

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА БЛИЖНЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИГНАЛА OFDM И ЕЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЦЕЛЕЙ

В.А. Коптев, Московский технический университет связи и информатики, yuy.xxx.98@bk.ru;

Д.А. Везарко, Московский технический университет связи и информатики, vezarko00@mail.ru;

Б.М. Халматов, Московский технический университет связи и информатики, wotblitzdrd@gmail.com;

А.С. Чечельницкий, Московский технический университет связи и информатики, mr.vip64@yandex.ru.

УДК 621.371, 621.396

Аннотация. В работе приведена реализация РЛС при использовании в качестве зондирующего сигнала *OFDM*. Оценены свойства и параметры целей, для отслеживания которых предназначена рассматриваемая РЛС. Объяснено применение ШП *OFDM*-сигнала. Приведен и обоснован выбор ряда параметров РЛС. Спроектирована структурная схема и объяснен приблизительный алгоритм работы локатора с *OFDM*. Определены характеристики по возможности обнаружения и оценки параметров цели.

Ключевые слова: актуальные радиолокационные цели; система ближней радиолокации; *OFDM*-сигнал; функция неопределенности; разрешающая способность.

A SHORT-RANGE RADAR SYSTEM USING THE OFDM SIGNAL AND ITS CAPABILITIES FOR DETECTING MODERN TARGETS

V.A. Koptev, Moscow Technical University of Communications and Informatics;

D.A. Vezarko, Moscow Technical University of Communications and Informatics;

B.M. Khalmatov, Moscow Technical University of Communications and Informatics;

A.S. Chechelnitsky, Moscow Technical University of Communications and Informatics.

Annotation. The paper presents the implementation of radar when using *OFDM* as a probing signal. The properties and parameters of the targets that the radar in question is designed to track are evaluated. The application of the *SHF OFDM*-signal is explained. The choice of a number of radar parameters is given and justified. A block diagram is designed and an approximate algorithm for the operation of the locator with *OFDM* is explained. The characteristics of the possibility of detecting and evaluating the parameters of the target are determined.

Keywords: current radar targets; short-range radar system; *OFDM*-signal; uncertainty function; resolution.

Введение

В настоящее время в системах передачи данных часто применяется сигнал с ортогональным частотным разделением и мультиплексированием (*OFDM*) [1]. С его помощью удастся повысить скорость передачи данных за счет своей высокой спектральной эффективности. Но в радиолокации этот сигнал пока не получил своего распространения, хотя представляется перспективным для различения малозаметных объектов.

Особенности современных РЛ целей

В последнее время, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) часто применялись для атак на объекты критически важной инфраструктуры. Также они получили широкое распространение и в гражданской сфере. Поэтому стали актуальными задачи по противодействию и борьбе с БПЛА, особенно если они применяются в особо охраняемых зонах [2, 3].

Для этого БПЛА необходимо достоверно обнаружить, установить факт его использования на контролируемой территории. Обнаруживать современные БПЛА малых геометрических размеров при помощи РЛС затруднительно. Потому что запуск таких объектов осуществляется на малой высоте, они имеют малые размеры и малую отражательную способность, непредсказуемую траекторию движения и большой динамический диапазон скоростей и высот. Однако, у БПЛА, в том числе, есть и определенные особенности, которые способствуют их обнаружению.

Обычно, БПЛА разделяют по летным параметрам: взлетная масса, дальность полета, продолжительность полета и максимальная высота полета. По этим параметрам их группируют на: малые, легкие, средние, тяжелые и смешанные. Основную проблему для обнаружения представляют малые БПЛА: взлетный вес до 25 кг, радиус действия до 10-40 км, максимальная высота 3 км и продолжительность полета до 4-х часов [4].

