

## **ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ РАДИОЛОКАЦИИ НА ОСНОВЕ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С МАЛЫМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

**А. Д. Зеркаль**

**МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОАО «Конструкторское бюро опытных работ»**

Получена 12 января 2012 г.

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы особенностей использования специализированной элементной базы при создании системы ближней радиолокации на основе сверхкоротких импульсов с малым энергопотреблением, базирующейся на однокристальном приемопередатчике без применения высокоскоростных АЦП. Приведены результаты лабораторных измерений параметров системы. Показаны возможности практического использования системы в качестве датчика обнаружения людей на охраняемой территории, датчика препятствий в системе технического зрения, датчика для дистанционного измерения и контроля параметров дыхания и сердцебиения человека в медицине или при выполнении работ, связанных с повышенной опасностью, портативного радара для обнаружения людей за преградами, под завалами строительных конструкций, под снежными лавинами, учебного лабораторного оборудования.

**Ключевые слова:** система ближней радиолокации, сверхкороткие импульсы, сверхширокополосные сигналы, однокристальный приемопередатчик, датчик.

**Abstract.** The problems of the specific use of specialized components to create short-range radar system on the basis of ultrashort pulses with low power consumption based on single-chip transceiver without the use of high-speed ADC are considered. The results of laboratory measurements of system parameters are presented. We have shown the possibilities of the system practical use as a sensor for the people detection on the protected territory, a sensor for the obstacle detection in the technical vision system, a sensor for remote measurement and control of human breathing and heartbeat parameters in medicine or for work related with an increased

risk, a portable radar for the people detection over the obstacles, under the rubble of building structures, under the snow avalanches, educational laboratory equipment.

**Keywords:** short-range radar, ultrashort pulses, ultra-wideband signals, single-chip transceiver, sensor.

### **Введение**

Проблема перехода к сверхкороткоимпульсным (СКИ) сигналам со сверхширокой полосой (СШП) спектра является для радиолокации актуальной. Традиционные радары с полосой частот, не превышающей 10% от несущей частоты, позволяют обнаруживать цель и выдавать ее координаты (с относительно невысокой точностью), но не позволяют получить образ цели или ее изображение. Для повышения информативности радара используется режим распознавания типа цели, который позволяет по некоторым признакам ("радиопортрету") после соответствующей обработки получить дополнительную информацию. Для данного режима необходимо существенное увеличение полосы частот радара и, как следствие, требуются новые подходы, как в методах, так и в технологиях.

Повышение информативности радара при использовании СКИ сигналов происходит благодаря уменьшению импульсного объема по дальности. Так, при уменьшении длительности излучаемого импульса с 1 мкс до 1 нс глубина импульсного объема радара уменьшается с 300 м до 30 см. Таким образом, инструмент, который исследует пространство, становится значительно более тонким и чувствительным [1], а ширина полосы сигнала достигает нескольких гигагерц.

Применение СКИ сигналов требует кардинально нового подхода к функциональному построению, техническим, технологическим и методическим решениям критических узлов систем. Революционные достижения последних лет в технологическом комплексе создания устройств генерации, излучения, приёма и обработки сигналов на основе передовых методов и решений дают возможности практической реализации систем с СКИ сигналами, что ранее

было достижимо лишь в отдельных лабораторных и экспериментальных образцах. Появились следующие технологии, базовые для СКИ радиоэлектроники:

- технологии генерации сверхкоротких (длительностью 1 нс и короче) импульсов с практически неограниченным ресурсом с высокой стабильностью и большой частотой повторения;

- технологии излучения таких импульсов непосредственно в пространство (СШП антенная техника);

- технологии скоростной цифровой обработки больших массивов информации (вычислительная техника) [2].

В этом плане применение в радиолокации СКИ сигналов выливается в самостоятельное научно-техническое направление с собственными методами теоретического анализа и нетрадиционными схемотехническими решениями.

