

Реализация радиолокационной системы на основе сигналов с ортогональным мультиплексированием и частотным разделением

А. А. Родович,^{*} А. А. Серяков,[†] П. Н. Захаров[‡]
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
 физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Использование зондирующего сигнала типа OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) с перестройкой центральной частоты и интерполяцией значений фазы в поддиапазонах позволяет получить ряд преимуществ перед РЛС, использующими зондирующий сигнал в виде ЛЧМ или коротких импульсов, включая повышенное разрешение по дальности и динамический диапазон. В работе рассматривается реализация системы, построенной по данному принципу. Приводятся результаты экспериментальных измерений, демонстрирующие полученное разрешение по дальности не хуже 10 см.

PACS: 84.40.Xb УДК: 537.86, 621.371
 Ключевые слова: радиолокатор, OFDM.

Использование зондирующего сигнала типа OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) с перестройкой центральной частоты и интерполяцией значений фазы в поддиапазонах позволяет получить ряд преимуществ перед РЛС, использующими зондирующий сигнал в виде ЛЧМ или коротких импульсов, включая повышенное разрешение по дальности и динамический диапазон. В работе рассматривается реализация системы, построенной по данному принципу. Приводятся результаты экспериментальных измерений, демонстрирующие полученное разрешение по дальности не хуже 10 см.

Характерными особенностями сверхширокополосных РЛС являются:

1. высокая разрешающая способность по дальности и высокая точность измерения расстояния до цели и скорости цели;
2. возможность распознавания типа и класса объекта, построения его очертаний;
3. высокая помехозащищенность ввиду использования сверхширокополосных сигналов;
4. возможность работы с малой дальности;
5. высокая электромагнитная скрытность;
6. определение скорости цели без использования эффекта Доплера;
7. возможность обнаружения небольших объектов на фоне отражений от подстилающей поверхности.

Существующие радары высокого разрешения в большинстве случаев построены по принципу излучения ультракоротких радиоимпульсов и аналогово-цифровом преобразовании отраженного радиосигнала. Такой подход имеет 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 [1], свободны от указанных недостатков. Принцип работы таких РЛС следующий. При каждом угле поворота антенны РЛС, как и в классической схеме, производится измерение импульсного отклика. Однако, вместо прямого измерения (измерения временной формы

^{*}E-mail: andrey_rodovich@mail.ru

[†]E-mail: xakstreet@yandex.ru

[‡]E-mail: zakharov1@mail.ru



Рис. 1: Блок-схема обработки сигнала в процессоре РЛС

отраженного сигнала) производится косвенное измерение. Измеряется комплексная частотная характеристика (ЧХ) передачи радиоканала между передатчиком и приемником, умножается на спектр выбранного зондирующего радиоимпульса, производится обратное преобразование Фурье. Полученный отклик математически эквивалентен отклику на выбранный радиоимпульс при прямом измерении (эквивалентность измерений в частотной и во временной области).

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 существенного повышения дальности действия и скорости сканирования РЛС может быть использован сигнал OFDM, содержащий одновременно множество несущих частот [2, 3]. Сигналы на данных поднесущих являются ортогональными во времени, что позволяет проводить независимое измерение комплексного коэффициента передачи канала на поднесущих.

Сигналы OFDM [4] нашли чрезвычайно широкое применение в системах беспроводной связи. Тем не менее, такие сигналы лишь в последнее время начали применяться в радиолокации [2, 3, 5, 6].

В [6] исследуется детектирование наличия/отсутствия цели в определенном направлении при наличии радиолокационных помех (сигналов, отраженных от посторонних статичных объектов). 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.

Недостатком описанных в [2, 3] 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.

В данной работе реализован экспериментальный образец РЛС, реализующий зондирование OFDM сигналом.

Блок-схема обработки сигнала в процессоре РЛС представлена на рис. 1.

Блок-схема обработки сигнала в ПЛИС передатчика РЛС представлена на рис. 2.

Этапы обработки сигнала в ПЛИС передатчика:

1. OFDM-сигнал, сформированный процессором, принимается по Ethernet-интерфейсу в ПЛИС
2. Данные записываются в DDR при помощи кон-