Одной из основных характеристик цели с точки зрения радиолокации – это эффективная площадь рассеивания (ЭПР) цели. Хотя она называется площадью и измеряется в квадратных метрах это – параметр энергетический. Он устанавливает соотношение между плотностью потока мощности, создаваемой РЛС у объекта и плотностью потока мощности у антенны РЛС, созданного вторичным излучением объекта. Иными словами, ЭПР такая фиктивная площадь изотропного излучателя, которая суммирует участки объекта, вносящие значимую долю в общую плотность потока мощности вторичного излучения, распространение которого, направленно в сторону РЛС. Если размеры неровностей объекта меньше, чем $\lambda/16$, то они никак не скажутся на электромагнитной волне – отражение будет как от ровного участка [9].

Определение ЭПР цели необходимо для расчета потенциальной возможности РЛС ее обнаружить. Этот параметр зависит от сложной формы объекта, отражающих свойств деталей, из которых состоит конструкция БПЛА (например: металлический аккумулятор, камера и диэлектрический пластиковый корпус) и меняется от угла наблюдения. Поэтому, обычно, используют среднее значение ЭПР в определенном секторе углов. Аналитически ЭПР можно рассчитать для простых геометрических фигур, а для сложных объектов – определяется опытным путем, либо моделированием [5]. Для малых БПЛА ЭПР оценивается около 0,1-0,01 м², а может быть и того меньше за счет использования радиопрозрачных материалов. Как показывают исследования, в дециметровом диапазоне дальность обнаружения таких БПЛА составляет, соответственно, до 9-16 км и до 0,8-2 км [2, 6]. Вариант исполнения БПЛА типа «Switchblade» показан на рис. 1 [7].



Рисунок 1

Описание системы РЛС

Одно из направлений развития радиолокации – это применение широкополосных (ШП) сигналов, у которых эффективная полоса спектра составляет примерно 10% от несущей частоты. Их применение обусловлено рядом преимуществ по сравнению с узкополосными сигналами, а именно: высокая разрешающая способность по расстоянию, устойчивость к пассивным помехам, относительно малое затухание в средах, скрытность работы и т.д. За счет высокой точности определения расстояния (единицы метров) такие сигналы можно применять для обнаружения малоразмерных БПЛА [9].

Все ШП сигналы, по методу образования, можно разделить на три группы: шумоподобные, короткие видеоимпульсы и многочастотные. Шумоподобный сигнал образуется с помощью специальных генераторов шума. Короткие видеоимпульсы образуются с помощью быстрого (до единиц нс) переключения радиочастотных ключей. Многочастотные ШП сигналы образуются с помощью одновременной или последовательной генерации большого числа отдельных спектральных составляющих [8].

В свою очередь, в качестве зондирующего многочастотного ШП сигнала, можно применить сигнал *OFDM*. Он состоит из множества ортогональных поднесущих частот, что дает возможность независимо анализировать сигналы на каждой из поднесущих. В дополнение к этому у *OFDM*-сигнала на каждой поднесущей можно реализовать сигнал с различной модуляцией, что повышает вариативность его применения. Также *OFDM*-сигнал за счет своей структуры устойчив к узкополосным помехам. ШП сигнал является шумоподобным, за счет чего можно обеспечить скрытность работы РЛС.

Сигнал *OFDM* формируется математическими методами при помощи алгоритмов цифровой обработки сигнала (ЦОС), таких как дискретное преобразование Фурье (ДПФ) [12], аналитическое представление:

$$\dot{U}_{OFDM}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} \dot{X}_k * e^{i\frac{2\pi}{N} * k * n} \quad \dot{X}_k = \sum_{n=1}^{N-1} \dot{U}_{OFDM}(n) * e^{-i\frac{2\pi}{N} * n * k}$$

где: $x(n)$ – n -й отсчет сигнала, X_k – k -й произвольный комплексный символ модуляции, N – число поднесущих, n – номер отсчета, k – номер поднесущей.

Расстояние между поднесущими и длительность импульса устанавливается из условия ортогональности. Число отсчетов на период сигнала, обычно, устанавливается равным степени числа 2. Комплексный символы модуляции устанавливаются из входных данных. Можно подобрать их специальные комбинации, которые будут влиять на разрешающую способность сигнала во временной области. При применении сигнала *OFDM* в РЛС могут потребовать внесение незначительных структурных изменений. Например, использование усилителей, рассчитанных на высокий ПИК-фактор. Или использование производительных ПЛИС, способных быстро производить математические операции в цифровом виде.