Развитие систем ближней радиолокации (СБРЛ) на основе СКИ сигналов до недавнего времени во многом сдерживалось недоступностью специализированной элементной базы. Построение такой системы на микросхемах широкого применения и дискретных элементах представляет собой сложную инженерную задачу и часто приводит к образцам с неприемлемыми техническими параметрами и высокой стоимостью. Несмотря на отдельные успехи некоторых разработчиков в создании подобных систем, они не достигли стадии серийного производства и не представлены на широком рынке. В данный момент на мировом рынке уже имеются специализированные интегральные микросхемы, в частности однокристалльные приемопередатчики СКИ сигналов, которые позволяют создавать конкурентоспособные СКИ системы с требуемыми характеристиками.

### **Результаты лабораторных измерений приемо-передающего модуля и СШП антенн**

В настоящее время ОАО «Конструкторское бюро опытных работ» (г. Москва) совместно с кафедрой «Автономные информационные управляющие

системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся разработки по созданию СБРЛ, базирующейся на однокристалльном приемопередатчике без применения высокоскоростных АЦП. Передающий тракт микросхемы включает управляемый генератор импульсов длительностью в сотни пикосекунд с частотами повторения от 1 МГц до 100 МГц, приемный тракт включает малошумящий усилитель, компаратор с перестраиваемым порогом, дискретизатор на основе массива линий задержки и набор цифровых счетчиков. С выхода микросхемы цифровой сигнал поступает в микроконтроллер и сигнальный процессор для дальнейшей обработки [3], [4].

Базовый приемо-передающий модуль пикоимпульсного радара Пикор-1 СБРЛ показан на рис. 1.



Рис. 1. Базовый приемо-передающий модуль Пикор-1.

Ниже приведены некоторые технические характеристики базового приемо-передающего модуля [5]:

- длительность зондирующих импульсов 300 пс;
- частота повторения импульсов от 1,5 до 100 МГц;
- спектральная плотность мощности при частоте повторения импульсов 48 МГц от -65 до -60 дБм/МГц;
- спектр излучаемого сигнала по уровню -3 дБ 2,85-10 ГГц;
- разрешающая способность до 4 мм;
- потребляемая мощность менее 150 мВт.

Данным приемо-передающим модулем генерируются СКИ сигналы с формой 1-й производной функции Гаусса без заполнения несущей. Изменение частоты повторения импульсов в широких пределах позволяет регулировать спектральную плотность мощности с уменьшением её уровня на 3 дБ при уменьшении частоты повторения импульсов в 2 раза. Таким образом, крайне малая спектральная плотность излучаемой мощности позволяет работать практически на уровне шумов, не мешая другим радиосредствам в широкой полосе частот, что дает вторичное освоение радиочастотного диапазона.

Ключевой особенностью данного приемо-передающего модуля является его малое энергопотребление по сравнению с аналогами. Так, приемо-передающий модуль PulsON 400 MRM (производство Time Domain, США), использующий СКИ сигналы с заполнением несущей и мощные АЦП и ПЛИС для преобразования сигналов из аналоговой формы в цифровую и управления их параметрами, потребляет порядка 5 Вт мощности [6]. Данное преимущество позволяет использовать модуль в автономной мобильной радиоэлектронной аппаратуре.

Другой важной и весьма сложной для реализации частью СБРЛ на основе СКИ сигналов являются СШП антенны (рис. 2). В связи с широкой полосой формируемого сигнала, антенна должна обладать полосой пропускания не менее 80% от расчетной полосы частот системы. Таким образом, антенна должна обладать одинаковыми характеристиками согласования как в низкочастотной, так и в высокочастотной областях. При этом ограничивающим фактором для антенных систем в данных приложениях являются габаритные размеры [7].

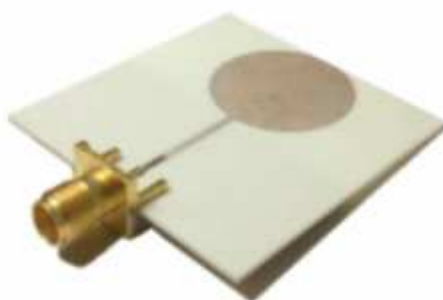


Рис. 2. СШП антенна Антрад-4.

