

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХКОРОТКОИМПУЛЬСНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

*Никольский Илья Владимирович (oefimova@otd13.vniief.ru), Мартыненко Сергей Павлович,
Лопатин Павел Юрьевич, Иванов Вадим Владимирович, Чурин Артем Андреевич,
Жиганов Максим Александрович*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе представлены результаты моделирования многопозиционной трехкоординатной сверхкороткоимпульсной (СКИ) радиолокационной станции (РЛС). Описан метод обработки локационной информации, метод определения координат целей при использовании в качестве зондирующего сигнала импульса сверхкороткой длительности. Сформулированы требования к экспериментальному стенду. Приведены результаты экспериментов по лоцированию различных целей в лабораторных условиях и в открытом пространстве. Представлены результаты экспериментов по демонстрации пространственного разрешения СКИ РЛС.

Ключевые слова: радиолокация, многопозиционная РЛС, сверхкороткий импульс.

ULTRASHORT PULSE RADAR MODEL DEVELOPMENT

*Nikolskiy Ilya Vladimirovich (oefimova@otd13.vniief.ru), Martynenko Sergey Pavlovich,
Lopatin Pavel Yurievich, Ivanov Vadim Vladimirovich, Churin Artem Andreevich,
Zhiganov Maxim Alexandrovich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

This paper presents the results of development of a multi-position 3D ultrashort pulse radar model. The methods for location information processing and for target position determination using an ultrashort transmitting pulse are described. Requirements for the developed test bench are specified. We present the results of experiments on detecting different objects in laboratory and in open space conditions, as well as of experiments showing the spatial resolution of the ultrashort pulse radar model.

Key words: radiolocation, multi-position radar system, ultrashort pulse.

Введение

В современных условиях требования к системе диспетчеризации аэропортов могут быть пересмотрены с учетом бурного развития беспилотной техники и увеличения объемов воздушных перевозок. На больших расстояниях зачастую сложно определить тип потенциально опасного объекта, находящегося на траектории взлета или посадки воздушного судна, для последующего принятия решения о его устранении. Поэтому контроль воздушного пространства аэропортов на наличие малоразмерных целей (например, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), людей или птиц) во избежание различных

инцидентов или даже авиакатастроф является весьма актуальной задачей.

Радиолокаторы обзора летного поля согласно требованиям [1] должны обеспечивать на расстоянии 2000 метров точность определения координат по азимуту и дальности 10 метров и разрешающую способность 15 метров. Для решения этой задачи традиционно используются однопозиционные радиолокаторы с зондирующим сигналом в виде радиоимпульсов сантиметрового или миллиметрового диапазона [2], которые позволяют путем разработки специализированных антенн сформировать в азимутальной плоскости узкую диаграмму направленности. Переход к многопозиционной (МП) РЛС [3] со СКИ зондирующим сигналом может не только суще-

ственно повысить точность определения координат, но и дает возможность локализации объекта в пространстве, повышая информативность системы в целом.

ной линией. Эта поверхность описывается уравнением сфероида:

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты точки O , а параметры сфероида a и b можно найти следующим образом:

$$a = \frac{p}{2}; \quad b = \frac{\sqrt{p^2 - d^2}}{2},$$

где p – сумма дальностей, измеряемый параметр.

Выбор метода определения координат целей

Для МП РЛС при определении координат цели предпочтительно использовать позиционные методы, суть которых заключается в измерении выбранного параметра – угла, дальности, разности или суммы дальностей до цели – с нескольких приемных позиций [3]. Возможности угломерного метода ограничиваются направленными свойствами приемных антенн, разностно-дальномерный метод не позволяет определить все три координаты цели. При использовании дальномерного метода на каждой из позиций должен находиться и приемник, и передатчик. Существенно упростить схему МП РЛС позволяет суммарно-дальномерный метод, для применения которого необходимо иметь лишь одну передающую позицию и несколько приемных.

Добавление второго приемника определяет местоположение объекта как линию пересечения двух сфероидов с центром в передатчике излучения. Добавление третьего приемника определяет положение объекта как одну или две точки пересечения трех сфероидов с общим центром в передатчике. Четвертая антенна позволяет определить, в какой полусфере пространства находится объект.