Ориентировочные параметры РЛС

Предполагается, что рассматриваемая РЛС должна быть стационарной, но с возможностью несложного перемещения станции и быстрого развертывания. Местами установки могут быть аэропорты, крыши зданий, охранных пунктов. Соответственно, масса подобных локаторов должна быть умеренной. Варианты

исполнения РЛС с подходящими масса-габаритными показателями представлены на рис. 2 [13, 14].



Рисунок 2

Предполагается, что частотные диапазоны работы, рассматриваемой РЛС, будут приходиться на *C*, *X* и *Ku*, по классификации *IEEE*, то есть, соответственно, 4,0-8,0 ГГц, 8,0-12,0 ГГц и 12,0-18,0 ГГц. Работа в этих диапазонах частот обеспечивает низкий коэффициент ослабления сигнала и достаточный уровень значений определяемой ЭПР для хорошей разрешающей способности и точность определения расстояния. При этом аппаратура остается сравнительно компактной по габаритам [10, 11].

Что касается других параметров РЛС, то можно дать ориентировочные оценки. У РЛС подобного класса, обычно, выходная мощность излучения составляет сотни Ватт [13, 14]. Для удобства расчета примем, что в обычных

условиях она равна 200 Вт. Предполагается, что РЛС будет использовать фазированную антенную решетку. У таких антенн коэффициент усиления составляет приблизительно 20-30 дБи [15]. Примем среднее значение коэффициента усиления антенны, он будет составлять 26 дБи.

Разработанная структурная схема РЛС

Структурная схема работы рассматриваемой РЛС представлена на рис. 3. Принцип ее работы основан на стандартных алгоритмах формирования и обработки *OFDM*-сигнала. Началом передающей части выступает блок реализации сигналов на поднесущих частотах *OFDM*. Это могут быть сигналы с квадратурно-амплитудной модуляцией или иными разнообразными видами сложных модуляций поднесущих. Блок может быть реализован с помощью генератора случайной битовой последовательности и квадратурного модулятора.