Ниже приведены некоторые технические характеристики СШП антенны Антрад-4 [8]:

- тип эллиптический монополь;
- частотный диапазон 2,4-8 ГГц;
- КСВ не более 2,0:1;
- габаритные размеры 42×43×0,83 мм.

В лабораторных условиях были проведены измерения длительности (300 пс) и амплитуды (0,7 В) импульса с выхода однокристалльного приемопередатчика СКИ сигналов (рис. 3), максимальной частоты повторения импульсов 100 МГц (рис. 4), а также спектра сигнала при частоте повторения импульсов 48 МГц (рис. 5).

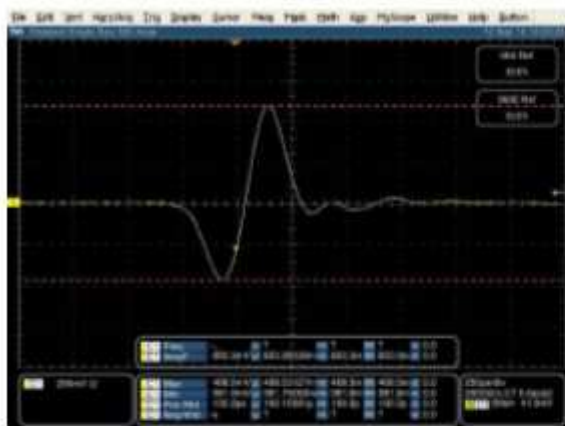


Рис. 3. Измерение длительности и амплитуды импульса



Рис. 4. Измерение максимальной частоты повторения импульсов

Для разработанного базового приемо-передающего модуля было написано прикладное программное обеспечение, позволяющее использовать СБРЛ в различных областях применения. Ниже рассмотрены вопросы практического использования данной СБРЛ на основе СКИ сигналов для конкретных приложений.

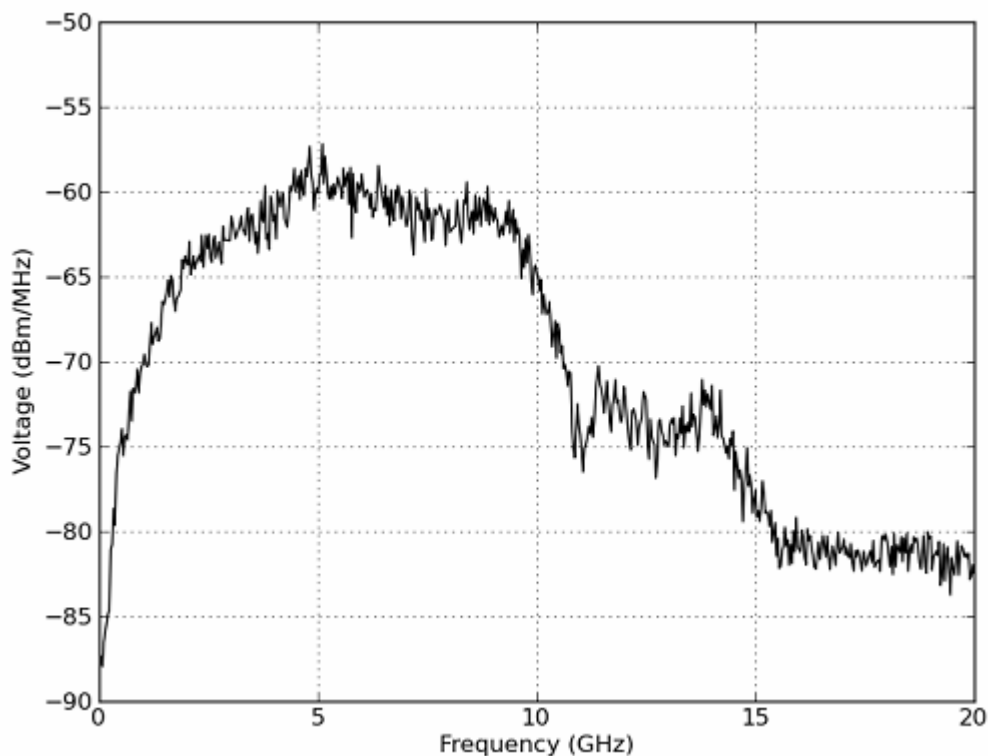


Рис. 5. Измерение спектра сигнала при частоте повторения импульсов 48 МГц.

