

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационная радионавигация: справ. / под ред. А. А. Сосновского. М.: Транспорт, 1990. 264 с.
2. Орлов В. К., Герчиков А. Г., Чернявский А. Г. Локальные радиотехнические системы межсамолетной навигации. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2011. 123 с.
3. Пат. RU 2478979 С1. МПК G01C 5/14. Дальномерная радиотехническая система ближней навигации ЛА / С. В. Бабуров, Ю. Г. Волчок, Т. Б. Гальперин, А. Г. Герчиков, П. К. Никольский, В. К. Орлов, Б. В. Пономаренко, А. Г. Чернявский. Оpubл. 10.04.2013. Бюл. № 10.
4. Гаврищук В. В., Соколов А. И., Юрченко Ю. С. Моделирование и исследование комплексной навигационной системы, содержащей ДМЕ, ДВС и датчик курса // Вопр. радиоэлектроники. Сер. РЛТ. 2009. Вып. 2. С. 156–165.
5. Пат. US 2010/0106416 A1. Int. Cl. G01C 21/00, G06F 17/00. Aircraft navigation using the global positioning system, inertial reference system and distance measurements / Т. Е. Yochum. Publ. 29.04.2010.
6. Пат. US 2005/6926233 B1. Int. Cl. B64C 03/00, B64C 09/00, B64C 13/18, B64C 13/20, G05D 01/10. Automatic formation flight control system (AFFCS) – a system for automatic formation flight control of vehicles not limited to aircraft, helicopters, or space platforms / С. J. John. Publ. 09.08.2005.
7. Шатраков Ю. Г., Ривкин М. И., Цыбаев Б. Г. Самолетные антенные системы. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.
8. Пат. РФ 2558699 С1. МПК G01C 21/00, G01C 23/00. Комплексный способ навигации летательных аппаратов / В. И. Бабуров, Т. Б. Гальперин, А. Г. Герчиков, В. К. Орлов, О. И. Саута, А. И. Соколов, Ю. С. Юрченко. Оpubл. 10.08.2015. Бюл. № 22.
9. Соколов А. И., Юрченко Ю. С. Использование пространственной информации в комплексных инерциально-спутниковых навигационных системах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. Вып. 5. С. 51–57.
10. Titterton D. H., Weston J. L. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2007. 558 p.

A. I. Sokolov, Yu. S. Yurchenko
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Using of Spatial Information for Integration of Inertial and Radiotechnical Systems of Aircrafts

The schemes of integration containing the inertial system of navigation and radiotechnical (satellite and rangefinder or radiolocation) system with on-board transceivers antennas are considered. It is proposed to take into account information of the inertial system of navigation for the choice of working antenna of the radiotechnical system and taking into account its offset from the center of mass of the aircraft.

Inertial and Radiotechnical Systems, Working Antenna, Center of Mass of the Aircraft, Integration

Статья поступила в редакцию 16 сентября 2016 г.

УДК 621.396.96

О. С. Миронов
АО «НПП "Радар ммс"» (Санкт-Петербург)

Режим высокой частоты повторения импульсов в сверхширокополосной радиолокации

Рассмотрены режимы работы сверхкороткоимпульсной радиолокации с низкой и высокой частотами повторения импульсов. Предложено использование пачек сверхкоротких импульсов в радиолокации. Приведены достоинства, недостатки и возможные области применения указанного метода радиолокационного зондирования.

Сверхкороткий импульс, сверхширокополосный сигнал, импульсная модуляция, высокая частота повторения, пачка импульсов

В развитии радиоэлектронных систем в последнее время выделяют два основных направления, различающиеся типом излучаемого сигнала [1].