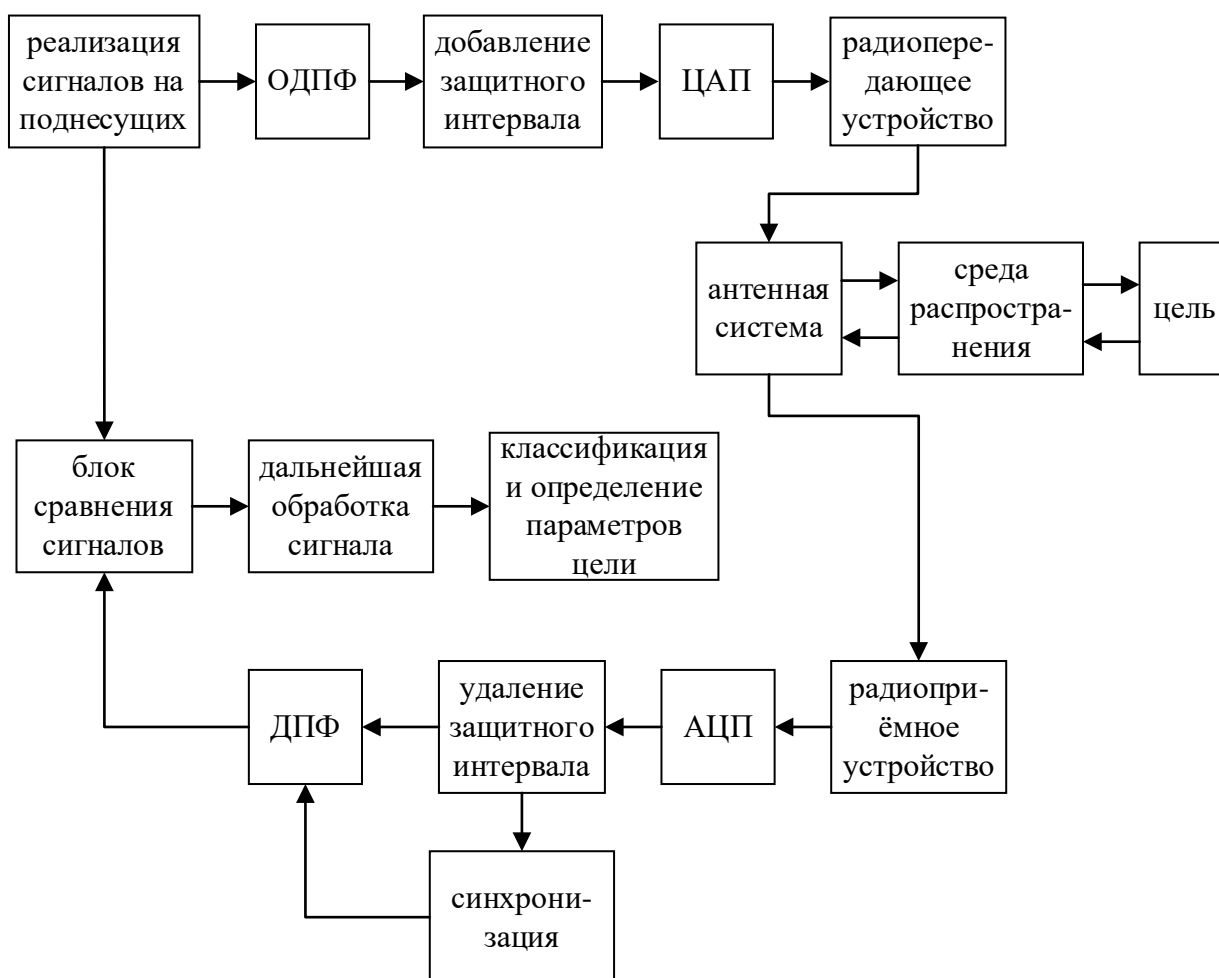


Рисунок 3

Затем следует блок ОДПФ, где формируется *OFDM*-сигнал. Преобразование выполняется с поступающими на вход сигналами. Следующим этапом идет блок добавления защитного интервала. Он необходим, чтобы избежать межсимвольной интерференции. Защитный интервал может быть выполнен в качестве циклического повторения полезной части сигнала, длительность которого может достигать времени длительности полезного сигнала. В частности, по нему можно

определять момент начала приема выборки (синхронизация) с принятым сигналом и грубую оценку задержки.

Затем *OFDM*-сигнал проходит в блок ЦАП, переводится в аналоговый вид и подается на радиопередающее устройство. В нем сигнал подготавливается для подачи на антенну. Для этого его необходимо перенести с промежуточной на СВЧ-частоту. Затем сигнал проходит фильтрацию в нужной полосе спектра, чтобы избавиться от паразитных гармоник, образовавшихся с переводом центральной частоты сигнала. После этого сигнал усиливается до необходимой мощности и через согласующее устройство подается на антенную систему.

С антенной системы сигнал излучается в пространство. Там происходит отражение сигнала от местных предметов и от цели, если она присутствует. Распространение в среде сказывается на сигнале: примешиванием шумов, задержкой и доплеровским сдвигом частоты, если объект, от которого отразился сигнал, был в движении. После этого отраженный сигнал поступает обратно на антенную систему. Приема происходит зеркально, относительно передаче.

В радиоприемном устройстве сигнал фильтруется, усиливается и переносится на промежуточную частоту обработки. Затем производится АЦП и аналоговый сигнал переходит в цифровой вид. Далее происходит удаление защитного интервала. Эта отделенная часть принятого сигнала направляется в блок синхронизации, с ее помощью определяется момент времени, чтобы начать операцию ДПФ.

Далее полезная часть сигнала и результат синхронизации поступают на блок ДПФ. В нем *OFDM*-сигнал расформируется на отдельные поднесущие составляющие, и они подаются на блок, где происходит сравнение исходного и принятого сигналов. Затем сигналы и результаты сравнения поступают на дополнительную обработку в целях классификации объекта, дополнительного анализа и повышения точности оценки параметров цели.

