

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.5>

УДК.621.396.96

СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДОСТУПНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ КООПЕРИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА ПОДСВЕТА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

И. С. Ашурков, И. Н. Захаров, С. А. Житков, Н. А. Лешко, А. Н. Цыбульник

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны
150001, Ярославль, Московский проспект, 28

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2020 г.

Аннотация. В статье рассматривается способ обнаружения аэродинамических целей в наземно-космической многопозиционной радиолокационной системе в условиях низкой энергетической доступности принимаемых сигналов с кооперируемым источником подсвета космического базирования. Работа способа основана на использовании параметрического анализа выборки отметок и технологии «сопровождение до обнаружения». Основные результаты данной работы были обсуждены на научно-технической конференции «VII Репинские чтения» в ПАО «Мак «Вымпел».

Ключевые слова: обнаружение траектории, параметрическое преобразование, источник подсвета космического базирования, отношение сигнал-шум, аэродинамическая цель.

Abstract. The article discusses a method for detecting aerodynamic targets in a ground-space multi-position radar system in conditions of low energy availability of received signals with a cooperative space-based illumination source. The operation of the method is based on the use of parametric analysis of a sample of marks and the "tracking until detection" technology. The main results of this work were discussed at the scientific and technical conference "VII Repin Readings" in Interstate Joint Stock Corporation "Vympel".

Keywords: trajectory detection, parametric transformation, space-based illumination source, signal-to-noise ratio, aerodynamic target.

В настоящее время актуальной является задача предупреждения о начале глобального удара с использованием стратегических крылатых ракет в неядерном исполнении. Для ее решения могут создаваться обширные зоны радиолокационного подсвета у поверхности Земли, например, за счет выноса передающего устройства в космическое пространство на геостационарную орбиту. В свою очередь это обуславливает низкое значение отношения сигнал-шум на выходе приемного устройства, расположенного у поверхности Земли.

Разработанный в [2, 3] научно-методический аппарат позволяет решить задачу обнаружения аэродинамической цели, движущейся по прямолинейной траектории на интервале накопления отраженного сигнала при низких значениях отношения сигнал-шум. Однако часто форма траектории отличается от прямолинейной. В настоящее время задача обнаружения криволинейной траектории не решена. Следует отметить, что любая криволинейная траектория крылатой ракеты может быть представлена совокупностью отрезков прямых и дуг окружностей [4].

Целью работы является разработка способа обнаружения аэродинамических целей в виде дуг окружностей с неизвестным радиусом с использованием параметрического преобразования Радона в условиях низких значений отношения сигнал-шум.

Структурная схема разработки способа представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Структурная схема разработки способа обнаружения аэродинамических целей в наземно-космической многопозиционной радиолокационной системе на основе параметрического анализа выборки отметок.

Обнаружение целей предлагаемым способом включает несколько этапов. На первом этапе определяются исходные данные в виде пространственной структуры наземно-космической многопозиционной радиолокационной системы обнаружения аэродинамических целей (НК МП РЛСО АЦ). На втором – производится обоснование низкой энергетической доступности принимаемых сигналов, оценивание границ и энергетических показателей зоны радиолокационного подсвета, создаваемого КИП космического базирования. На третьем – обоснован переход к решению задачи обнаружения цели на уровне траектории, связанный с необходимостью увеличения времени накопления для увеличения энергии сигнала. На четвертом – разработаны правила многопозиционного формирования выборки фиксированного объема, состоящей из совокупности истинных и ложных отметок, и её последующего анализа, позволяющего выделить элементы, идентичные в пространстве траекторных параметров, для восстановления функциональной зависимости, определяющей траекторию цели. На пятом – реализовано оптимальное решение задачи регрессии с восстановлением функциональной зависимости, определяющей траекторию цели; установлены правила внутрисекторного накопления радиолокационных сигналов и определена связь между размерами декартового и параметрического пространства; реализован математический аппарат фильтрации отметок на восстановленной траектории. На шестом – предложен математический аппарат оптимизации совместного обнаружения цели и её траектории и выбор критерия принятия решения, основанного на максимизации вероятности правильного обнаружения траектории в пункте совместной обработки при установленных ограничениях. На седьмом – проведение проверки работоспособности способа обнаружения целей (проведение эксперимента).