### **Портативные автономные датчики обнаружения людей для интеллектуальных систем охраны**

В настоящее время существует множество датчиков обнаружения людей на радиолокационном и других физических принципах, однако отсутствуют датчики на основе СКИ сигналов. Их использование ранее сдерживалось дороговизной, сложностью, большими размерами и значительным потреблением энергии, исключавшим возможность создания автономных систем. Предлагаемая СБРЛ во многом преодолевает вышеперечисленные ограничивающие факторы, что позволит ей конкурировать с имеющимися на рынке продуктами, и имеет следующие особенности и преимущества:

- скрытность работы (не обнаруживается радиосканером);
- длительное время работы от аккумуляторов;
- высокая помехоустойчивость;
- всепогодность и всеуточность;

- возможность распознавания объекта;
- возможностей обнаружения неподвижного объекта;
- определение расстояния до объекта с высокой точностью;
- определение скорости объекта;
- раздельное наблюдение близко расположенных объектов;
- маскируемость.

Имеет преимущества перед радиолокационными датчиками, основанными на эффекте Доплера, за счет скрытности работы, возможностей обнаружения неподвижного объекта, объекта, движущегося с малой скоростью, распознавания объектов (например, различения человека и животного) и более широкого набора измеряемых характеристик. В отличие от датчиков обнаружения, работающих на других физических принципах (сейсмических, инфракрасных, оптических и др.) СБРЛ практически не зависит от условий внешней среды.

Были проведены полевые испытания системы, в результате которых было выявлено устойчивое обнаружение движения человека на открытой местности на расстоянии 30-40 м (рис. 6) и в лесу с редким кустарником на расстоянии 20-30 м (рис. 7).



Рис. 6. Обнаружение человека на открытой местности.



Рис. 7. Обнаружение человека в лесу.

Ниже приведен один из возможных алгоритмов работы системы. При отсутствии движущихся объектов СБРЛ сканирует сектор обзора (в горизонтальной плоскости  $50^\circ$ ) с тремя областями сканирования 0-20 м, 20-40



м, 40-60 м. При необходимости можно отслеживать только одну из областей сканирования. Максимально используются возможности энергосбережения – выключение передатчика на время, некритичное для возможности обнаружения (например, цикл сканирования 2 с, выключение передатчика 1 с). При обнаружении движущегося объекта выдается сигнал срабатывания, измеряется дальность до объекта, его скорость движения и эквивалентная амплитуда (взятая в зависимости от расстояния). Данные параметры являются информативными признаками, по которым может быть произведено распознавание объекта. При этом уменьшается пространственный интервал наблюдения (до 2 или 4 м), что позволяет увеличить точность и разрешающую способность.

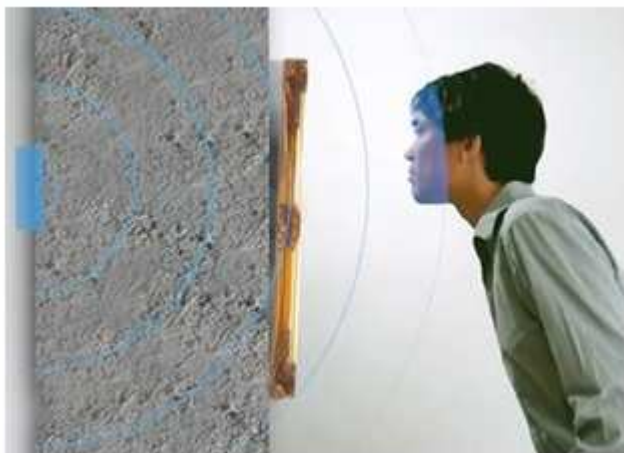


Рис. 8. Датчик охраны картины, скрытый за стеной.