К первому направлению относятся системы, основанные на гармонических сигналах. Указан-

ные системы составляют практически всю современную радиоэлектронную технику – от радиовещания до радиолокации. В них традиционно используются гармонические сигналы различных частотных диапазонов, модулированные тем или

иным способом. Современные системы, построенные на основе таких принципов, широко используют цифровые технологии – цифровой синтез сигналов, фазовые и частотные манипуляции. При этом сокращается длительность отдельных "чипов" внутри импульса и используются последовательности, значительно расширяющие спектр, такие как коды Баркера, M-последовательности и псевдослучайные последовательности, так называемая технология DS-UWB [2], [3].

Второе направление составляют системы, использующие для своей работы сверхкороткие импульсы (СКИ) с длительностью до десятков пикосекунд [4]. Во многих реализациях модуляция для таких систем не требуется, и приемник воспринимает отклик от цели на воздействие единичного импульса. Такие сигналы являются сверхширокополосными и обладают всеми лучшими качествами радиолокационных сигналов – скрытностью, помехозащищенностью и при этом удобством, связанным с тем, что СКИ являются полностью детерминированными [5]. Детерминированы также излучение и прием таких сигналов антенной [6]. Фактически, неизвестными остаются лишь параметры рассеяния сигнала целью, носящего характер дифференцирования импульсов при переизлучении и их задержки, зависящей от дальности [7] в случае, если расстояние между отражающими точками превышает протяженность импульса в пространстве.

В результате сверхширокополосные системы в целом набирают популярность в радиолокации. Это связано с помехозащищенностью, скрытностью таких сигналов, а также с хорошей электромагнитной совместимостью, высокой разрешающей способностью и пр.

Традиционные импульсные радиолокационные системы разделяются на две категории в зависимости от частоты повторения импульсов: радиолокационные системы с низкой и высокой частотами повторения [1]. Радиолокационные системы с низкой частотой повторения импульсов обеспечивают однозначное измерение дальности, но не дают однозначного измерения радиальной скорости (доплеровской частоты). Такие системы используются в обзорных радиолокационных станциях. В связи с низкой частотой повторения увеличивается дальность радиолокационного зондирования, исключается обнаружение в боковом лепестке на малой дальности, снижается нагрузка на процессор обработки радиолокационной информации, увеличивается скорость анализа первичных ра-

диолокационных данных. Радиолокационные станции с низкой частотой повторения импульсов могут различать помехи по дальности (в том числе, маскирующие полезный сигнал более мощным – так называемые спуфинги [8]). В простейшем варианте выполняются лишь прием радиолокационной информации, корреляционная и пороговая обработки, при необходимости накопление.

Радиолокационные системы с высокой частотой повторения импульсов однозначно измеряют доплеровскую частоту в пределах представляющего интерес диапазона радиальных скоростей, но не обеспечивают однозначность измерения дальности. Это позволяет обнаруживать цели с высокими радиальными скоростями и режектировать неподвижные цели. Однако при этом возникает эффект затенения по дальности с образованием большого числа "слепых" зон из-за бланкирования приемника на время излучения зондирующих импульсов. Указанную проблему можно решить, однако используемые методы приводят к резкому возрастанию нагрузки на процессор обработки информации из-за необходимости выполнения дополнительных вычислений по доплеровской фильтрации сигнала [9], [10]. Таким образом, необходимость в работе радиолокатора с высокой частотой повторения возникает только при необходимости выделения движущихся целей на фоне помех, все остальное время выгоднее работать в режиме с низкой частотой повторения.

Сверхширокополосная радиолокация, основанная на применении СКИ, на сегодняшний момент также использует сигналы с низкой частотой повторения, что связано со многими причинами. Это невозможность использовать стробоскопический прием [11], связанная с этим дороговизна АЦП, сложные алгоритмы вторичной обработки и пр. Не последнюю роль играют и ограничения, налагаемые устройствами генерации СКИ, каждое из которых, будь то разрядник или полупроводниковый прибор, обладает предельно допустимым значением средней генерируемой мощности, при превышении которой может произойти тепловое разрушение прибора [4].

