

УДК: 537.86, 621.371, PACS: 84.40.Xb

РЕАЛИЗАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНСАМБЛЯ СИГНАЛОВ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ И ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ

А. А. Родович¹, А. А. Серяков¹, П. Н. Захаров¹, М. А. Полищук²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический
факультет

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Статья поступила в редакцию 7 июля 2016 г.

Аннотация. В работе рассматривается реализация радиолокационной системы, построенной на основе использования зондирующего сигнала типа OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) с перестройкой центральной частоты и интерполяцией значений фазы в поддиапазонах.

Ключевые слова: радиолокатор, OFDM.

Abstract. Use of OFDM signals with central frequency sweep in radars offers some advantages over conventional radiolocation systems based on chirp signals or short impulses, including increased time-domain resolution and dynamic range. The implementation of such a system is described in the article. The results of measurements demonstrating obtained range resolution of 10 cm are presented.

Increasing of the signal bandwidth is one of the main tendencies in radiolocation nowadays. Ultra-wideband location offers centimeter-range distance resolution and less sensitivity to jamming. If implemented using traditional approach with chirp or video or radio impulse ultra-wideband signals, the radar system experiences a number of problems, including less dynamic range due to the ADC (typical ENOB of 5-20 Gsps ADC is about 8-5 bits), requirements to the precision analog circuitry with linear phase and constant amplitude frequency response (otherwise ripples in time-domain signal appear), incompatibility with standard phase antenna arrays (PAR), limitations in time resolution due to RF switches for the short pulse approach.

A frequency-domain radar is free of the abovementioned problems. The measured quantity is the channel complex frequency response, which is then converted to analytic signal by FFT. This approach is quite similar to one used in vector network analyzers (VNAs) with time-domain option. However, the method is modified in this article for the use of OFDM signals instead of sinusoid signals used in VNAs. This allows orders of speed increase compared to sinusoid signals.

With OFDM signals ensemble, the dynamic range of the radar is kept high due to the use of 14-16 bits ADCs, the requirements to the analog circuitry are simple since the non-linearities are calibrated for each OFDM subcarrier, the PAR frequency dependence is taken into account using a specific phase shift on each subcarrier, and the RF switches limiting the time resolution are not used.

Keywords: radiolocation, OFDM.

Введение

В данной работе рассматривается реализация экспериментального образца радиолокационной системы, построенной на основе использования зондирующего сигнала типа OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) с перестройкой центральной частоты и интерполяцией значений фазы в поддиапазонах и приводятся результаты экспериментальных измерений.

Существующие радары высокого разрешения, построенные по принципу излучения ультракоротких радиоимпульсов и дальнейшей аналогово-цифровой обработки отраженного радиосигнала, имеют ряд недостатков:

1) необходимость высокоскоростного аналогово-цифрового преобразования ($2 - 20$ Гвыб/с), приводящего к высокому энергопотреблению, сложности и стоимости устройства;

2) наличие генератора ультракоротких радиоимпульсов. Длительность импульсов как правило ограничена быстродействием современных РЧ-ключей и для лучших устройств составляет единицы нс (в перспективных образцах заявлено до 0.3 нс);

3) необходимость построения сверхширокополосных приемно-передающих трактов с полосой пропускания 1 – 20 ГГц и равномерной АЧХ, включая специализированные антенные системы. Такие тракты сложны в изготовлении и имеют высокую стоимость;

4) невысокий динамический диапазон, обусловленный тем, что разрешение по уровню высокоскоростных АЦП составляет 6.5 – 8.5 эффективных бит;

5) трудности применения ФАР: ширина полосы измерений ограничивается полосой когерентности ФАР, что не позволяет работать с ультракороткими импульсами.

Радары, основанные на частотном сканировании, лишены указанных недостатков.

Измерение комплексной ЧХ канала в простейшем случае осуществляется путем последовательной перестройки частоты синусоидального сигнала с определенным шагом; на каждой частоте настройки измеряется отношение амплитуд принятого и переданного сигналов и разность фаз между ними.

