердотельная РЛС наведения оружия	Р Рабочая частота 94 ГГц. Передатчик на импульсном IMPATT диоде мощностью 5 Вт и длительностью импульса 100 нс. Исследования проводятся по программе обнаружения наземных целей с вертолетной платформы фирмами «Lincoln Lab. Massachusetts Inst.», США
Головки самонаведения	
РЛС на ракетах класса «воздух-земля»	Рабочая частота в диапазоне 90...100 ГГц. Проводятся летные испытания фирмами «Hughes» и «Rockwell», США
РЛС для установки на противотанковых ракетах	Рабочая частота 94 ГГц Разработка ведется фирмами «Hughes» и «Rockwell», США
РЛС другого назначения	
РЛС в системе противоракетной обороны	Рабочие частоты 35 и 95 ГГц Разработка ведется фирмой «Lincoln Lab. Massachusetts Inst.», США

На протяжении последних 5 лет в НИИ РЭТ МГТУ им. Н. Э. Баумана активно ведутся работы по освоению мм диапазона [4]. В области создания элементной базы ФАР миллиметрового диапазона можно выделить работы, посвященные созданию элементов ФАР 8-

ми и 3-х миллиметрового диапазона волн на основе ферритовых фазовращателей [5]. На рисунке 1 а показаны отражательный и проходной элементы ФАР Ka-диапазона, позволяющие на их основе строить ФАР с коническим сектором электрического сканирования с углом при вершине $\pm 45^\circ$ [6]. На рисунке 1 б показана отражательная ФАР W-диапазона с коническим сектором сканирования с углом при вершине $\pm 15^\circ$. При реализации элементов ФАР достигнуты следующие параметры элементов Ka-диапазона – энергия переключения не более 80 мкДж, время переключения не более 100 мкс, вносимые потери не более 1,5 дБ. Элементы ФАР W-диапазона, имеющие максимальное быстродействие вследствие особенностей конструкции, обеспечивают значения энергии переключения не более 10 мкДж, время переключения не более 10 мкс, вносимые потери не более 2,5 дБ.

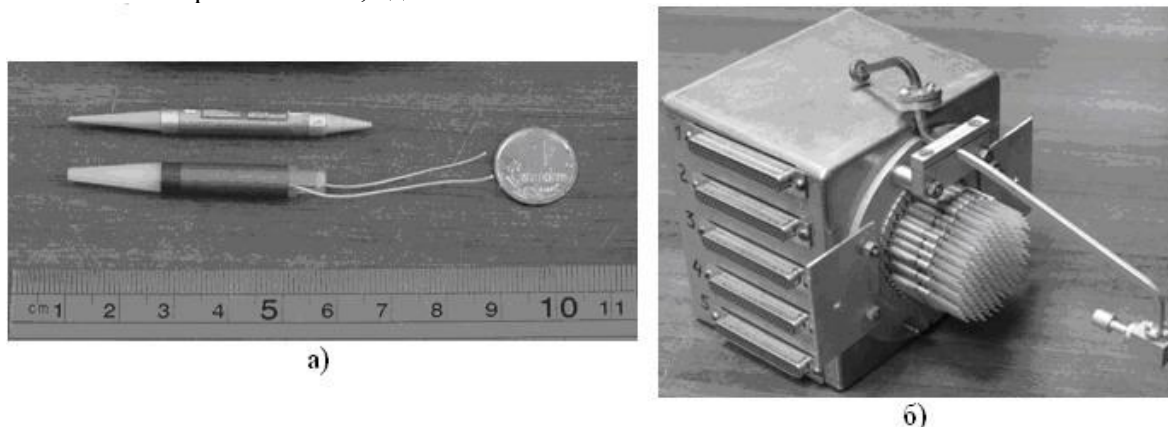


Рис. 1 Элементы ФАР а) Ka-диапазона проходного и отражательного типов и б) ФАР отражательного типа W диапазона

Также в рамках выполнения инновационной образовательной программы национального проекта "Образование" в МГТУ им. Н.Э. Баумана была создана перевозимая экспериментальная радиолокационная установка, позволяющая одновременно работать на одной антенне в 8 и 3 мм диапазонах длин волн с использованием табличного формирователя сигнала с векторной модуляцией [7]. Установка предназначена для проведения в полигонных условиях исследований особенностей и свойств радиолокаторов 8 и 3 мм диапазонов. В том числе, для сбора эмпирического материала для сравнительного анализа особенностей распространения миллиметровых радиоволн, их искажений в различных погодных условиях и отражений от подстилающей поверхности в условиях длительного когерентного накопления при использовании сверхкоротких импульсных сигналов.

