

УДК 629.7.058.54**Симаков Владимир Викторович,****доктор технических наук, профессор****Зеркаль Андрей Дмитриевич,****Серегин Григорий Михайлович****ОАО «Конструкторское бюро опытных работ», г. Москва****E-mail: simakov@kbor.ru**

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ РАДАР НА ОСНОВЕ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ БЕЗ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ

В статье рассмотрены особенности создания многофункционального портативного радара на основе сверхкоротких импульсов без несущей частоты, базирующегося на приемопередающих модулях серии «Пикор» без применения высокоскоростных АЦП. Описанная архитектура построения системы позволяет достичь высокой разрешающей способности по дальности и иметь малый уровень энергопотребления. Показаны преимущества практического использования данного радара для различных областей применения, в частности для построения специального охранного датчика, бесконтактного измерения толщины ледового покрова, для обнаружения людей за непрозрачными преградами и под завалами строительных конструкций.

Практически всем современным пользователям радиолокационных систем требуется увеличение количества и повышение качества информации, получаемой из наблюдаемого пространства. Однако традиционные радары с шириной полосы, не превышающей 10% от несущей частоты, имеют недостаточные информационные возможности. Одним из перспективных направлений, позволяющих существенно увеличить информативность радиолокационных систем, является применение сверхкороткоимпульсных (СКИ) сигналов без несущей частоты со сверхширокой (СШП) полосой спектра, достигающей 1 ГГц и более. Повышение информативности радара при использовании СКИ сигналов происходит благодаря уменьшению длительности зондирующего импульса. Так, при уменьше-

нии длительности излучаемого импульса с 1 мкс до 300 пс глубина импульсного объема радара уменьшается с 300 м до 9 см [1].

Инновационные достижения последних лет в создании специализированной элементной базы генерации, излучения, приема и обработки СКИ сигналов позволили коллективу разработчиков ОАО «КБОР» создать набор интегрированных модулей серии «Пикор», которые дают возможность практической реализации многофункциональных портативных систем ближней радиолокации для самых разных областей применения.

При разработке данных систем широко применялось специальное программное обеспечение математического и функционального моделирования для построения критических узлов СВЧ модулей и расчёта входных сигна-

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

портативный радар, сверхкороткие импульсы, сверхширокополосные сигналы, малое энергопотребление, бесконтактное измерение толщины льда, подповерхностная радиолокация, биорадиолокация

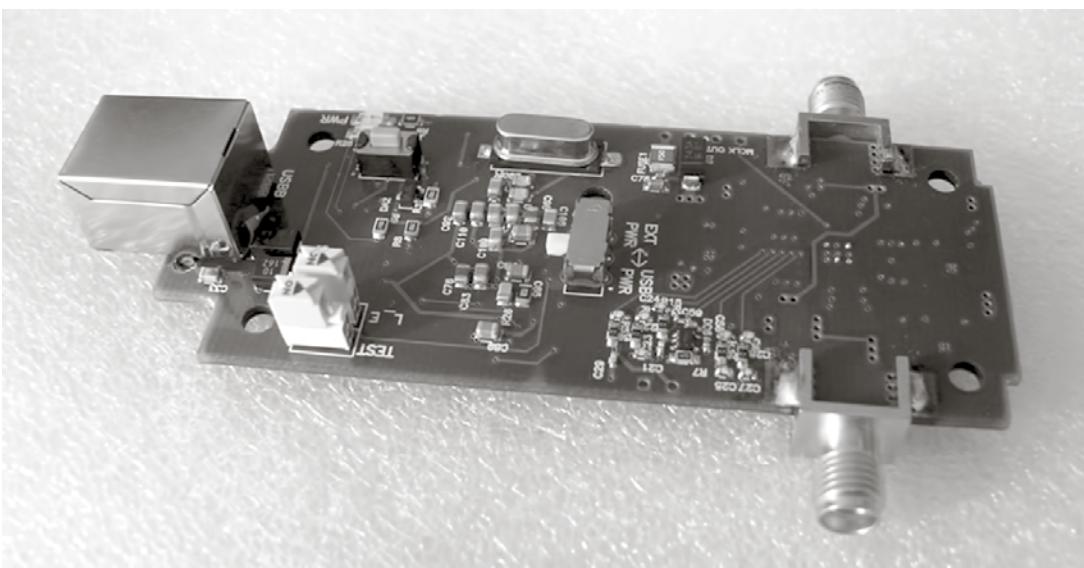


Рис. 1. Приёмопередающий модуль Пикор-1

лов в условиях разнообразных радиолокационных сцен и трактов распространения.