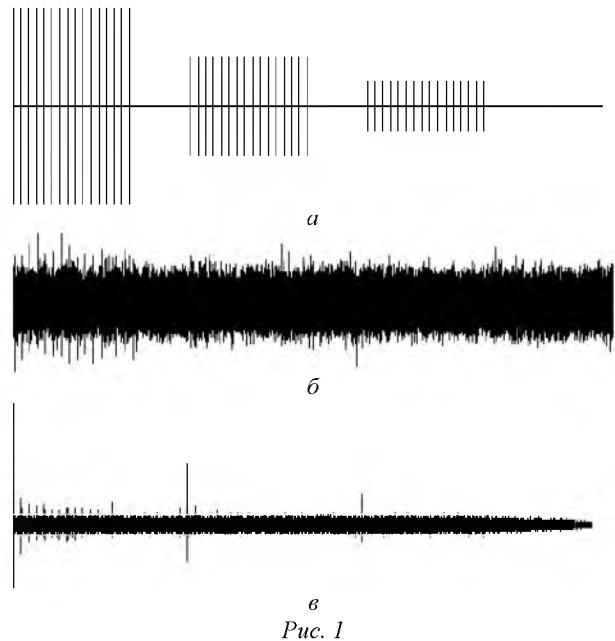
Режим высокой частоты повторения все же представляет некоторый интерес применительно к сверхширокополосным сигналам, поскольку снижает время обнаружения целей, позволяет отслеживать скоростные цели, а также обладает рядом других полезных возможностей. Отмеченная ранее невозможность использования стробоскопического приема требует обработки, в том числе

оцифровки, каждого импульса [12]. Решением для обхода ограничения средней генерируемой мощности может стать использование пачек вместо одиночных импульсов. Такой способ не приводит к тепловому разрушению прибора при достаточно большом периоде следования пачек.

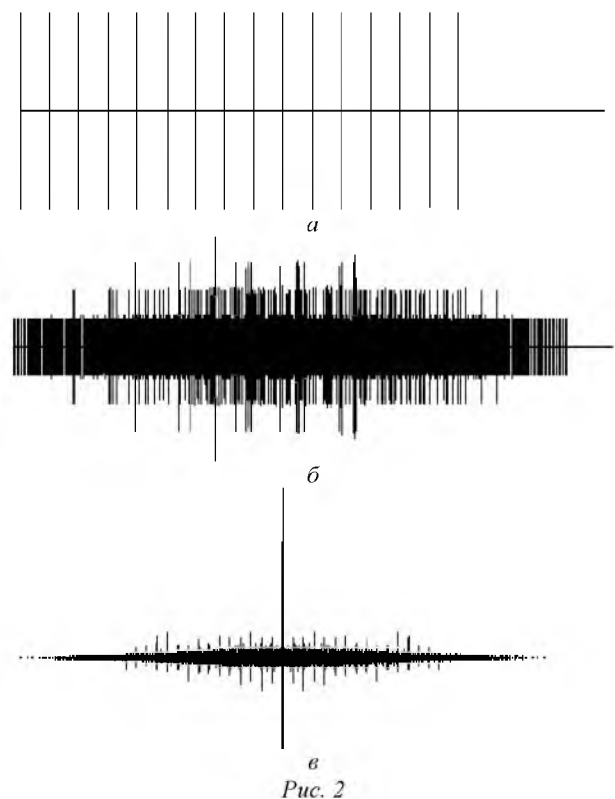
Для видеоимпульсов внутри пачек применимо большинство видов импульсной модуляции. Исключение составляет лишь широтно-импульсная модуляция, что связано с трудностью изменения длительности импульса на выходе генерирующего устройства. Самыми удобными для реализации видами модуляции являются частотно- и фазово-импульсная. Для их использования не требуется изменять схему генерирующего устройства, необходимо лишь внести изменение в последовательность задающих импульсов. Для получения хорошей автокорреляционной функции в качестве модулирующей необходимо выбирать достаточно длинную псевдослучайную последовательность. Модуляция полярности видеоимпульсов немного сложнее для реализации, однако для достижения хороших корреляционных характеристик с ее помощью можно также использовать короткие коды Баркера. Одновременное использование обоих видов модуляции наиболее эффективно.