Созданная ПЭРЛУ является полностью когерентным и твердотельным радиолокатором. Малые импульсная и средняя мощности позволяют безопасно эксплуатировать установку. Структурная схема ПЭРЛУ показана на рисунке 3.

Приемные устройства построены по супергетеродинной схеме с переносом на промежуточную частоту. Коэффициент передачи приемных устройств составляет 53 дБ, полоса пропускания – 500 МГц. Также реализована возможность цифровой регулировки усиления в диапазоне 32 дБ с дискретой 1 дБ. Передатчики реализованы на твердотельных усилительных элементах. Такие устройства позволяют формировать и принимать сигналы с длительностью 5 нс. В установке реализовано общее программно-цифровое управление и синхронизация, что позволило реализовать большое разнообразие типов зондирующих сигналов, например, начиная от одиночного когерентного зондирующего импульса до пачки когерентных зондирующих импульсов с комбинированной внутриимпульсной модуляцией типа АМ-ФКМ-ЛЧМ. Цифровой формирователь сигнала позволяет формировать сигнал с полосой до 200 МГц на промежуточной частоте 2.3 ГГц. Блок задающих генераторов формирует опорные сигналы для передающих и приемных модулей, демодуляторов, АЦП и блока управления. Опорные сигналы формируются на основе высокостабильного сигнала термостатированного генератора.

Принятый эхо-сигнал преобразуется в квадратуры, которые оцифровываются в модуле АЦП с частотой дискретизации 800 МГц с разрядностью 8 бит на квадратурный канал. Полученный цифровой поток буферизуется во внутренней памяти модуля АЦП, объем которой составляет 4 Гбайт на один канал. Избыток частоты дискретизации позволяет реализовать режим передискретизации при обработке сигнала, снижающий потери и улучшающий качество

дальнейшей обработки. Единое управление всеми устройствами, входящими в ПЭРЛУ осуществляется посредством интерфейса Ethernet. Основные тактико-технические характеристики ПЭРЛУ приведены в таблице 2.