В качестве устройств, на которых можно реализовать описанную обработку сигнала, можно будет использовать высокопроизводительные программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). В частности, могут подойти ПЛИС *Xilinx* серии *Virtex-5* или более новые, или ПЛИС отечественной разработки серии *5578ТС* от «КТЦ «ЭЛЕКТРОНИКА». Они уступают по производительности, но можно организовывать параллельные вычисления на нескольких вычислительных системах [19, 20]. Для аналоговой части тоже есть решения по работе с *OFDM*-сигналами, так как они используются почти во всех современных стандартах беспроводной связи. Поэтому не будет проблем подобрать материальную базу для реализации РЛС с не стандартным зондирующим сигналом.

Оценка характеристик разработанной РЛС

В качестве оценок характеристик обнаружения рассматриваемой РЛС можно использовать основное уравнение радиолокации [9]. Часть используемых там параметров были оговорены выше.

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_{пер} * G_a^2 * \sigma * \lambda^2}{(4\pi)^3 * P_{c min} * L_n}}$$

где: $P_{пер} = 200$ Вт; $G_a = 26$ дБ ≈ 400 ; $\sigma = 0,01$ м². Длина волны на частоте 10 ГГц $\lambda \approx 0,03$ м. Чувствительность приемника РЛ, составляет $P_{c min} \approx 10^{-15}$ Вт [16, 17]. Коэффициент ослабления радиосигнала L_n , который включает в себя потери в атмосфере, в СВЧ тракте при рассогласовании элементов, при детектировании сигнала. Таким образом, общий коэффициент потерь ≈ 10 дБ [9]. В результате

расчета получается, что расчетная дальность обнаружения цели с ЭПР 0,01 м² при установленных параметрах составляет приблизительно:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{200 * 400^2 * 0,01 * 0,03^2}{(4\pi)^3 * 10^{-15} * 10}} \approx 1,95 \text{ км}$$

Если РЛС работает с такими параметрами, то она обеспечивает обнаружение малоразмерного БПЛА на расстоянии 1,95 км и дает время для принятия решения. Например, БПЛА типа «Switchblade» способен лететь с максимальной скоростью 160 км/ч. В таком случае дистанцию R_{max} он преодолит за 44 с. В реальных условиях дальность обнаружения, а значит и время на принятие решения будет, конечно, меньше.