Способ основан на использовании технологии TBD (Track Before Detect) - «сопровождение до обнаружения» [3], когда решение об обнаружении цели принимается сразу на уровне траектории после анализа полученной за несколько обзоров совокупности истинных и ложных отметок. Исходя

из проведенного анализа существующих помехоустойчивых методов, применяемых для цифровой обработки изображений и основанных на использовании параметрических преобразований, сделан вывод о возможности применения преобразования Радона для обнаружения траектории аэродинамической цели в виде дуги окружности с неизвестным радиусом, и разработана в составе способа модель процесса обнаружения траекторий, структурная схема которой представлена на рисунке 2.

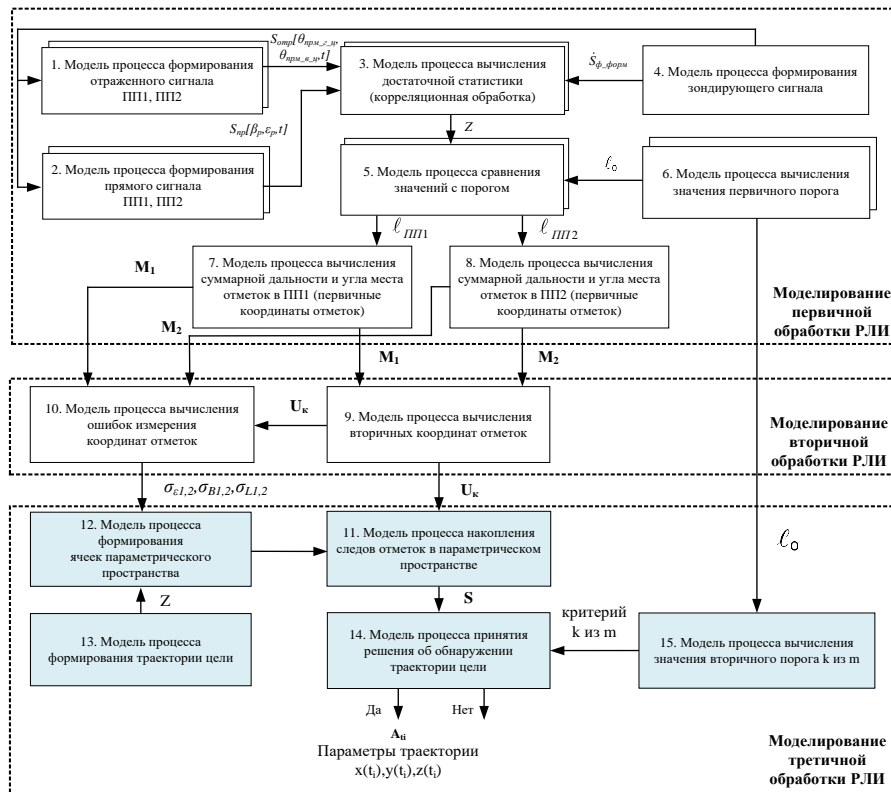


Рис. 2. Структурная схема модели процесса обнаружения траекторий маневрирующих аэродинамических целей в НК МП РЛСО АЦ.

Модель включает в себя процессы первичной, вторичной и третичной обработки радиолокационной информации.

Первичная обработка является низкопороговой и предназначена для обнаружения слабого полезного сигнала в принятой реализации. Причем в виду низкой энергетической доступности сигналов первичные пороги обнаружения должны быть низкими, для того чтобы обеспечить высокую вероятность правильного обнаружения истинных отметок от цели. Однако

при этом резко возрастает количество ложных отметок [1]. Значения первичных порогов определяются в соответствии с критерием Неймана-Пирсона.

Для каждой отметки, превысившей порог первичного обнаружения, определяются первичные координаты – суммарная дальность, и угол места. Результатом является набор истинных и ложных фрагментов поверхностей положения, попадающих в диаграмму направленности приемной антенны, совокупность которых составляет результирующий замер пункта получения радиолокационной информации. После выполнения корреляционной обработки рассчитывается первичный порог обнаружения, который имеет низкое значение, что обуславливает высокую вероятность ложной тревоги. Далее вычисляется отношение правдоподобия.

В процессе вторичной обработки, с использованием эллипсо-угломерного метода измерения координат, определяются вторичные координаты отметок, которые запоминаются, а процедура формирования выборки повторяется в течение времени накопления.