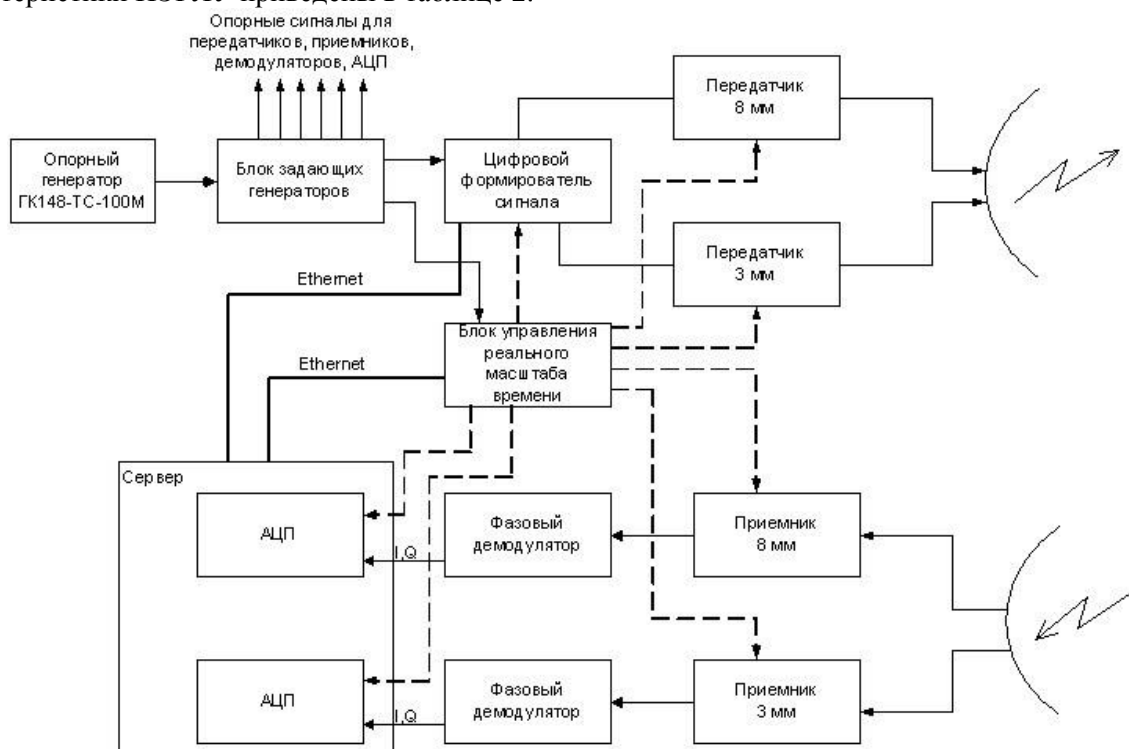


Рис. 2 Структурная схема установки

Табл. 2 – Основные тактико-технические характеристики ПЭРЛУ

Диапазон длин волн	3 мм	8 мм
Рабочий диапазон частот передатчика	$93,8 \pm 0,25$ ГГц	$32,8 \pm 0,25$ ГГц
Выходная импульсная мощность передатчика	100 мВт	340 мВт
Длительность импульса на выходе передатчика	0,005 – 10 мкс	
Скважность зондирующего сигнала	не менее 100	
Однополосный коэффициент шума приемного устройства	10 дБ	8 дБ
Динамический диапазон приемных устройств	60 дБ	
Спектральная плотность мощности фазовых шумов сигнала первого гетеродина на частоте анализа 10 кГц	-80 дБ	-90 дБ

Проведенные экспериментальные работы на территории Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также на полигоне войсковой части п. Смолино Нижегородской области позволили выявить ряд особенностей в спектрах сигналов, отраженных от различных объектах в мм диапазоне. Одним из эффектов, применимых для распознавания объектов техники на фоне подстилающей поверхности, является характерное расширение спектра сигнала при включенном двигателе неподвижной техники и характерное появление полосы модуляционных гармоник шириной до 2 КГц, возникающих в процессе движения, и позволяющих проводить акустическое распознавание [8]. Эксперимент проводился по следующей схеме: сначала записывался сигнал от эталонного неподвижного реперного отражателя, затем от неподвижного объекта техники с выключенным двигателем, затем от неподвижного объекта с включенным двигателем при разных положениях относительно станции: в переднем ракурсе, заднем ракурсе и боковом. На рисунке 3 приведен спектр сигнала, отраженного от реперного углового отражателя.

Как видно из рисунка 3 соблюдается высокая когерентность системы, несмотря на длительное время накопления. На рисунке 4 приведены спектры сигнала, отраженного от неподвижного автомобиля УРАЛ с выключенным двигателем а), неподвижного автомобиля УРАЛ с работающим двигателем - передний ракурс б), боковой ракурс в) и задний ракурс г).

Время накопления составляло 30 с. Как видно из рисунка 4 при длительном когерентном накоплении в спектре сигнала, отраженного от неподвижного автомобиля с включенным двигателем, наблюдается значительное расширение основного пика и появление дополнительных гармоник по сравнению со спектром сигнала, отраженного от автомобиля с выключенным двигателем. Данное расширение и появление новых гармоник связано именно с работой двигателя, а не с потерей когерентности на трассе распространения или в аппаратуре макета. Данный результат показывает перспективность использования мм диапазона и длительного когерентного накопления для идентификации неподвижной техники с работающим двигателем на фоне пассивных помех и местных предметов.