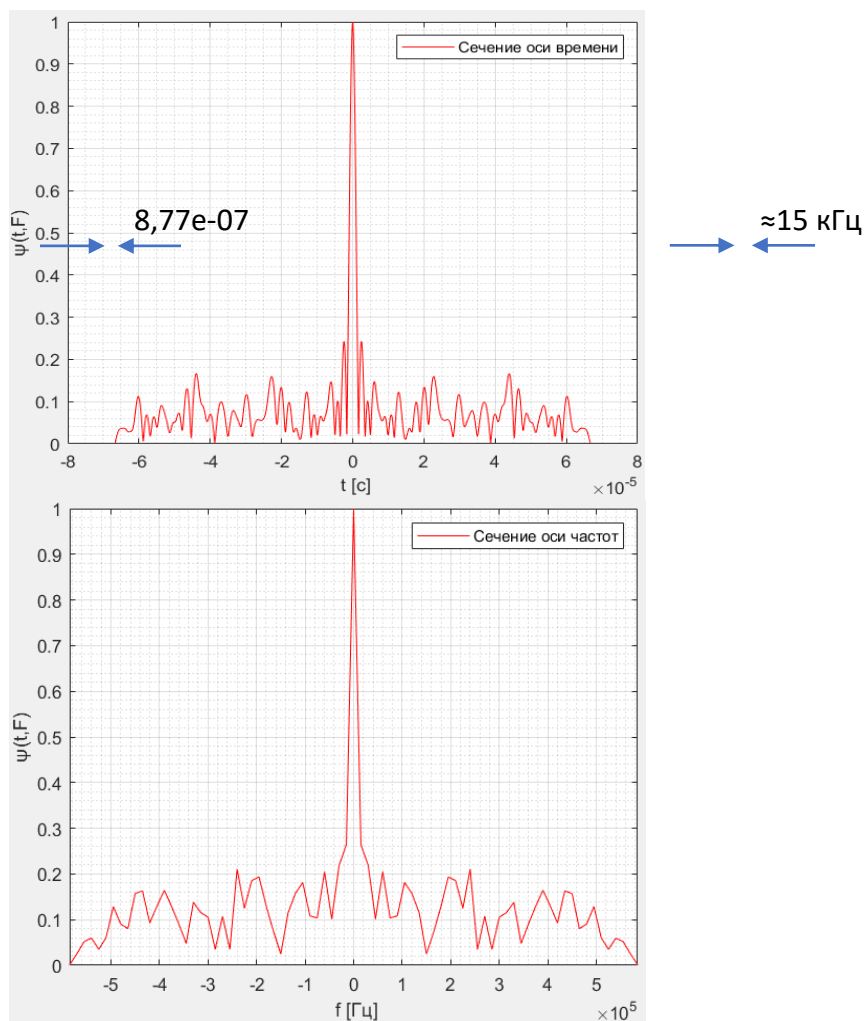


Рисунок 4

Имеет смысл аналитически рассчитать, дать теоретическую оценку параметрам РЛС, которые она может обеспечить, если применять не типового зондирующий сигнал. Для самой общей оценки можно использовать расчет двумерной автокорреляционной функции (АКФ) – она же функция неопределенности (ФН). Разрешение по дальности и скорости (задержки и частотному сдвигу) можно оценить по области высокой корреляции (уровень 0,5 от максимума), рассчитанной ФН. Стоит учесть, что форма сигнала OFDM во временной области зависит от количества поднесущих и комплексных символов

модуляции, которые задают фазу на поднесущих колебаниях. Для первичного расчета зададимся случайными символами, но их можно подбирать для определенной формы сигнала. Аналитическая формула для расчета ФН:

$$\psi(\tau, F) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}_{OFDM}(t) \dot{U}_{OFDM}^*(t - \tau) e^{i2\pi Ft} dt \right|$$

где: знак * – означает комплексное сопряжение, τ – задержку, а F – частотный сдвиг.

У ШП сигналов и сложных кодово-фазомодулированных сигналов, ФН приобретает вид «кнопочной функции», с острым пиком области высокой корреляции [9]. В свою очередь, *OFDM*-сигнал должен иметь такой же вид ФН во временной области. Это означает, что он имеет высокую разрешающую способность.

Чтобы проверить предположение был сформирован *OFDM*-сигнал стандарта *LTE* и построена его ФН при разных параметрах с целью определить изменение характеристики ФН. Параметры сигнала: расстояние между поднесущими 15 кГц; длительность *OFDM*-символа 67 мкс; ширина спектра 1,14 МГц и 2,265 МГц; количество поднесущих, соответственно, 76 и 151. На рис. 4 показаны сечения ФН для сигнала с шириной спектра 1,14 МГц. На рис. 5 показаны сечения ФН для сигнала с шириной спектра 2,265 МГц.