Для создания многофункционального портативного радара используется импульсный сверхширокополосный приёмопередающий модуль ближней радиолокации Пикор-1 (рис. 1). Данное изделие обеспечивает генерацию сверхкоротких импульсов длительностью 300-600 пс, приём отражённых сигналов и их преобразование в цифровую форму. Основными преимуществами являются:

- высокая разрешающая способность до 4 мм;
- крайне малая спектральная плотность мощности -65 - -60 дБм/МГц;
- высокий динамический диапазон до 100 дБ;
- частота повторения импульсов от 1,5 до 100 МГц;
- потребляемая мощность менее 150 мВт;
- частота обновления информационных данных до 1 кГц и выше.

Принцип работы модуля основан на генерации пикосекундных импульсов без несущей частоты, сравнении поступающего на вход приёмника аналогового сигнала с порогом компаратора, дальнейшей дискретизации при помощи массива линий задержки, накоплении двоичных значений сигнала в цифровых счётчиках и считывании их внешним управляющим микроконтроллером. 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. Ключевой особенностью модуля Пикор-1 является его малое энергопотребление по сравнению с аналогами, использующими для оцифровки импульсных сверхширокополосных сигналов высокоскоростные АЦП, что даёт возможность его применения в автономных портативных устройствах [2-4].

Внешний интерфейс модуля Пикор-1 включает:

- два разъёма SMA (один для подключения усилителя мощности и передающей антенны, другой для подключения приёмной антенны);
- разъём USB для питания, приёма команд управления и передачи выходного сигнала для дальнейшей обработки на персональном компьютере или модуле обработки;
- разъём для подключения внешнего питания +12 В;
- разъём внешнего тактирования до 130 МГц.

Ниже на рис. 2-4 показана форма импульсного сигнала с выхода генератора, последовательность пикосекундных импульсов и спектр сигнала при частоте повторения импульсов 48 МГц [5].

Другой важной и весьма сложной для реализации частью портативного радара на

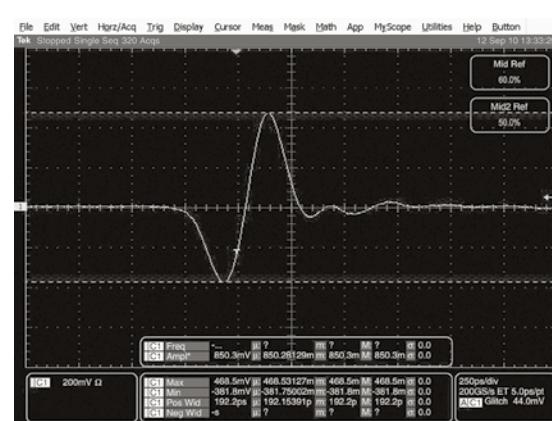


Рис. 2. Форма импульсного сигнала с выхода генератора

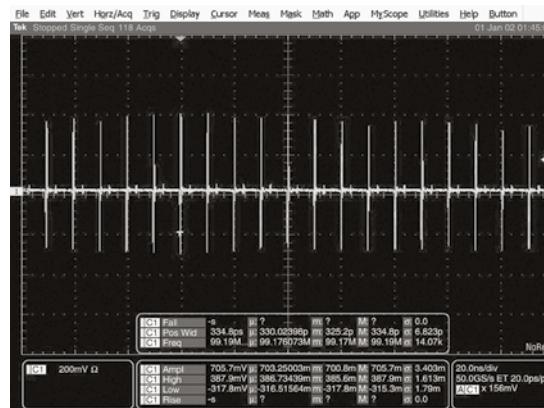


Рис. 3. Последовательность пикосекундных импульсов

основе СКИ сигналов являются СШП антенны. В связи с широкой полосой формируемого сигнала антenna должна обладать полосой пропускания не менее 80% от расчётной полосы частот системы. Таким образом, антenna 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 [6].

На рис. 5 изображена высоконаправленная металлоидиэлектрическая сверхширокополосная антenna типа Вивальди АнтраД-3. На рис. 6 изображен график КСВ данной антенны в зависимости от частоты. Красной линией показан график для модели антенны, созданной в специализированной САПР, синей линией показан график измерений.

Ниже приведены некоторые технические характеристики СШП антенны АнтраД-3 [7]:

- тип антenna Вивальди;
- частотный диапазон 1-3,6 ГГц;
- коэффициент усиления до 9,15 дБи на частоте 3,4 ГГц;
- КСВ не более 2,0:1;
- габаритные размеры 150×113×1,5 мм.

Ниже рассмотрены некоторые примеры практического использования многофункциональных портативных радаров на основе СКИ сигналов.