Полученный массив значений вторичных координат, накопленный за время обзора, представляет собой выборку отметок, которая подлежит анализу в пространстве траекторных параметров.

В ходе третичной обработки осуществляется процесс перехода в пространство параметров, формирование ячеек параметрического пространства, заполнение их параметрическими линиями и поиска наиболее заполненной ячейки. Для этой ячейки выполняется переход из пространства параметров в пространство измерений (координат). Рассмотрим выполнение этих операций подробнее.

Параметрическим пространством для окружности является трехмерный массив, который имеет размеры, $x \times y \times R$, (x и y координаты центра окружности, R ее радиус).

Идея использования параметрического преобразования основана на том, что если из отметок, расположенных на траектории в виде дуги окружности радиусом R провести окружности такого же радиуса, то они пересекутся в

точке, являющейся центром траектории в виде окружности (дуги окружности) - рисунок 3.

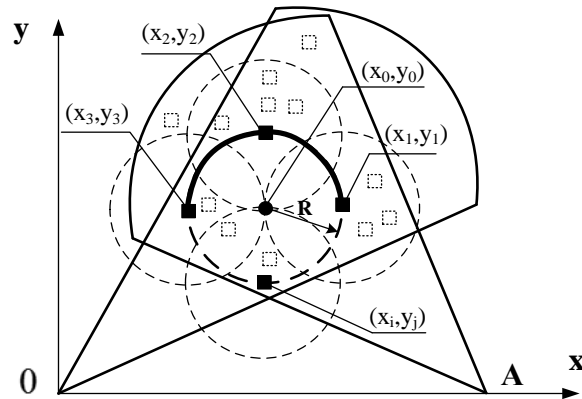


Рис. 3. Определение искомой окружности (дуги).

В параметрическом пространстве каждой истинной и ложной отметке соответствует коническая поверхность, которую называют следом отметки в пространстве параметров, уравнение которой имеет вид:

$$Q_{i-T} = \frac{(x - x_{0-i})^2}{a^2} + \frac{(y - y_{0-i})^2}{b^2} - \frac{R^2}{R_{\max-i}^2}, \quad (1)$$

где i – номер отметки, a, b, c – положительные параметры, характеризующие конус ($a = b$).

Массив данных в параметрическом пространстве будет иметь вид (рисунок 4):

$$\mathbf{S} = (Q_{1-T} \quad Q_{2-T} \dots Q_{i-T})^T, \quad (2)$$

На рисунке 5 представлены проекции следов истинных и ложных отметок на плоскости в параметрическом пространстве.

Восстановление реальных параметров окружности основывается на поиске точки с максимальным числом пересечений конических поверхностей в пространстве параметров. Для этого параметрическое пространство дискретизируется и производится поиск ячейки, через которую проходит наибольшее количество следов отметок. Координаты этой ячейки будут определять координаты центра и радиуса окружности, на которой находится искомая траектория.

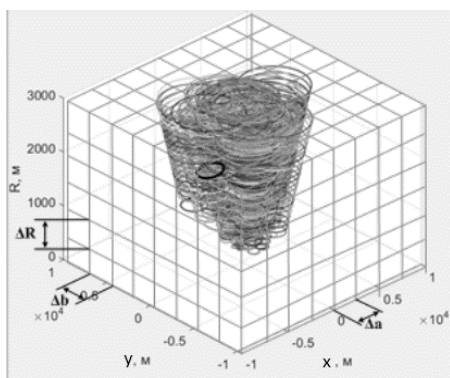


Рис.4. Параметрическое пространство для поиска цели, движущейся по дуге окружности.

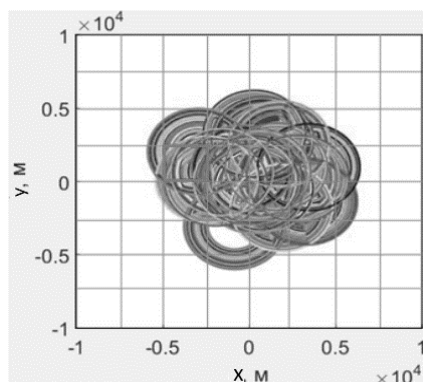


Рис. 5. Проекция следов истинных и ложных отметок на плоскости в параметрическом пространстве.