На рис. 1 проиллюстрировано направление следования зондирующего сигнала в случае разнесенных в пространстве передатчика и приемника. Видно, что, измеряя величину задержки p между моментами излучения зондирующего импульса передатчиком и прихода, отраженного целью зондирующего импульса в приемник, можно вычислить сумму дальностей от передатчика до цели и от цели до приемника $\sigma\tau_1 + \sigma\tau_2 = p$.

Варьируя количество и расстановку позиций в МП РЛС, можно добиться линеаризации уравнений (1) относительно неизвестных параметров x, y, z . Сумма дальностей p от передатчика до каждой из четырех приемных антенн, размещенных в форме квадрата в одной плоскости с передатчиком в центре, представлена ниже. Для приемной антенны с номером «ноль» сумма дальностей p равна:

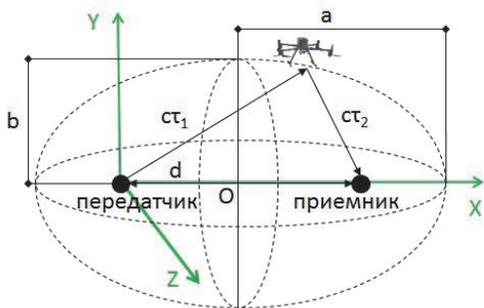


Рис. 1. Схема суммарно-дальномерного метода определения координат: d – расстояние между передатчиком и приемником; точка O – центр сфероида с координатами (x_0, y_0, z_0) ; a – размер большой полуоси, b – размер малой полуоси

$$p_0 = R + \sqrt{(x+d)^2 + y^2 + z^2} = R + \sqrt{R^2 + 2dx + d^2}, \quad (2)$$

для приемной антенны 1:

$$p_1 = R + \sqrt{x^2 + (y+d)^2 + z^2} = R + \sqrt{R^2 + 2dy + d^2}, \quad (3)$$

для приемной антенны 2:

$$p_2 = R + \sqrt{(x-d)^2 + y^2 + z^2} = R + \sqrt{R^2 - 2dx + d^2}, \quad (4)$$

для приемной антенны 3:

$$p_3 = R + \sqrt{x^2 + (y-d)^2 + z^2} = R + \sqrt{R^2 - 2dy + d^2}, \quad (5)$$

где R – расстояние от передатчика до цели.

Измеренной сумме дальностей в пространстве при фиксированном расстоянии d между передатчиком и приемником будет соответствовать множество точек, лежащих на поверхности эллипсоида вращения (или сфероида). В фокусах сфероида расположены передатчик и приемник. Такая система называется суммарно-дальномерной [4]. Оптический путь: передатчик-объект-приемник для данной поверхности положения всегда будет постоянным. На рис. 1 поверхность положения цели изображена пунктир-

Вычитание уравнений (4, 6) и (5, 7) дает координаты x и y соответственно. Дальность до цели R вычисляется посредством сложения уравнений (4–7)

$$x = \frac{p_0 - p_2}{2d} \frac{p_0 p_2}{p_0 + p_2}, \quad (6)$$

$$y = \frac{p_1 - p_3}{2d} \frac{p_1 p_3}{p_1 + p_3}, \quad (7)$$

$$R = \frac{\sum p_n^2 - 4d^2}{2\sum p_n}. \quad (8)$$

Координату z можно представить, как:

$$z = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}. \quad (9)$$

В результате будут найдены три координаты положения объекта в пространстве относительно приемника, в прямоугольной системе координат. В дальнейшем, если это необходимо, эту систему координат можно преобразовать в другие системы координат.

Соотношения (6–9) показывают, что точность вычисления координат цели главным образом зависит от точности размещения приемных позиций (величина d) и от точности измерения времени прихода, отраженного целью зондирующего импульса на приемные позиции (величина p). Первая составляющая является систематической погрешностью и может минимизироваться путем калибровки. Вторая составляющая носит случайный характер и интересна как предмет исследования.

При измерении временных интервалов на нескольких приемных позициях требуется их взаимная синхронизация. Увеличить точность синхронизации можно, если оцифровывать сигналы с приемных позиций одним многоканальным АЦП. Например, можно использовать цифровой четырехканальный осциллограф реального времени с джиттером пикосекундного уровня.