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 система 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 всесуточность;
- возможность распознавания 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 счёт скрытности работы, возможностей обнаружения неподвижного объекта, объекта, движущегося с малой скоростью, распознавания объектов (например, различия человека и животного) и более широкого набора измеряемых характеристик. В отличие от датчиков обнаружения, работающих на других физических принципах (сейс-

мических, инфракрасных, оптических и др.), данная система практически не зависит от условий внешней среды.

В результате проведённых полевых испытаний макетов системы было выявлено устойчивое обнаружение движения человека вне зависимости от условий применения (дождь, снег, туман, ночь) на открытой местности на расстоянии 30-40 м и в лесу с редким кустарником на расстоянии 20-30 м.

При отсутствии движущихся объектов система сканирует сектор обзора (в горизонтальной плоскости 50°) 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 портативности и энергосбережения – выключение передатчика на время, некритичное для возможности обнаружения (например, цикл сканирования 2 с, выключение передатчика 1 с).

При обнаружении движущегося объекта выдаётся 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.

Также весьма перспективным является использование данной системы в качестве автономных датчиков охраны помещений и контроля перемещения объектов сквозь непрозрачные преграды. Одним из важнейших преимуществ в этом случае является возможность скрытного размещения датчика за материалами строительных конструкций. Возможно использование датчика для охраны вышек базовых станций сотовой связи, вышек ЛЭП, опор канатных дорог и других подобных объектов.

Для обнаружения людей, скрытых 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 портативные радары на основе СКИ сигналов. Малая длительность сигнала обеспечивает высокую точность определения место-

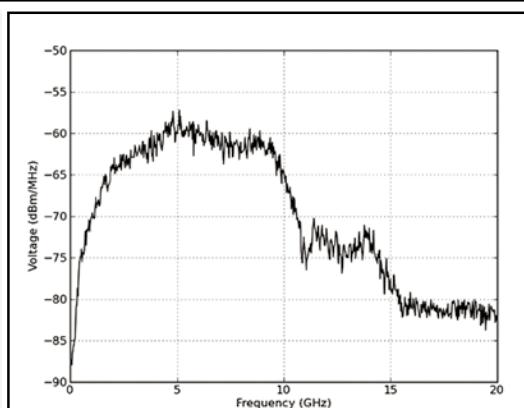


Рис. 4. Спектр сигнала при частоте повторения импульсов 48 МГц



Рис. 5. Сверхширокополосная антенна типа Вивальди Антрап-3

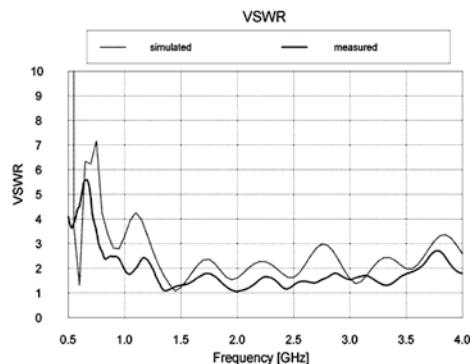


Рис. 6. График КСВ СШП антенны Антрап-3

положения человека за преградой и устойчивую работу радара в условиях многократных переносов от окружающих предметов.

Были проведены испытания, во время которых проводилось обнаружение движения человека за кирзовыми стенами толщиной 20 см. В результате испытаний было обнаружено перемещение человека за двумя кирзовыми стенами, между которыми было другое помещение, на расстоянии 6 м.

В интересах МЧС России была проведена серия полевых испытаний с целью выявления



Рис. 7, 7а. Полевые испытания по обнаружению людей под завалами в интересах МЧС

наиболее перспективных разработок в области построения систем обнаружения людей под завалами строительных конструкций. В данных испытаниях успешно проявил себя макет портативного радара на основе СКИ сигналов, который позволял устойчиво обнаруживать человека по его дыханию и небольшим движениям под несколькими железобетонными плитами (рис. 7). При этом погрешность обнаружения места нахождения человека под завалами не превышала 1 м, а дальность обнаружения вглубь завала составила около 3 м.

В результате испытаний под двумя-тремя железобетонными плитами человек обнаруживался по небольшим движениям (шевелениям рукой или ногой) с вероятностью практически 100%, по дыханию с вероятностью 50%. Портативные конструктивные особенности макета позволяют поместить и зафиксировать его на любой поверхности, избегая колебаний от ветра и внешних воздействий. При этом макет радара может находиться в отрыве от препятствия на 40-70 см. Макет радара обладает помехозащищённостью – работающие рядом радиолокационные приборы влияния на работу макета не оказывали.