Для повышения скорости измерения импульсного отклика комплексный коэффициент передачи канала может одновременно измеряться на нескольких частотах. В [5] описывается радар, использующий многочастотный сигнал с неортогональными компонентами. 8 одновременно излучаемых несущих генерируются отдельными генераторами. Данные сигналы смешиваются с синусоидальным сигналом, сгенерированным схемой ПЦС (прямого цифрового синтеза частоты) для получения дополнительного сдвига по частоте на каждой несущей (поочередно применяется 16 сдвигов). Таким образом, в [5] было обеспечено перекрытие диапазона частот 400МГц - 4845МГц с шагом по частоте 35 МГц. Импульсный отклик получался путем обратного преобразования Фурье накопленного частотного отклика. Разрешение по дальности составило 3 см. Максимальная дальность действия: 4.3 м (обусловлена шагом перестройки частоты). Время сканирования: 2 мс.

Для существенного повышения дальности действия и скорости сканирования РЛС может быть использован сигнал OFDM, содержащий

одновременно множество несущих частот [2]. Сигналы на данных поднесущих являются ортогональными во времени, что позволяет проводить независимое измерение комплексного коэффициента передачи канала на поднесущих.

Сигналы OFDM нашли чрезвычайно широкое применение в системах беспроводной связи. Тем не менее, такие сигналы лишь в последнее время начали применяться в радиолокации ([2], [3], [4]).

В [4] исследуется детектирование наличия/отсутствия цели в определенном направлении при наличии радиолокационных помех (сигналов, отраженных от посторонних статичных объектов). Сигнал представляет собой импульс OFDM с адаптивными параметрами. Данный сигнал используется для повышения характеристик детектирования по сравнению с одночастотным зондированием: наличие множества несущих позволяет уменьшить вероятность ложной тревоги и увеличить вероятность правильного обнаружения. Решение о наличии/отсутствии цели принимается на основе принципа максимального правдоподобия. С использованием статистического моделирования методом Монте-Карло показано, что применение OFDM-сигналов по сравнению с ЛЧМ позволяет увеличить вероятность правильного обнаружения более чем в 2 раза. В [4] не рассматривается определение расстояния до цели и скорости ее движения, построение импульсных откликов.

В [2] описываются возможности по комбинированию радаров и систем передачи информации, использующих OFDM. В качестве зондирующего сигнала используется выборка радиочастотного сигнала телекоммуникационной системы, модулированного передаваемым информационным сигналом. Данный сигнал после отражения от объектов принимается приемником, осуществляющим сравнение переданного и принятого сигналов. Расстояние до цели соответствует сдвигу фазы на каждой несущей OFDM, а скорость движения - сдвигу частоты. Эти параметры оцениваются в соответствии с принципом максимального правдоподобия. Осуществляется построение временного отклика при помощи обратного преобразования Фурье. В [2] приводятся результаты экспериментальных

испытаний описанной системы – диаграмма распределения скоростей и расстояний до объектов, в качестве которых выступали движущийся автомобиль и неподвижный уголкового отражатель, находящиеся в поле зрения системы. Система успешно различала объекты и осуществляла определение скорости движения.

Недостатком описанных в [2] систем является небольшая ширина полосы частот измерений, ограниченная тактовой частотой АЦП и ЦАП, и определяющая разрешение по дальности. Используется один сигнал OFDM с фиксированной несущей.

Реализация макета радара

В данной работе реализован экспериментальный образец РЛС, реализующий зондирование OFDM сигналом. Принцип работы данной системы основан на следующих аспектах:

- 1) импульсный отклик получается за счет косвенного измерения;
- 2) измеряется комплексная частотная характеристика канала, умножается на спектр выбранного зондирующего радиоимпульса, производится обратное преобразование Фурье;
- 3) полученный отклик математически эквивалентен отклику на радиоимпульс при прямом измерении (эквивалентность измерений в частотной и во временной области);
- 4) зондирующий сигнал имеет тип OFDM (со многими несущими), позволяет получить высокую скорость сканирования.