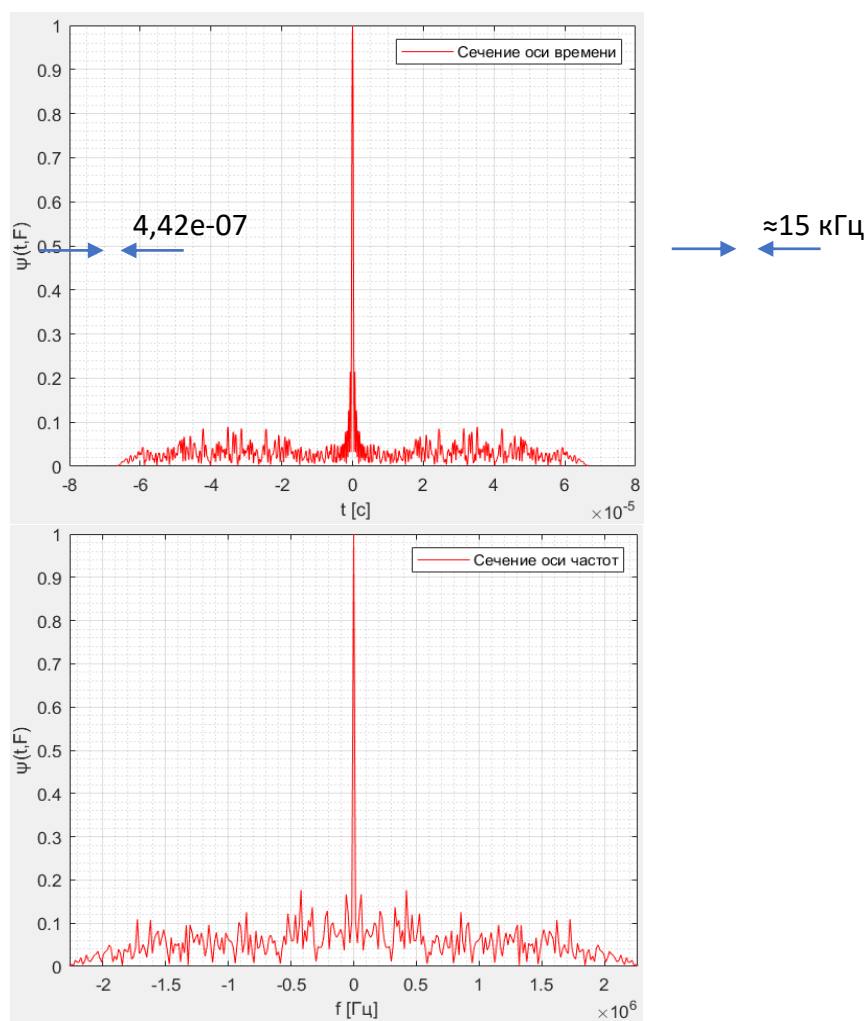


Рисунок 5

Как видно из рис. 4 и 5, с изменением количества поднесущих сигнала ФН меняет вид. С меньшим количеством поднесущих АКФ по задержке приобретает «ножевидную» форму. А с увеличением количества поднесущих она стремится к «кнопочной» и уменьшаются боковые лепестки. В свою очередь, АКФ по частотному сдвигу почти не меняется и имеет «ножевидную» форму. Это происходит из-за формы спектра, близкой к прямоугольной. Ширина области высокой корреляции почти равна шагу между поднесущими.

Полученные результаты по вычислению сечений ФН дают представление о разрешающей способности сигналов по параметрам цели (табл. 1).

Таблица 1.

Ширина спектра сигнала	Разрешение по дальности	Разрешение по радиальной скорости
1,14 МГц	131,5 м	225 м/с
2, 265 МГц	65,7 м	225 м/с

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что, используя сигнал с большим количеством поднесущих, можно добиться разрешающей способности по расстоянию в единицы метров. Но при этом, имеется плохая разрешающая способность по скорости. Прямое корреляционное сравнение спектров принятого и исходного сигналов не смогут различить объекты, двигающиеся с низкой скоростью. Для оценки смещения частоты сигнала требуется применять иные методы.

Сигнал *OFDM* обладает хорошим разрешением по расстоянию. Но с увеличением числа поднесущих, ширина спектра становится больше, мощность сигнала размывается по спектру, и поэтому, нужно искать компромисс между мощностью сигнала и разрешающей способностью.

Заключение

В работе была описана РЛС, которая использует зондирующий ШП *OFDM*-сигнал. Проведен анализ современных целей, которые должна обнаруживать рассматриваемая РЛС. В частности, наиболее актуально проблема обнаружения и отслеживания малоразмерных БПЛА с малой ЭПР. Приведено несколько вариантов исполнения станции и ориентировочно определены ее параметры. Определили максимальную дальность обнаружения малоразмерного БПЛА с ЭПР=0,01м², она составила, приблизительно 1,95 км. Обнаружение БПЛА на такой дальности дает время на реакцию, если возникнет экстраординарная ситуация. В частности, был рассмотрен пример с БПЛА типа «*Switchblade*» и определено то, что в теории средствами РЛС его можно будет обнаружить примерно за минуту до подлета к контролируемой территории. Проведена оценка по разрешению параметров сигнала при разных параметрах *OFDM*-сигнала. Форма ФН по задержке стремится к «кнопочной», что говорит о высокой потенциальной возможности определения параметров цели, но по частоте почти не меняется и остается «ножевидной». Дальнейшие исследования будут нацелены на улучшение разрешения по скорости, основанных на косвенных методах оценки смещения частоты.