Результаты испытаний позволяют сделать вывод о перспективности портативного радара 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.

Очень перспективным направлением использования портативного радара на основе

СКИ сигналов без несущей частоты является бесконтактное измерение толщины ледового покрова в целях обеспечения безопасности при перемещении человека и автотранспорта по поверхности ледовых переправ и замёрзших водоёмов.

На рис. 8 изображён опытный образец портативного радара с блоком обработки и визуализации на базе стандартного планшетного компьютера.

Технические характеристики опытного образца портативного радара:

- тип зондирующего сигнала - импульсный, без несущей частоты;
- длительность импульсов зондирующего сигнала – 300-600 пс;
- амплитуда импульсов - 0,8 В;
- потребляемая мощность радарного блока - менее 150 мВт;
- масса - 1,5 кг;
- точность измерений - 1 см;
- частота обновления информационных данных - 115 Гц.

Были проведены полевые испытания прибора на базе ГИМС МЧС на Пироговском водохранилище.

На рис. 9 показаны радарограмма в реальном времени и форма отражённого сигнала при зондировании ледяного покрова. Как видно из рисунка, зондирование проводилось с отрывом от поверхности льда, высота радара над поверхностью составила 0,87 м. С помощью программного обеспечения рассчитывалась разница между пиками отражения от границ «воздух-лёд» и «лёд-



Рис. 8. Опытный образец портативного радара

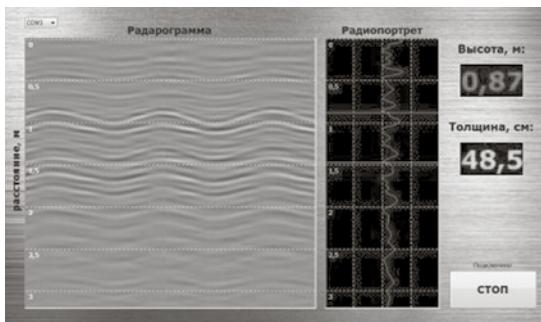


Рис. 9. Результаты измерений с контрольным бурением

вода», то есть толщина ледового покрова. Она составила, согласно данным обработки, 48,5 см. В месте проведения измерения была пробурена лунка и измерена её глубина. Она составила 47 см. Таким образом, данные, полученные с помощью опытного образца радара, подтверждают данные, по-

лученные при бурении лунки, с погрешностью измерения около 3%.

Как видно из рис. 9, колебания радара по высоте при движении не повлияли на точность измерения толщины льда - разница между пиками сигнала отражения от различных сред остаётся прежней [8].

Литература

1. Борзов А.Б., Быстров Р.П., Засовин Э.А., Муратов И.В., Павлов Г.Л., Соколов А.В., Сучков В.Б. *Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения и наведения в условиях естественных и организованных помех*. – М.: Радиотехника, 2010. – 376 с.
2. Зеркаль А.Д. *Вопросы практического использования системы ближней радиолокации на основе сверхкоротких импульсов с малым энергопотреблением* // Журнал радиоэлектроники (ИРЭ РАН). – 2012. – № 1. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/3/text.html>
3. Симаков В.В., Зеркаль А.Д. *Принципы построения приемо-передающего модуля на основе сверхкоротких импульсов с малым энергопотреблением* // Сборник докладов V Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», 2011. – С. 340.
4. Симаков В.В. *Обзор импульсных сверхширокополосных средств радиосвязи, радиолокации и позиционирования, в том числе на основе представления сигнала в тракте обработки методом двоичных значений в непрерывном времени* // Системы и средства радиосвязи, телевидения и радиовещания – 2011. – № 1,2. – С. 137.
5. Техническое описание приемо-передающего модуля Пикор-1 // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.uwbs.ru/shop?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=2&category_id=1 (дата обращения: 10.01.2012).
6. Серегин Г.М. *Проектирование компактных сверхширокополосных антенн для радиоэлектронных систем на основе импульсных сверхширокополосных сигналов* // Системы и средства радиосвязи, телевидения и радиовещания. – 2011. – № 1,2. – С.139.
7. Техническое описание сверхширокополосной антенны Антрап-3. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://uwbs.ru/images/files/antrad3_DS_2_0.pdf (дата обращения: 10.01.2012).
8. Топольский Н.Г., Симаков В.В., Зеркаль А.Д., Серегин Г.М., Мокшанцев А.В., Агеев С.В. *Многофункциональный портативный радар для измерения толщины льда* // Технологии техносферной безопасности. – 2012. – № 1(41). [Электронный ресурс].