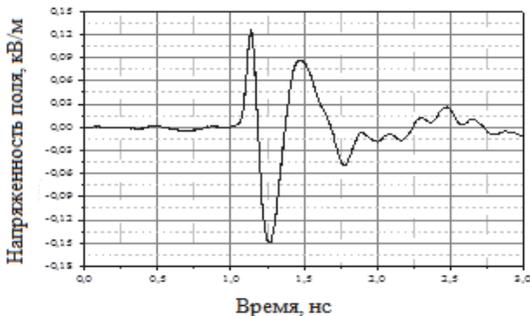


Рис. 2. Осциллограмма зондирующего импульса

Технические решения и алгоритм построения траекторий целей

Экспериментальный стенд представляет собой систему из передающего и приемного модуля. Передающий модуль собран на базе генератора импульсов PPG-1,5/100, имеющего амплитуду выходного сигнала примерно 1,5 кВ с длительностью фронта 70 пс [5]. В качестве излучающего элемента к генератору импульсов подключалась антенна П6-23А, с линейной поляризацией и диапазоном рабочих частот от 1,0 до 12,0 ГГц [6].

На рис. 2 и рис. 3 представлены осциллограмма и амплитудный спектр зондирующего импульса. На рис. 4 представлена фотография экспериментального стенда во время испытаний.

Приемный модуль включает четыре приемных тракта и многоканальный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). В качестве приемного тракта использовалась антенна DRH-370 с диапазоном рабочих частот от 0,37 до 6,0 ГГц [0]. Расположение приемных антенн вокруг передающей имеет форму «квадрата» с диагональю 1,8 метра. Такой размер базы определялся длиной радиочастотного тракта, применяемого при регистрации отраженного от объекта сигнала. Эта длина составляла порядка 3,5 метра, что позволило передавать электромагнитный сигнал с характерным временем нарастания 70 пс без искажений [8]. В качестве АЦП использовался цифровой многоканальный осциллограф с полосой пропускания 6 ГГц, частотой дискретизации 25 Гвыб/с и межканальным джиттером 1,2 пс.

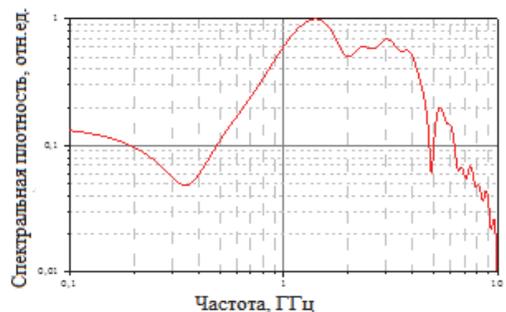


Рис. 3. Спектр зондирующего импульса



Рис. 4. Экспериментальный стенд

На первом этапе для повышения соотношения сигнал-шум и исключения внешних влияющих фоновых факторов эксперименты по получению локационной информации проходили в безэховой камере. Объект располагался на расстоянии 15 метров от передающей позиции. Осциллограф помещался в экранированный бокс для обеспечения электромагнитной совместимости. Оцифрованные сигналы считывались на удаленную рабочую станцию по высокоскоростной оптоволоконной линии связи (ВОЛС). Для передачи и обработки данных было разработано специализированное программное обеспечение (ПО). Запуск осциллографа осуществлялся по сигналу передатчика с использованием штыревой антенны. Передатчик генерировал зондирующие импульсы с частотой следования 5 Гц. Оцифрованная осциллографом локационная информация поступала на рабочую станцию для обработки.

Таким образом, в результате применения вышеперечисленных технических решений был собран экспериментальный стенд, обладающий следующими параметрами:

- четыре приемных канала с шириной полосы пропускания 6 ГГц;
- межканальный джиттер не превышает 1,2 пс;
- зондирующее пространство сигнал представляет собой электромагнитный импульс длительностью фронта 70 пс и частотой следования 5 Гц;
- регистрация локационной информации ведется в режиме единичного замера.

Описание программного обеспечения и алгоритма обработки входящего сигнала

Согласно принятой классификации [0] по структуре преобразования локационной информации разработанное устройство представляет собой приемник прямого усиления, в котором сигнал с выхода приемной антенны и усиления непосредственно попадает в АЦП без каких-либо промежуточных аналоговых преобразований. Поэтому задачи шумоподавления и фильтрации решаются путем цифровой обработки сигнала, для чего в программном пакете MATLAB [0] было разработано специализированное ПО с таким функционалом:

- взаимодействие с осциллографом (считывание настроек развертки и оцифрованных данных);
- обработка локационной информации (вычитание фона, фильтрация, определение величины измеряемого параметра и вычисление координат).