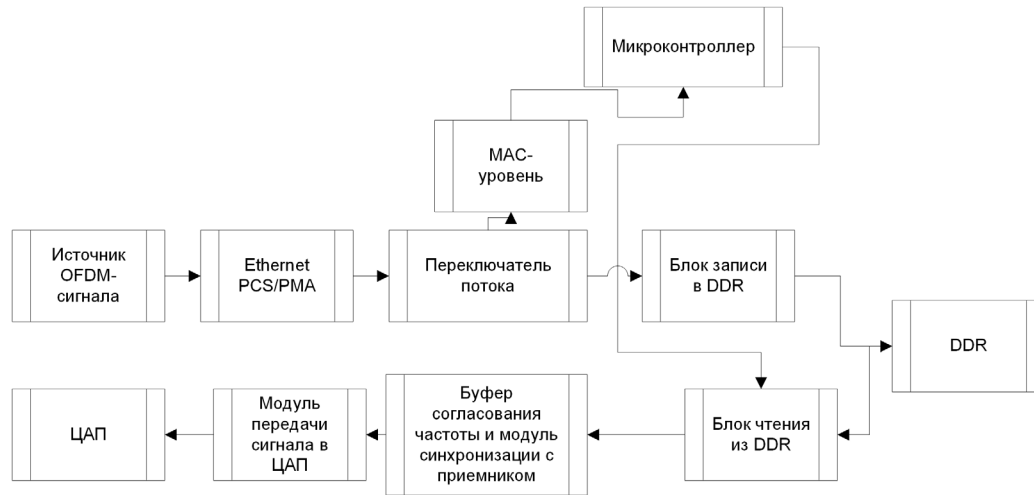


Рис. 2: Блок-схема обработки сигнала в ПЛИС передатчика РЛС

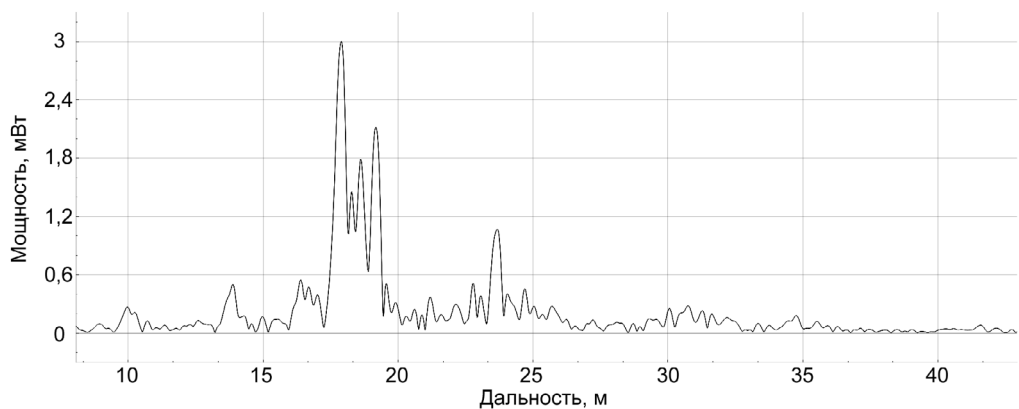


Рис. 3: Дальностной портрет, полученный с помощью экспериментального образца РЛС

троллера памяти

3. При помощи микроконтроллера настраиваются параметры излучаемого сигнала – число импульсов и др.
4. По команде от процессора микроконтроллер подает команду начала излучения радиосигнала; сигнал вычитывается из DDR-памяти
5. Данные из DDR проходят этап синхронизации с частотой ЦАП, передатчик генерирует синхросигнал приемнику о старте излучения
6. Данные записываются в ЦАП

Результат лабораторных измерений с использованием разработанного экспериментального образца РЛС представлен на рис. 3.

Измерения рис. 3 проводились в диапазоне частот 4–8 ГГц с использованием отдельных широкополосных рупорных антенн для передачи и приема. На рисунке изображен измеренный импульсный отклик от объ-

ектов внутри нескольких помещений здания. Экспериментально полученное разрешение по дальности составило 10 см.

Разрешение по дальности в предложенной реализации РЛС не зависит от быстродействия РЧ-ключей, определяется полосой перестройки частоты. 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. РЛС позволяет использовать сверхширокополосные ФАР: на каждой поднесущей OFDM имеется возможность задать свой сдвиг фаз для каждого элемента ФАР.

- [1] *van Genderen P.* A multi frequency radar for detecting landmines: design aspects and electrical performance. 31st European Microwave Conference. P. 1. (2001).
- [2] OFDM Concepts for Future Communication Systems. под ред. Н. Rohling, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [3] *Braun M., Fuhr M., Jondral F.K.* Spectral Estimation-based OFDM Radar Algorithms for IEEE 802.11a Signals. Conference IEEE VTC, в печати. (2012).
- [4] *van Nee R. Prasad R.* OFDM for Wireless Multimedia Communications. Artech House, 2000.
- [5] *Caekenberg V.* et al. Патент США № US 7994969. OFDM Frequency Scanning Radar. (2011).
- [6] *Se S., Nehorai A.* IEEE Signal Processing Letters. **16**, вып. 7. P. 592. (2009).

Implementation of radiolocation system based on signals with orthogonal frequency division multiplexing

A. A. Rodovich^a, A. A. Seryakov^b, P. N. Zakharov^c

*Department of Photonics and Microwave Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^aandrey_rodovich@mail.ru, ^bxakstreet@yandex.ru, ^czakharov1@mail.ru

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 system is described in the article. The results of measurements demonstrating obtained range resolution of 10 cm are presented.

PACS: 84.40.Xb

Keywords: radiolocation, OFDM.

Сведения об авторах

1. Родович Андрей Александрович — физик первой категории; тел.: (495) 939-29-15, e-mail: andrey_rodovich@mail.ru.
2. Сeryakov Александр Александрович — аспирант; тел.: (495) 939-29-15, e-mail: xakstreet@yandex.ru.
3. Захаров Петр Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-29-15, e-mail: zakharov1@mail.ru.