Литература

1. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология *OFDM*. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 352 с.

2. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. – СПб: Научное издание, 2020. – 204 с.
3. Митрофанов Д.Г., Шишков С.В. Инновационный подход к вопросу обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2018. – № 1. – С. 28-40.
4. Классификация БПЛА по летным характеристикам // Geoscan URL: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html> (дата обращения: 03.04.2023).
5. Парнес М. Расчет эффективной поверхности рассеяния малых объектов // СВЧ электроника, 2017. – № 2. – С. 22-24.
6. Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра // Российские беспилотники URL: <https://russiadrone.ru/publications/metody-obnaruzheniya-malorazmernykh-bespilotnykh-letatelnykh-apparatov-na-osnove-analiza-elektromagn/>
7. Switchblade 300 block 20 loitering munition // URL: <https://www.avinc.com/lms/switchblade> (дата обращения: 03.04.2023).
8. Сапронов Д.И. Совместное оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах с использованием сверхширокополосных дискретно-кодированных по частоте сигналов: дис. канд. техн. наук: 05.12.14. – «Радиолокация и радионавигация». – Москва, 2020. – 112 с.
9. Сперанский В.С. Радиолокация, радиолокационные системы и устройства. – М.: Брис-М, 2011. – 257 с.
10. Подстригаев А.С., Слободян М.Г., Смоляков А.В., Сидорцов И.А. Анализ плотности распределения РЛС военного и специального назначения в частотном диапазоне // Молодой ученый, 2016. – № 27 (131). – С. 136-138.
11. Диапазоны частот и длин волн // radartutorial URL: <https://www.radartutorial.eu/07.waves/wa04.ru.html> (дата обращения: 9.04.2023).
12. Свойства преобразования Фурье // dsplib.org URL: https://ru.dsplib.org/content/fourier_transform_prop/fourier_transform_prop.html (дата обращения: 09.04.2023).
13. Радиолокационная система «Смерч» на страже ваших объектов // НОЗ.С URL: <https://dfnc.ru/popular1/radiolokatsionnaya-sistema-smerch-na-strazhe-vashih-obektov/> (дата обращения: 12.05.2023).
14. «Verba» and «Barnaul-T»: protection of troops in the near zone // top war URL: <https://en.topwar.ru/160806-verba-i-barnaul-t-zaschita-vojsk-v-blizhnej-zone.html> (дата обращения: 12.05.2023).
15. Багринцев Д. Яковлев К. Особенности энергетического расчета требуемого коэффициента усиления фар СВЧ-диапазона при организации связи с большими подвижными объектами // СВЧ-электроника, 2020. – № 1 (12). – С. 44-45.
16. Ботов М.И. и др. Основы теории радиолокационных систем и комплексов: учеб. Под общ. ред. М.И. Ботова. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 530 с.
17. Тяпкин В.Н. и др. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск: учебник. Под общ. ред. В.Н. Тяпкина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 536 с.
18. Кхыонг Н. В. Оценка влияния метеобразования на распространение радиоволн в X-диапазоне // Труды МФТИ, 2020. – № 3. – Т. 12. – С. 94-103.
19. Зотов А. Особенности архитектуры нового поколения высокопроизводительных ПЛИС FPGA фирмы Xilinx серии Virtex-6 // Компоненты и технологии, 2009. – № 8. – С. 78-85.
20. Городков П. Особенности разработки HDL-проектов для реализации в базисе ПЛИС серии 5578ТС // Наука | технология | бизнес, 2017. – № 5. – С. 50-59.