Также весьма перспективным является использование данной СБРЛ в качестве автономных датчиков охраны помещений. Одним из важнейших преимуществ является возможность скрытного размещения датчика за материалами строительных конструкций. Так, на рис. 8 показано размещение датчика обнаружения за стеной для охраны картины. При этом область охраны может быть выставлена таким образом, что датчик будет срабатывать при приближении человека вплотную к картине или попытке прикоснуться к ней и не будет срабатывать при обычном осмотре картины.

## **Датчики для дистанционного измерения и контроля параметров дыхания и сердцебиения человека**

Одним из основных направлений совершенствования методов и технических средств функциональной диагностики является создание бесконтактных первичных преобразователей и беспроводных устройств передачи медико-биологической информации. Их использование в различных областях медицины, в биологических системах контроля состояния организма человека позволяет минимизировать влияние на объект исследования и контроля, повышает информативность и достоверность контроля и диагностики. В настоящее время хорошо развиты биотелеметрические системы передачи медико-биологической информации. Данная область исследований и разработок получила обобщающее название «телемедицина». В значительно меньшем объеме на рынке медицинской техники и в научных публикациях представлены бесконтактные первичные преобразователи медико-биологических величин. В частности, существующие бесконтактные датчики (емкостные, тепловизионные, оптические) по своим техническим и функциональным характеристикам непригодны для мониторинга основных систем организма – дыхания и кровообращения.

В связи с вышеизложенным, актуальной биоинженерной проблемой является исследование и разработка радиолокационных методов дистанционного зондирования малых перемещений биологических структур, в частности, двигательной активности, дыхания, сокращений сердца и артериальных сосудов. Такую СБРЛ упрощенно можно представить как датчик малых перемещений, реагирующий на смещения отражающей мишени относительно приемной антенны [9].

Потенциальными областями применения такого датчика, определяемые ограничениями на подвижность объекта исследования, являются:

- дистанционное измерение частоты дыхания и сердцебиения людей, для которых неприемлемо использование контактных датчиков (ожоговые больные, младенцы) в реаниматологии и функциональной диагностике;

- дистанционная регистрация движений, дыхания и пульса при профилактических обследованиях для выявления дыхательных расстройств и нарушений сна в сомнологии;

- бесконтактная оценка и мониторинг физиологического и психоэмоционального состояния человека-оператора, выполняющего ответственную, требующую постоянного внимания работу.



Рис. 9. Интерфейс ПО для дистанционного измерения пульса и дыхания.

Были проведены лабораторные испытания, во время которых с помощью разработанного прикладного программного обеспечения (рис. 9) измерялись показатели пульса и дыхания человека на расстоянии 0,5 м. Верификация (точность измерений) проверялась сравнением данных СБРЛ с данными пульсометра Polar RS300X. Расхождения результатов составили не более 5%.

### **Портативный радар для обнаружения людей за преградами, под завалами строительных конструкций, под снежными лавинами**

Для обнаружения людей, скрывающихся за неметаллическими, оптически непрозрачными преградами (стенами различной толщины, внутри объектов транспорта), для быстрого поиска пострадавших под снежными лавинами, развалинами зданий и сооружений после землетрясений и техногенных катастроф наиболее пригодны СБРЛ на основе СКИ сигналов. Малая длительность сигнала обеспечивает высокую точность определения

местоположения человека за преградой и устойчивую работу радара в условиях многократных переотражений от окружающих предметов.

Были проведены испытания, во время которых проводилось обнаружение движения человека за кирпичными стенами толщиной 20 см. В результате испытаний было обнаружено перемещение человека за двумя кирпичными стенами, между которыми было другое помещение, на расстоянии 6 м. На рис. 10 показано обнаружение движения человека при разностной обработке отраженного сигнала при превышении установленного порога срабатывания.