Блок – схема обработки сигнала в процессоре экспериментального образца РЛС представлена на рис. 1. Основными элементами данного алгоритма являются вычисление параметров OFDM сигнала и его генерация, а также процесс обработки принятого сигнала.

Для генерации OFDM-сигнала требуется заранее вычислить число несущих этого сигнала исходя из условий задачи. Для этого в данном экспериментальном образце РЛС используется алгоритм, базовыми входными параметрами которого являются разрешение по дальности, максимальная

дальность до цели и скорость цели. Выходными параметрами являются число несущих, число перестроек и число повторных измерений. Число несущих определяет максимальную дальность, на которой сигнал, отраженный от цели может быть обработан и распознан на фоне шума. Из-за ограничений системы, таких как объем памяти процессора образца РЛС, памяти ПЛИС передатчика и ПЛИС приемника, длина сигнала, и как следствие, максимально возможное число несущих ограничено (величиной 33 554 432). При достижении максимального числа несущих частот, для увеличения максимальной дальности обнаружения цели используются серии повторных измерений, позволяющие улучшить отношение сигнал/шум, и вследствие этого увеличить расстояния, на котором сигнал может быть распознан. Ширина полосы частот измерений определяет максимальное разрешение по дальности, она непосредственно связана с числом перестроек по частоте. Также алгоритм учитывает такие параметры как коэффициент усиления антенн, мощность передатчика, ЭПР цели, клипирование сигнала.

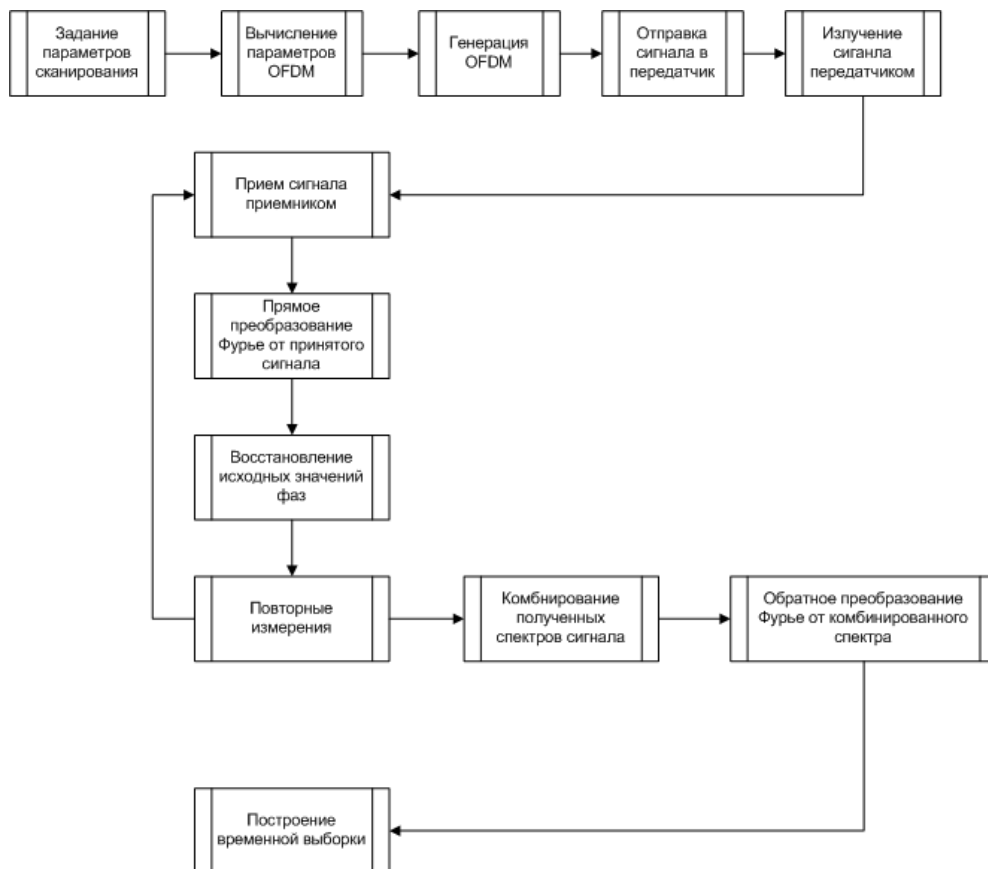


Рис. 1. Блок – схема обработки сигнала в процессоре РЛС

Блок-схема обработки сигнала в ПЛИС передатчика экспериментальной модели РЛС представлена на рис.2, в ПЛИС приемника – на рис.3.