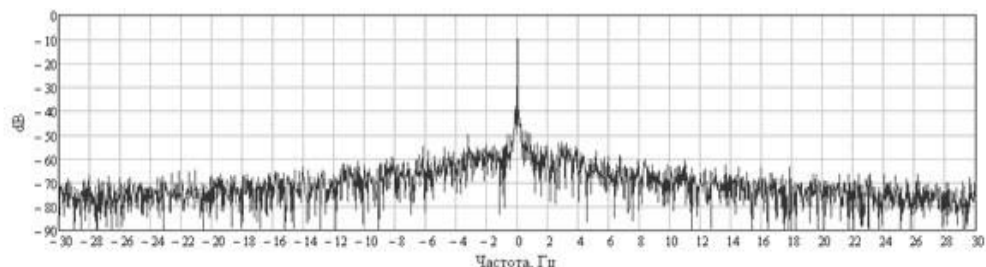


Рис. 3 Спектр сигнала, отраженного от реперного углового отражателя

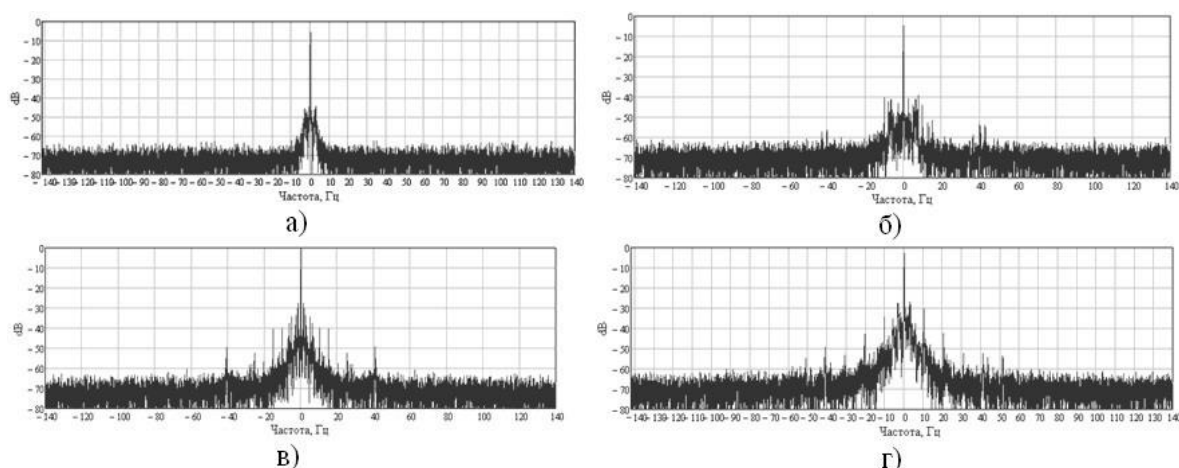


Рис. 4 Спектры сигнала, отраженного от неподвижного автомобиля УРАЛ а) с выключенным двигателем, б) неподвижного автомобиля УРАЛ с работающим двигателем, в) боковой ракурс и г) задний ракурс

При движении техники в спектре сигнала, отраженного от цели, в мм диапазоне также появляется характерная «шумовая подставка» вызванная модуляцией при движении цели и работе двигателя. На рисунке 5 приведен спектр сигнала, отраженного от движущегося объекта техники, при времени когерентного накопления 1 с.

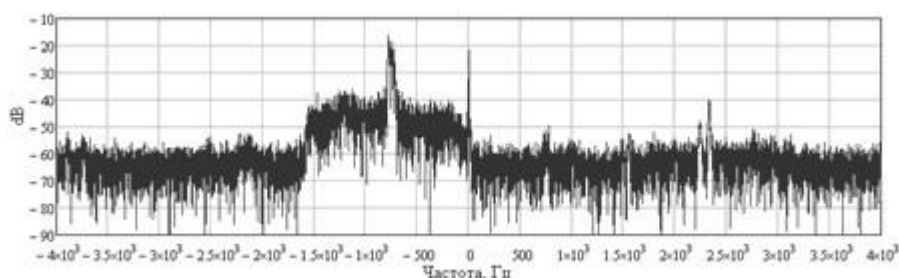
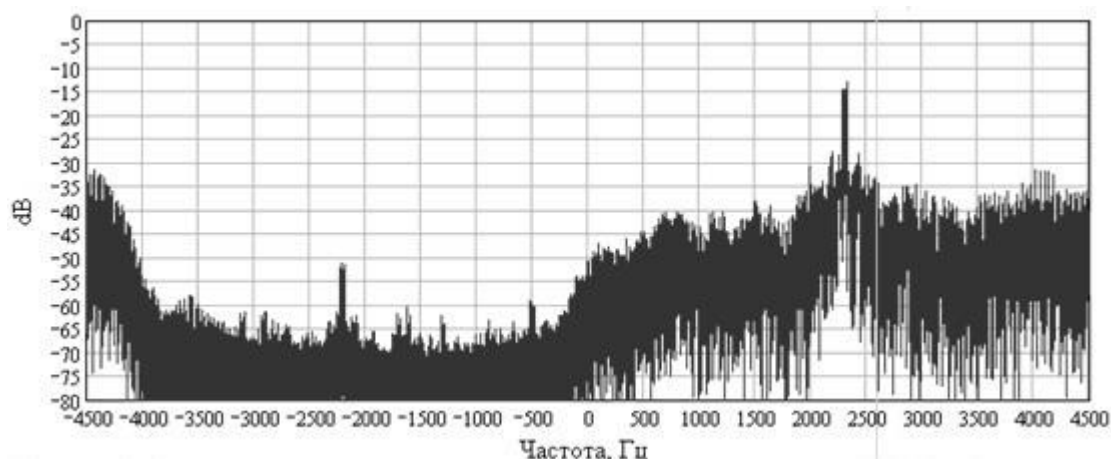