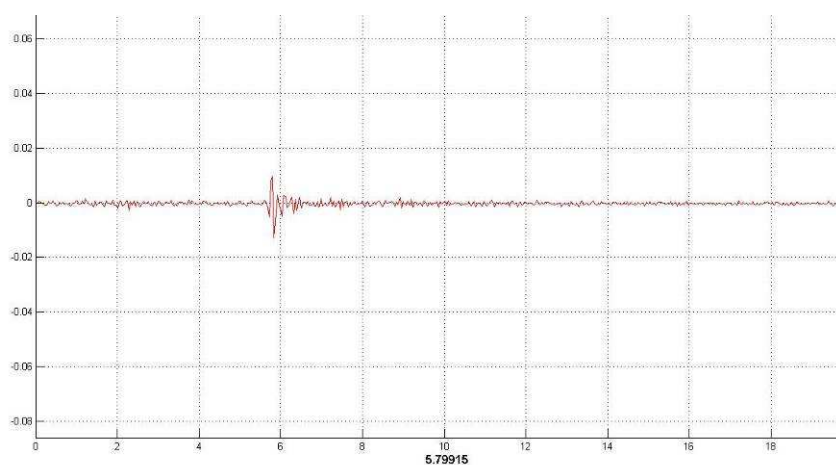


Рис. 10. Обнаружение человека за стенами на расстоянии 6 м.

В интересах МЧС России была проведена серия полевых испытаний на полигонах в г. Новогорске и г. Ногинске с целью выявления наиболее перспективных разработок в области построения систем обнаружения людей под завалами строительных конструкций.



Рис. 11. Макет портативного радара.

В данных испытаниях успешно проявил себя макет портативного радара на основе СКИ сигналов (рис. 11), который позволял устойчиво обнаруживать человека по его дыханию и небольшим движениям под несколькими железобетонными плитами на (рис. 12). При этом погрешность обнаружения места нахождения человека под завалами не превышала 1 метра, а дальность обнаружения вглубь завала составила около 3 метров.

В результате испытаний под двумя-тремя железобетонными плитами человек обнаруживался по небольшим движениям (шевелениям рукой-ногой) с вероятностью практически 100%, по дыханию с вероятностью 50%. Конструктивные особенности макета позволяют поместить и зафиксировать его на любой поверхности, избегая колебаний от ветра и внешних воздействий. Макет радара обладает помехозащищённостью – работающие рядом радиолокационные приборы влияния на работу макета не оказывали.



Рис. 12 – Полевые испытания по обнаружению людей под завалами в интересах МЧС.

Результаты испытаний позволяют сделать вывод о перспективности СБРЛ на основе СКИ сигналов для обнаружения людей под завалами. Также данная технология может использоваться на аналогичных принципах для обнаружения людей под слоем снега при сходе снежных лавин.

## **Датчик препятствий в системе технического зрения**

Весьма перспективным является использование СБРЛ на основе СКИ сигналов в качестве датчика препятствий в системе технического зрения для тех областей применения, где затруднительно использование оптического и других типов датчиков. Одной из таких областей является, например, управление современной сельскохозяйственной техникой (комбайны, тракторы и т.д.) без участия человека-оператора при движении по полю. Использование оптических датчиков для решения данной задачи значительно затруднено из-за пыли, сильной вибрации и тряски, а главное, из-за возможности нахождения препятствий, скрытых за растениями полевых культур.

Датчик на основе СКИ сигналов, использующий направленные антенны, получает «радиопортрет» отраженных сигналов, в котором с помощью специального программного обеспечения способен выделить такие типовые препятствия, как дерево, столб бетонный или деревянный, опору ЛЭП, человека, животное, автомобиль и т.д.