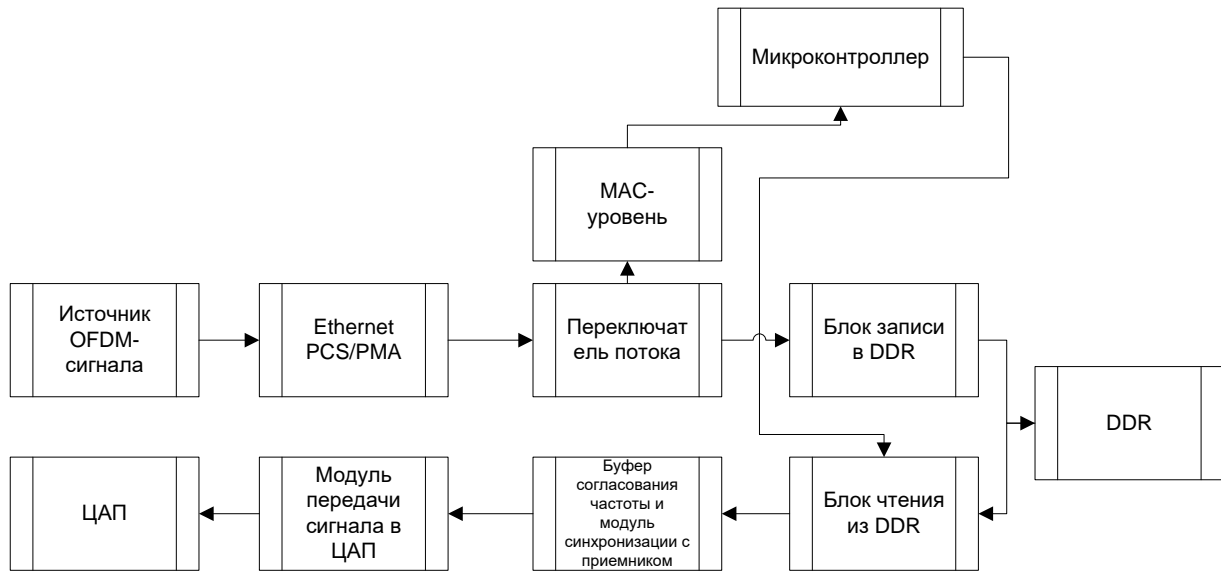


Рис.2 Блок-схема обработки сигнала в ПЛИС передатчика РЛС

Этапы обработки сигнала в ПЛИС передатчика:

1. OFDM-сигнал, сформированный процессором, принимается по Ethernet-интерфейсу в ПЛИС.
2. Посредством встроенного в ПЛИС микроконтроллера настраиваются параметры излучаемого сигнала – число импульсов и др.
3. По команде от процессора микроконтроллер подает команду начала излучения радиосигнала; сигнал вычитывается из DDR-памяти.
4. Данные из DDR проходят этап синхронизации с частотой ЦАП, передатчик генерирует синхросигнал приемнику о старте излучения.
5. Данные записываются в ЦАП.

Этапы обработки сигнала в ПЛИС приемника:

1. Данные поступают из АЦП и проходят модуль согласования тактовых частот с DDR.
2. При помощи микроконтроллера, встроенного в ПЛИС, происходит настройка приемника – переключение центральной частоты и др.
3. Синхронно с началом генерации передатчика, сигнал начинает записываться в модуль DDR при помощи контроллера памяти.