Рассмотрим области применения и преимущества пачек СКИ. В первую очередь к ним стоит отнести возможность корреляционной обработки СКИ. Дело в том, что чувствительности приемного устройства может не хватить для того, чтобы выделить единственный отклик от малозаметных или удаленных целей из-за распределения энергии импульса в широкой полосе частот. Приходится накапливать большое количество импульсов, которое может достигать нескольких сотен [12]. В то же время корреляционная обработка пачки импульсов, модулированной по закону время-импульсной или амплитудной манипуляции, в перспективе может дать тот же эффект всего за один цикл зондирования. Так, излучая пачку импульсов с времяимпульсной модуляцией (рис. 1, *а*) и применив корреляционную обработку на приемной стороне, можно выделить сигнал (рис. 1, *в*), скрытый под уровнем шумов (рис. 1, *б*).

За счет отказа от накопления можно снизить время анализа радиолокационной обстановки и дать возможность использовать СКИ-радиолокаторы для слежения за подвижными целями или установки на подвижных носителях, таких как автомобиль, беспилотный летательный аппарат, вертолет.



К достоинствам пачек СКИ можно отнести и возможность использования их в системах пассивных радиочастотных идентификаторов (Radio Frequency Identification – RFID). Отклик устройства обработки пассивной радиометки, работающего по принципу многоотводной линии задержки, на единственный импульс детерминирован и легко воспроизводим (рис. 2, *а*). Однако, если длительность отклика радиометки превосходит период следования импульсов внутри пачки, результи-



рующий сигнал является сложной комбинацией откликов (рис. 2, б) [13]. Корреляционная функция для такого, практически шумоподобного, сигнала будет иметь острый центральный пик и низкий уровень боковых лепестков (рис. 2, в).

Включение RFID в структуру сверхширокополосного радиолокационного канала позволяет создать новый класс радиолокационных систем, схожий по своей структуре с системами вторичной радиолокации [14]. Отличие от последних состоит в том, что ответчиком является полностью пассивное устройство, которое в совокупности с излученным сигналом формирует сложный сигнал, для стороннего наблюдателя близкий по структуре к шумоподобному, который, однако, является полностью детерминированным для приемного устройства.

Наконец, использование последовательностей СКИ позволяет решить вопрос доплеровской селекции движущихся целей за счет увеличения времени анализа сигнала, повышающего точность оценки доплеровского сдвига. До сих пор существующие СКИ-радиолокаторы практически не реализуют селекцию таких целей за исключе-

нием селекции по положению или других, более экзотических, способов [15].

К недостаткам излучения пачек СКИ следует отнести увеличение мертвой зоны радиолокатора. В результате пачки импульсов полностью неприменимы в подповерхностной радиолокации и радиолокаторах ледовой разведки, где зона вблизи радиолокатора также несет важную часть информации. Однако для радиолокационного зондирования на большие расстояния пачки импульсов применимы как нельзя лучше.

Второй недостаток связан с вычислением корреляционной функции последовательности. Дело в том, что далеко не всегда возможно однозначно предсказать форму отраженного СКИ-сигнала, как в детерминированных случаях [5], [16]. Решением для таких случаев может стать использование аналитических сигналов и корреляционной обработки в комплексной форме [17].