## **Учебный научно-исследовательский комплекс изучения СКИ сигналов**

СБРЛ на основе СКИ сигналов может использоваться в качестве учебного лабораторного оборудования для практического изучения студентами, аспирантами и научными работниками систем ближней радиолокации, в частности на основе импульсных сверхширокополосных сигналов без несущей частоты. С помощью данного комплекса могут быть исследованы следующие вопросы в области СШП сигналов и рассмотрены следующие практические задачи:

- распространение сигналов в различных средах;
- прохождение сигналов сквозь препятствия;
- рассеяние сигналов различными объектами;
- обнаружение статичного объекта на фоне пассивных помех;
- обнаружение движущегося объекта;

- распознавание объекта с помощью различных информативных признаков;
- дистанционное измерение параметров дыхания и сердцебиения человека;
- дистанционное зондирование непрозрачных сред и т.д.



Рис. 13. Учебный научно-исследовательский комплекс изучения СКИ сигналов.

В настоящее время, первые образцы учебного научно-исследовательского комплекса изучения СКИ сигналов используются на кафедре СМ5 «Автономные информационные управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 13). Были разработаны учебно-методические материалы и руководства по выполнению лабораторных работ по курсу «Сверхширокополосные сигналы в системах ближней локации».

Используя возможности данного комплекса, может быть исследована новая перспективная область радиоэлектроники и получены практические знания на основе экспериментальных данных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Иммореев И.Я.* Сверхширокополосная локация: основные особенности и отличия от традиционной радиолокации. – Электромагнитные волны и электронные системы, № 1, том 2, 1997 г., с. 81-88.
2. *Радзиевский В.Г., Трифонов П.А.* Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. – Москва: Радиотехника, 2009 г., с. 7-28.

3. *Зеркаль А.Д.* Рациональное построение приемопередающего модуля с импульсным сверхширокополосным сигналом. – Системы и средства радиосвязи, телевидения и радиовещания, № 1,2, 2011 г., с. 137.
4. *Симаков В.В., Зеркаль А.Д.* «Принципы построения приемо-передающего модуля на основе сверхкоротких импульсов с малым энергопотреблением». – Сборник докладов V Всероссийской научно-технической конференция «Радиолокация и радиосвязь», с. 340
5. Техническое описание приемо-передающего модуля Пикор-1 // [Электронный ресурс]: интернет-сайт производителя ОАО "КБОР". URL: [http://www.uwbs.ru/shop?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=2&category\\_id=1](http://www.uwbs.ru/shop?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=2&category_id=1) (дата обращения: 10.01.2012).
6. Техническое описание приемо-передающего модуля PulsON 400 MRM // [Электронный ресурс]: интернет-сайт производителя Time Domain Corp. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.timedomain.com/datasheets/320-0299A%20P400%20MRM%20Data%20Sheet.pdf> (дата обращения: 10.01.2012).
7. *Серегин Г.М.* Проектирование компактных сверхширокополосных антенн для радиоэлектронных систем на основе импульсных сверхширокополосных сигналов. - "Системы и средства радиосвязи, телевидения и радиовещания", № 1,2 2011 г., с.139.
8. Техническое описание сверхширокополосной антенны Антрад-4 // [Электронный ресурс]: интернет-сайт производителя ОАО "КБОР". Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://uwbs.ru/images/files/antrad4\\_DS\\_1.pdf](http://uwbs.ru/images/files/antrad4_DS_1.pdf) (дата обращения: 10.01.2012).
9. *Анищенко Л.Н.* Разработка технологии и программно-аппаратного комплекса биорадиолокационного мониторинга двигательной активности, дыхания и пульса: Автореферат канд. тех. наук. - М., 2009 г., 18 с.



Автор:  
Зеркаль Андрей Дмитриевич,  
начальник отдела сверхширокополосных технологий  
ОАО «Конструкторское бюро опытных работ»,  
аспирант кафедры «Автономные информационные управляющие  
системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
область научных интересов: системы ближней радиолокации,  
[www.uwbs.ru](http://www.uwbs.ru), [zerkal@kbor.ru](mailto:zerkal@kbor.ru), [andreyzer@gmail.com](mailto:andreyzer@gmail.com)