4. После записи сигнала в DDR, данные начинают вычитываться из нее и формировать Ethernet-пакеты.
5. Сформированные пакеты передаются на обрабатывающее устройство (процессор).



Рис.3. Блок-схема обработки сигнала в ПЛИС приемника РЛС

Результат лабораторных измерений с использованием разработанного экспериментального образца РЛС представлен на рис. 4.

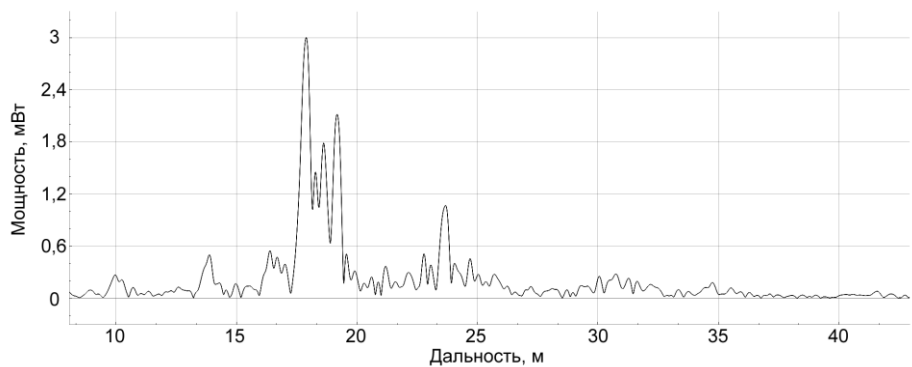


Рис. 4. Дальностной портрет, полученный с помощью экспериментального образца РЛС

Измерения рис.4 проводились в диапазоне частот 4 ГГц – 8 ГГц с использованием отдельных широкополосных рупорных антенн для передачи и приема. На рисунке изображен измеренный импульсный отклик от объектов внутри нескольких помещений здания. Экспериментально полученное

разрешение по дальности составило 10 см.

Разрешение по дальности в предложенной реализации модели РЛС не зависит от быстродействия РЧ-ключей, определяется полосой перестройки частоты.

Выводы

В рассмотренной экспериментальной реализации разрешение составило не хуже 10 см. Измерения в каждый момент времени производятся в сравнительно узкой полосе (десятки – сотни МГц), что упрощает построение трактов. Тракт может быть построен из различных, оптимальных для каждого диапазона частот, трактов обработки и антенных систем. Используются сравнительно низкоскоростные АЦП и ЦАП. Система имеет высокий динамический диапазон и чувствительность измерений, благодаря использованию узкополосной фильтрации на каждой поднесущей OFDM. Экспериментальная модель РЛС позволяет использовать сверхширокополосные ФАР: на каждой поднесущей OFDM имеется возможность задать свой сдвиг фаз для каждого элемента ФАР.

Литература

1. Баскаков С.И. Радиотехнические сигналы и цепи. М., Высшая школа, 2003.
2. OFDM Concepts for Future Communication Systems, под ред. Н. Rohling, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
3. Патент США №US7994969, V. Caekenberg et al., "OFDM Frequency Scanning Radar", 2011.
4. S. Sen, A. Nehorai, "Target Detection in Clutter Using Adaptive OFDM Radar", IEEE Signal Processing Letters, том 16, вып. 7, стр. 592 - 595, 2009.
5. P. van Genderen "A multi frequency radar for detecting landmines: design aspects and electrical performance", труды 31st European Microwave Conference, стр. 1-4, 2001.
6. Митрофанов Е.В., Черепенин В.А., Захаров П.Н., Королев А.Ф., Сысоев Н.Н. Сверхширокополосный радар с зондирующими ансамблями

ортогональных сигналов // Сб. докладов VI НТК молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО». ПАО «НПО «Алмаз». 2015. Москва.

7. Захаров П.Н., Турчанинов А.В., Сухоруков А.П. Использование ансамбля сигналов OFDM в качестве зондирующего сигнала в РЛС сверхвысокого разрешения // Сб. докладов XIX Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». г. Воронеж, 16-18 апреля. 2013.