Формирование ячеек параметрического пространства связано с определением его границ и размеров ячеек. С учетом того, что ошибки измерения координат статистически независимы и распределены по нормальному закону с нулевыми математическими ожиданиями и значениями дисперсий σ_a^2, σ_b^2 , размеры ячеек принято определять, используя правило «трех сигм» $\Delta x = 6\sigma_a, \Delta y = 6\sigma_b$ [4].

Для оптимизации решения об обнаружении цели применяется правило h из v , где h – количество требуемых отметок для построения траектории, v – общее число отметок. Полученные отметки в пространстве параметров будут соответствовать траекторным параметрам, которые необходимы для восстановления искомой траектории цели за время обзора.

В случае принятия решения об обнаружении цели выполняется обратный переход из пространства параметров в декартову систему координат и восстановление окружности, которой принадлежит траектория цели.

Фильтрация ложных отметок осуществляется путем их группировки по времени и с учетом скорости движения цели $V_{\min} \leq V_{ij} \leq V_{\max}$. Расстояния между отметками ячеек не должны превышать максимально допустимого значения $\Delta S_{\max} = V_{\max} t$ и быть не менее $\Delta S_{\min} = V_{\min} t$.

Далее соединяются все отметки, лежащие на полученной окружности, исходя из наименьшего временного интервала между ними, и производится выделение искомой дуги, представляющей собой траекторию цели (рисунок б).

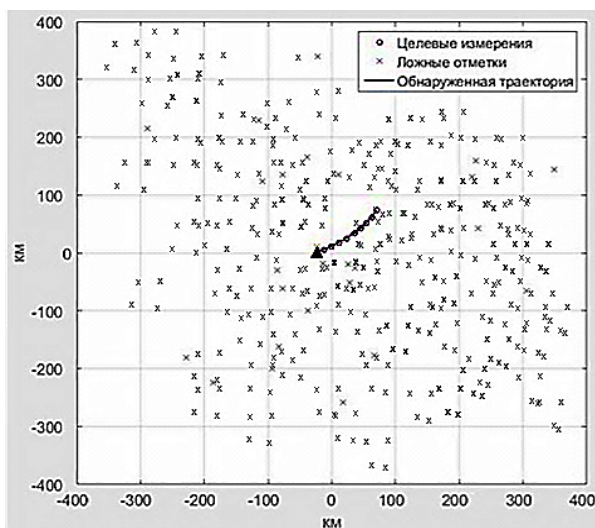


Рис. 6. Искомая траектория аэродинамической цели в виде дуги окружности.

Доказана работоспособность предложенного способа путем проведения математического моделирования. Результаты показали адекватность предложенного научно-методического аппарата для решения задачи обнаружения траектории цели в виде дуги окружности.

Дальнейшим направлением исследования является экспериментальное подтверждение результатов.

Таким образом, в ходе выполнения исследований получены следующие результаты:

1. Разработан способ обнаружения целей в виде дуг окружностей с неизвестным радиусом.
2. Подтверждена работоспособность предложенного способа в условиях низких значений отношения сигнал – шум.

Литература

1. Лешко Н.А., Сахно И.В., Шалдаев С.Е. Пространственно-временная обработка сигналов в наземно-космической многопозиционной радиолокационной системе // Сб. науч. тр. ВНИК «Проблемы создания и применения малых космических аппаратов и робототехнических комплексов в интересах вооруженных сил Российской Федерации». Т.1, Спб: ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2016. – С. 144-157.

2. Монаков А.А. Обнаружитель движущейся цели для радиолокационного приемника на основе алгоритма Хафа // Сб. докладов Междунар.научно-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь». 2014.С. 1584-1594.

3. Carlson B.D., Evans E.D., and Wilson S.L. Search radar detection and track with the Hough transform, Part I: System concept. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1994. Vol.30. P.102-108.

4. Выгодский М.Я. Справочник по математике / М.Я.Выгодский: – М.: АСТ: Издательство Астрель, 2011г.. – 1055, с.: ил.

Для цитирования:

Ашурков И.С., Захаров И.Н., Житков С.А., Лешко Н.А., Цыбульник А.Н. Способ обнаружения аэродинамических целей в условиях низкой энергетической доступности радиолокационных сигналов кооперируемого источника подсвета космического базирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.9.5>