Экспериментальный стенд работает следующим образом: передающий модуль непрерывно излучает зондирующий сигнал, запуск осциллографа осуществляется при каждом срабатывании передатчика. Длина развертки осциллографа, и величина задержки запуска подбираются таким образом, чтобы в регистрируемое окно не попадало прямое излучение передатчика. При активации программа связывается с осциллографом, запрашивает и считывает настройки

его развертки. Затем запускается цикл, в котором программа обращается к памяти осциллографа и считывает хранящиеся там, в текущий момент оцифрованные данные в виде отсчетов АЦП. Далее по определенному алгоритму восстанавливаются и измеряются времена прихода сигналов на каждую из приемных антенн относительно момента срабатывания передатчика. По полученным результатам измерения величины задержки p между моментами излучения зондирующего импульса передатчиком и прихода, отраженного целью зондирующего импульса в приемник, вычисляются координаты цели, и цикл переходит к следующей итерации.

Локационная информация представляет собой смесь полезного сигнала, отражений от местных предметов, эфирных сигналов и шумов элементов приемника. Поэтому была разработана поэтапная процедура фильтрации и шумоподавления. На первом этапе осуществлялась фильтрация отражений от местных предметов, для чего при облучении заданного сектора пространства передатчиком каждой приемной позицией регистрировалась фоновая обстановка (объект отсутствует). Затем в этом секторе размещался объект, и проводилась регистрация локационных данных, проводилось математическое вычитание фона из сигнала, содержащего отклик от цели. После процедуры вычитания осуществлялись процессы фильтрации узкополосных эфирных помех и шумоподавления.

Постановка экспериментов и полученные результаты

Наиболее удобным объектом для проведения локационных экспериментов является мультироторный БПЛА – квадрокоптер, так как он может двигаться по заданной траектории и фиксироваться в требуемой точке. Отладка экспериментального стенда проводилась в безэховой камере с использованием шара в состоянии покоя в качестве элементарной цели, так как полеты в условиях замкнутого пространства не безопасны. Шар имел диаметр 0,2 м и был покрыт металлизированной фольгой.

На рис. 5 темными точками изображены координаты шара, находящегося в момент регистрации в состоянии покоя.

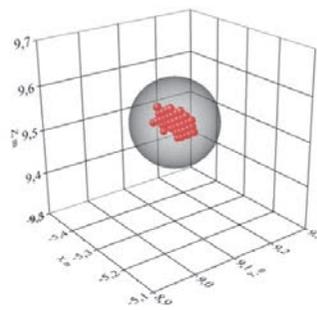


Рис. 5. Координаты покоящейся элементарной цели – шар

Геометрические размеры шара соответствуют координатной сетке.

Регистрация величины задержек p (времени прихода сигналов на каждую из четырех приемных антенн относительно момента срабатывания передатчика) проводилась четырьмя приемными каналами осциллографа: 1Ch – 4Ch. Результаты измерений приведены на рис. 6.

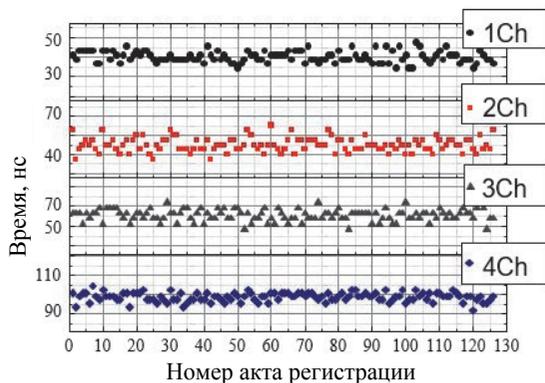


Рис. 6. Результат измерения временных задержек по четырем приемным каналам 1Ch – 4Ch

Затем шар был закреплен на поворотной штанге длиной 0,5 м, подключенной к шаговому двигателю, который обеспечивал движение цели с заданной угловой скоростью (примерно 60 град/сек). Вращение происходило только в горизонтальной плоскости.

Результаты измерения координат объекта (шара) в состоянии вращения по осям X , Y , Z относительно передатчика и расстояния от передатчика до объекта в состоянии покоя R представлены на рис. 7.