Несмотря на указанные недостатки, использование пачек СКИ-сигналов представляется перспективным и многообещающим методом повышения характеристик сверхширокополосного радиолокатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по радиолокации: в 2 кн. / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2014. Кн. 1. 672 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / пер. с англ. 2-е изд., испр. М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. 1104 с.
3. Networking with Ultra Wide Band, ed by M.-G. Di Benedetto // Proc. of the 1st Int. Workshop "Networking with UWB". Rome, 21 Dec. 2001. Rome: Ingegneria2000, 2002. 146 p.
4. Формирование наносекундных импульсов напряжения дрейфовыми диодами с резким восстановлением / Б. В. Иванов, А. А. Смирнов, С. А. Шевченко, А. Ф. Кардо-Сысоев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. Вып. 3. С. 25–29.
5. Taylor J. D. Introduction to ultra-wideband radar systems. Boca Raton: CRC Press, 1995. 688 p.
6. Расчет диаграммы направленности апертурной антенны, возбуждаемой сверхкороткими импульсными сигналами / В. А. Сарычев, М. В. Головачев, А. В. Кочетов, О. С. Миронов // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Муром: Полигр. центр Муром. ин-та Вологод. техн. ун-та, 2009. С. 61–72.
7. Головачев М. В., Кочетов А. В., Миронов О. С. Переотражение сверхкоротких импульсов на элементарных радиолокационных отражателях // 4-я Всерос. науч. шк. и конф. "Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред", Муром, 30 июня–3 июля 2009 г. Муром: Полигр. центр Муром. ин-та Вологод. техн. ун-та, 2009. С. 379–382.
8. Обнаружение спуфинг-атак на сигналы с ГНСС с использованием двухантенных измерений и данных ИНС / Я. Лю, С. Ли, С. Сяо, Ц. Фу // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, № 1(92). С. 100–115.
9. Задорожный С. Ю., Симунов С. Е., Бурчевский С. Е. Измерение дальности воздушной цели методом линейно-частотной модуляции с использованием комбинированных значений крутизны // Успехи соврем. радиоэлектроники. 2016. № 2. С. 69–71.
10. Клыков Д. В. Измерение дальности до зависшего вертолета в бортовой импульсно-доплеровской РЛС // Успехи соврем. радиоэлектроники. 2016. № 2. С. 73–78.
11. Иммореев И. Я. Сверхширокополосная локация: основные особенности и отличия от традиционной радиолокации // Электромагнитные волны и электронные системы. 1997. Т. 1, № 1. С. 81–88.
12. Сверхкороткоимпульсная РЛС дециметрового диапазона / М. В. Головачев, А. В. Кочетов, О. С. Миронов, П. С. Панфилов, В. А. Сарычев, И. М. Хомяков // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: тематич. сб. / Науч. совет РАН по распространению радиоволн. М., 2014. С. 255–260.
13. Устройства на поверхностных акустических волнах в радиосистеме контроля / А. С. Козлов, И. П. Пузыня, И. Б. Толстоухов, И. Б. Яковкин // Радиотехника. 1990. № 4. С. 26–27.
14. Обеспечение посадки авиационных средств на необорудованные аэродромы в чрезвычайных ситуациях на основе использования маркерных пассивных отражателей / Г. В. Анцев, В. А. Сарычев, В. В. Поповский, А. А. Турчак // Техническое оснащение бортовых

средств экстренной медицинской помощи в чрезвычайных ситуациях: науч.-техн. сб. / НИИ СП и концерн "Ленинец". СПб., 1992. С. 36–42.

15. Иммореев И. Я., Федотов Д. В. Оптимальная обработка радиолокационных сигналов с неизвестными параметрами // Радиотехника. 1998. № 10. С. 84–88.

16. Радзиевский В. Г. Трифонов П. А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М. : Радиотехника, 2009. 288 с.

17. Вайнштейн Л. А., Вакман Д. Е. Разделение частот в теории колебаний и волн. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1983. 288 с.

O. S. Mironov

JSC "Radar mms" (Saint Petersburg)

High Repetition Rate in Ultra-Wideband Radar Systems

Low and high repetition rate work modes for ultra-wideband radar are considered. The ultra-short pulse packs usage for ultra-wideband radar systems is proposed. The advantages, disadvantages and probable fields of usage of such method are shown.

Ultra-short Pulse, Ultra-wideband Signal, Pulse Modulation, High Repetition Rate, Pulse Pack

Статья поступила в редакцию 22 августа 2016 г.