Рис. 5 Спектр сигнала, отраженного от движущегося объекта техники

Подобный эффект наблюдается и при наблюдении воздушных объектов техники в 3 см диапазоне длин волн при длительном когерентном накоплении [8]. На рисунке 6 приведен спектр сигнала, от движущегося самолета ЯК-52 в 3 см диапазоне длин волн при времени накопления 30 с.

Идентичность результатов, полученных в двух разных диапазонах длин волн, при наблюдении движущихся объектов, подтверждает наличие модуляционного эффекта,



вызываемого движением цели, и перспективы использования мм диапазона для акустического распознавания движущихся объектов техники, и неподвижных объектов с работающим двигателем на фоне пассивных помех.

Рис. 6 Спектр сигнала, отраженного от движущегося самолета ЯК-52 в 3 см диапазоне длин волн

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров Р.П., Потапов А.А., Соколов А.В. – Миллиметровая радиолокация с фрактальной обработкой. – М.: Радиотехника, 2005.
2. Топчиев С.А. – Перспективы применения 3 мм диапазона волн в современных РЛС. – Тез. докл. III науч.-техн. конф. «Радиооптические технологии в приборостроении» (Сочи, 12 – 16 сентября 2005 г.) – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
3. Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств – участников СНГ и технических средствах его выявления. Сер. Технические средства разведывательных служб капиталистических государств. – ВНИТИ, 1998, № 9
4. Голубцов М.Е., Крехтунов В.М., Русов Ю.С., Шевцов О.Ю. – Разработка фазированных антенных решеток для РЛС малой дальности». – XV Международная конференция «Радиолокация и радиосвязь», – Москва–Фирсановка: Институт радиотехники и электроники РАН, Московский энергетический институт (Технический университет), 2007.
5. Голубцов М.Е., Крехтунов В.М., Русов Ю.С., Андропов Е.В., Комиссарова Е.В. – Разработка элементной базы пассивных ФАР СВЧ и КВЧ диапазонов с ферритовыми фазовращателями. – Юбилейная научно-техническая конференция «Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях», посвященная 60-летию ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» и факультета радиоэлектроники летательных аппаратов МАИ, - Москва, 2006 .
6. Голубцов М.Е., Крехтунов В.М., Русов Ю.С., Овечкин В.С., Комиссарова Е.В. – Разработка элементов проходной и отражательной фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона длин волн с ферритовыми фазовращателями. – Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. «Приборостроение» 2009, Спец. вып.: Антенны и устройства радио- и оптического диапазона».
7. Нефедов С.И., Скосырев В.Н., Нониашвили М.И., Восторгов А.Б., Коновальцев А.В., Растворов С.А. – Двухдиапазонная широкополосная радиолокационная установка с применением сверхкоротких импульсов. – Тезисы докладов III Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», Суздаль, 2009.
8. Нефедов С.И., Крючков И.В., Нониашвили М.И. – Получение радиоакустических сигналов в РЛС с квазинепрерывным излучением – Труды XIV международной конференции «Радиолокация, радионавигация, связь». – Воронеж, НПФ «Саквое», т. 3, 2009.
9. Лаговьер А.А. – Оценка характеристик радиолокационных систем слежения за космическими объектами – Труды I молодежной научно-технической конференции «Направления создания средств воздушно-космической обороны». – Москва, 2010.