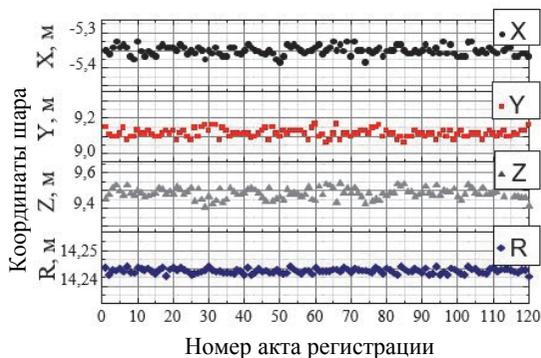


Рис. 7. Результат измерения координат шара (объекта) по осям X , Y , Z и расстояния от передатчика до объекта R

Траектория вращающегося на поворотной штанге шара, полученная из локационных данных, представлена на рис. 8.

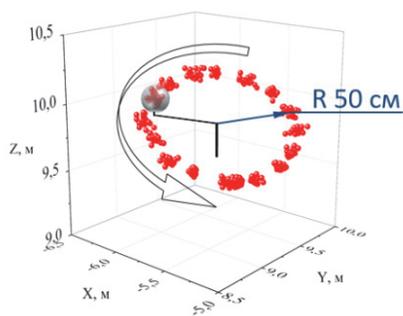


Рис. 8. Координаты движущейся элементарной цели – шара

Точками отображены координаты местоположения шара в момент его вращения на поворотной штанге. Суммарное количество точек, представленных на рис. 8, составляет 500 штук. Разброс координат объекта составляет 15 см, что заведомо меньше геометрических размеров цели. В предположении нормального распределения координаты положения объекта, оценка его среднеквадратичного отклонения (СКО) составляет $\sigma_x \approx \sigma_y \approx \sigma_z \approx 2,5$ см.

После экспериментов в лабораторном безэховом помещении были проведены эксперименты по определению координат БПЛА с габаритами $0,4 \times 0,6 \times 0,7$ м в открытом пространстве. Измерения проводились на расстояниях до 35 метров от стенда (расстояние определялось с помощью GPS-трекера БПЛА). На рис. 9 точками в центре представлены координаты объекта в состоянии стационарного зависания (начало координат установлено произвольно). Приведены результаты 60 актов регистрации, полученные последовательно в одной серии. Как видно из рис. 9, полученные точки находятся в пределах центральной части корпуса квадрокоптера. Как и в экспериментах с шаром, разброс точек, определяющих положение квадрокоптера в пространстве, не превышает 15 см. Таким образом, оценка параметра СКО равна 2,5 см.

Представленный результат показывает, что экспериментальный стенд обеспечивает возможность обнаружения неподвижной цели.

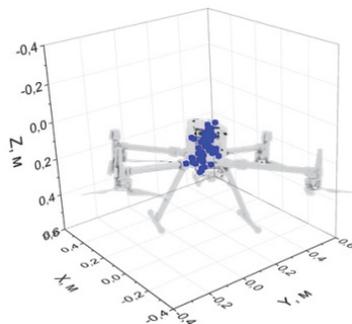


Рис. 9. Координаты квадрокоптера в условиях стационарного зависания в открытом пространстве

Далее проводился эксперимент по определению координат подвижной цели. На расстоянии 20 метров от экспериментального стенда БПЛА двигался по траектории, имеющей форму квадрата со стороной 6 метров. Полет осуществлялся в условиях городской застройки и при наличии узкополосных помех, таких как эфирное вещание, сотовая связь. От близлежащей железобетонной стены объект находился на расстоянии примерно 10 метров.

В результате лоцирования были зарегистрированы координаты и построена траектория движения цели, изображенная на рис. 10. Полученные координаты цели находятся в пределах корпуса квадрокоптера.

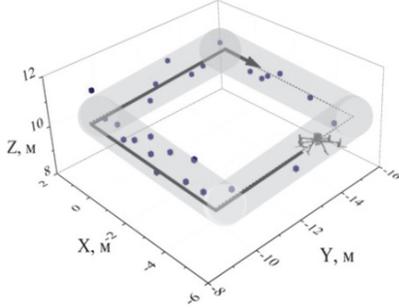


Рис. 10. Координаты БПЛА, движущегося по квадрату со стороной 6 метров

Оценку погрешности измерения дальности положения цели можно сделать из следующих простых геометрических соображений.

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad (10)$$

$$R^2 \sim 3x^2, \quad (11)$$

$$\sigma_R \approx \sigma_x \sqrt{3} \cong 4,3 \text{ см.} \quad (12)$$

Таким образом использование СКИ в качестве зондирующего сигнала позволяет заведомо выполнить требования [1] к радиолокаторам обзора летного поля по точности измерения дальности и азимута цели.

Точности измерения времени прихода отраженного сигнала зондирующего импульса на приемные позиции многоканальным АЦП определяются длительностью временной развертки, см. например [0]. Путем переноса (смещения) начала отсчета шкалы времени может быть обеспечена слабая зависимость СКО измерения временного интервала от ее величины, тем самым дальность и азимут цели будут определяться с одинаковой погрешностью независимо от расстояния до нее.

Были проведены эксперименты по демонстрации разрешающей способности стенда, моделирующего СКИ РЛС (минимальное расстояние между объектами, на котором они наблюдаются отдельно). На рис. 11 представлена постановка этих экспериментов. Два шара, первый шар, диаметром 300 мм находился на оси излучателя на расстоянии 14,5 м и шар, диаметром 450 мм, размещался правее, на расстоянии 2,5 метра от первого. Расстояние большого шара до излучателя составило 14,7 метра.

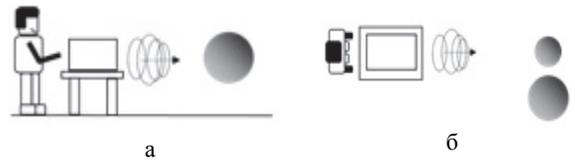


Рис. 11. Постановка экспериментов по демонстрации разрешающей способности: а – вид сбоку, б – вид сверху

Результат регистрации в этих опытах представлен на рис. 12.

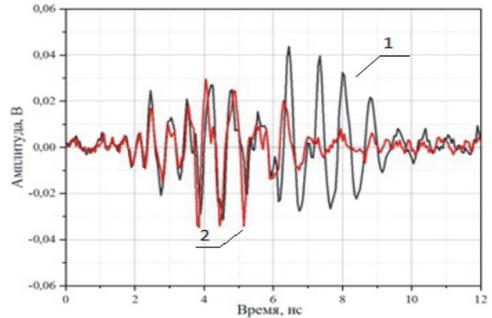


Рис. 12. Осциллограммы, полученные при исследовании разрешающей способности: 1 – форма сигнала от обоих шаров, 2 – форма сигнала отклика от одного шара (малого)

Стоит обратить внимание, что сигналы от обоих шаров различимы.

На рис. 13 представлена постановка экспериментов по обнаружению шара, диаметром 300 мм, который находится в оптической тени второго шара, диаметром 450 мм. Расстояние до передатчика составило 10 м. Расстояние между центрами шаров составило 0,6 м.

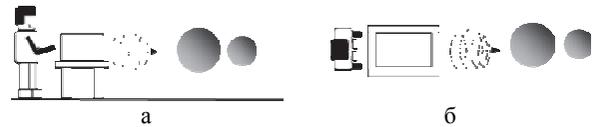


Рис. 13. Постановка экспериментов по обнаружению объекта, находящегося в оптической тени второго объекта: а – вид сбоку, б – вид сверху

На рис. 14 представлены результаты этих экспериментов, где кривая № 2 – осциллограмма одного шара, кривая № 1 – осциллограмма двух шаров, располагающихся, как показано на рис. 13.

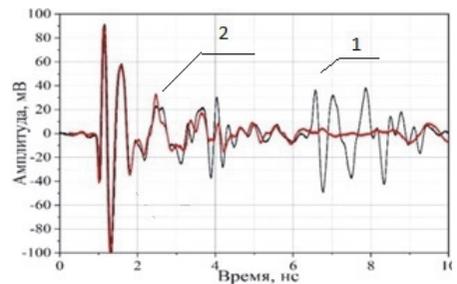


Рис. 14. Осциллограммы, полученные в экспериментах по обнаружению объекта, находящегося в оптической тени второго объекта: 1 – форма сигнала от обоих шаров, 2 – форма сигнала отклика от одного шара

Из рис. 14 видно, что использование короткого импульса позволяет разрешить два объекта даже тогда, когда один из них находится в оптической тени другого. Причем сигнал от второго шара хорошо различим.

Также в рамках данной работы были зарегистрированы отклики от трех элементарных целей: металлическая сфера диаметром 450 мм, металлическая пластина 70 мм×70 мм и металлический цилиндр 25 мм×70 мм. Спектры сигналов откликов от этих целей представлены на рис. 15.

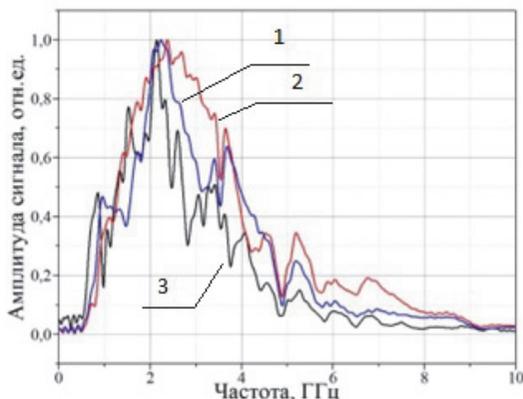


Рис. 15. Спектр откликов от различных элементарных целей: 1 – цилиндр 25 мм×70 мм, 2 – пластина 70 мм×70 мм, 3 – сфера Ø450 мм

Спектры откликов различных объектов на сверхкороткий зондирующий импульс индивидуальны, что свидетельствует о возможности использования СКИ для идентификации целей.

В рамках данной работы также был проведен расчет отклика элементарной цели (сферы) при зондировании ее СКИ. На рис. 16 полученная теоретическая кривая сравнивается с откликом на зондирующий сигнал разработанного экспериментального стенда. Видно хорошее согласие между расчетным сигналом и сигналом, полученным экспериментально. В перспективе можно рассмотреть возможность идентификации целей, недоступных для экспериментальных исследований их импульсных откликов.

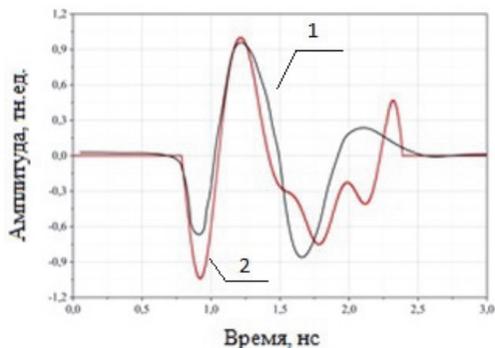


Рис. 16. Сравнение откликов сферы на зондирующий сигнал: 1 – расчетный, 2 – экспериментальный

В ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ» на основе электротехнического генератора СКИ проведено моделирование трехкоординатной многопозиционный РЛС. Разработано программное обеспечение, позволяющее оцифровывать эхо-сигнал в режиме реального времени. Основным преимуществом выбранной и реализованной схемы является возможность определять координаты объекта с сантиметровой точностью по дальности и азимуту.

Разработанный стенд демонстрирует возможность обнаруживать и контролировать траекторию движения малоразмерных объектов в условиях влияния подстилающей поверхности и узкополосных помех (эфирного вещания и сотовой связи), а также наблюдать объекты в режиме стационарного зависания; различать групповые цели, находящиеся на расстоянии несколько десятка сантиметров друг от друга.

Описанный подход демонстрирует возможность создания РЛС обзора летного поля с качественно новыми характеристиками.

Список литературы

- ГОСТ 51505-99 Система обзора летного поля и управления движением воздушных судов и транспортных средств по аэродрому, от 01.01.2001.
- Горохов А. Х., Кашпур Н. Л. Основы радиолокации и элементы РЛС. Самара: Самар. гос. ун-т, 2014. С. 247.
- Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. С. 416.
- Мельник Ю. А. и Стогов Г. В. Основы радиотехники и радиотехнические устройства. М.: Сов. радио, 1973. С. 368.
- Техн. паспорт на генератор импульсов PPG-1.5/100. ООО «Мегаимпульс», 2011.
- Антенна измерительная П6-23А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Тг 1.400.009. 1986.
- Антенна рупорная двухгребневая DRH370. Зав.№ 180603А370. Паспорт. 2018.
- Измерительный преобразователь напряженности импульсного электрического поля ИППЛИ-Л №31. Паспорт. ООО «ПО Нижтехпроект» 2006.
- Макаренко А. А., Плотников М. Ю. Устройства приема и преобразования сигналов. С-Пб: СПб-НИУ ИТМО, 2019. С. 112.
- <http://mathworks.com>.
- Цифровой запоминающий осциллограф. Руководство по эксплуатации. Tektronix 071-2604-00.