

Методика обнаружения аэродинамической цели, движущейся по прямолинейной траектории в пространстве

Житков С.А.*, **Ашурков И.С.****, **Захаров И.Н.*****,

Лешко Н.А.****, **Цыбульник А.Н.*******

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

**e-mail: Gitkov.s@mail.ru*

***e-mail: ivan_ashurkov1@mail.ru*

****e-mail: Zaharov1985@mail.ru*

*****e-mail: nikolai_zru@mail.ru*

******e-mail: tsan1956@mail.ru*

Статья поступила 07.10.2019

Аннотация

В статье приведена методика обнаружения прямолинейной траектории аэродинамической цели. Раскрыты вопросы по оптимизации процесса обнаружения траектории цели в пространстве с применением блочного метода Хафа. Приведены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: наземно-космическая многопозиционная радиолокационная система обнаружения аэродинамических целей, траектория, преобразование Хафа.

Опыт локальных войн и вооруженных конфликтов показывает, что первоочередной задачей эвентуального противника в ходе ведения боевых действий

будет являться подавление средств информационного обеспечения воздушно-космической обороны путем огневого поражения и помехового воздействия.

Применение в структуре информационных средств воздушно-космической обороны наземно-космической многопозиционной радиолокационной системы обнаружения аэродинамических целей (НК МП РЛСО АЦ) (рис.1), позволяет обнаруживать и измерять координаты маловысотных целей (например, крылатых ракет) в условиях воздействия помех [1–8].

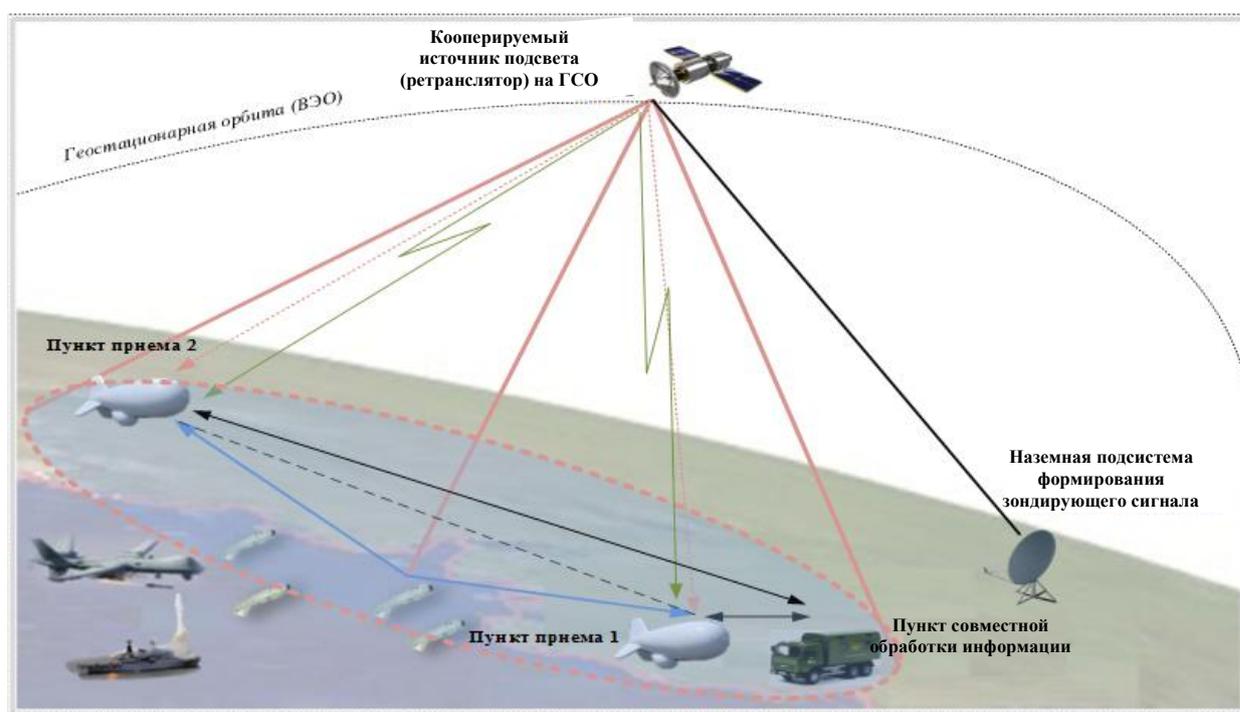


Рисунок 1 – Наземно-космическая многопозиционная система обнаружения аэродинамических целей

В состав системы входят: наземная подсистема, формирующая зондирующие сигналы, излучаемые в направлении спутника ретранслятора, расположенного на геостационарной орбите, усиливающего принятый сигнал и переизлучающего в сторону поверхности земли, два приемных пункта и пункт совместной обработки информации. Сигналы спутника, отраженные от целей, находящихся в зоне

подсвета, поступают на входы приемных пунктов. В связи с удаленностью спутника ретранслятора заданное отношение сигнал-шум обеспечивается длительным накоплением. Поэтому процесс обнаружения траектории может основываться на использовании технологии *TBD* (*Track Before Detect*) – «сопровождение до обнаружения» [9, 10], где решение об обнаружении цели принимается сразу на уровне траектории после анализа выборки истинных и ложных отметок от цели, полученной за несколько циклов обзора.

Разработанный в трудах [9–13] научно-методический аппарат основан на использовании параметрического преобразования Хафа и позволяет решать задачу обнаружения аэродинамической цели, движущейся по прямолинейной траектории на плоскости. Решение задачи обнаружения траектории в пространстве ранее не рассматривалось.

Целью статьи является разработка методики обнаружения прямолинейной траектории аэродинамической цели в пространстве с применением преобразования Хафа.

Для реализации методики приняты следующие ограничения.

1. Приемные пункты наземно-космической многопозиционной радиолокационной системы осуществляют обнаружение целей путем приема отраженных сигналов в зоне подсвета.

2. В каждом из приемных пунктов измеряется угол места ε и суммарная дальность L , ошибки оценивания которых статистически независимы, распределены по нормальному закону с дисперсиями $\sigma_L^2, \sigma_\varepsilon^2$.

3. Цель движется прямолинейно за время цикла обзора.
4. В качестве зондирующего сигнала используется пачка когерентных радиоимпульсов.
5. Обработка сигналов в каждой из позиций осуществляется за время когерентного накопления определяемого временем интервала корреляции.
6. Сигнал от цели принимается на фоне белого гауссовского шума приемника и после накопления средняя мощность шума априорно известна и равна P_n .
7. Отношение сигнал-шум, $q^2 = \frac{P_c}{P_n}$ мало ($q^2 \leq 8$ дБ), где P_c – мощность отраженного сигнала.

Структура методики представлена на рисунке 2.

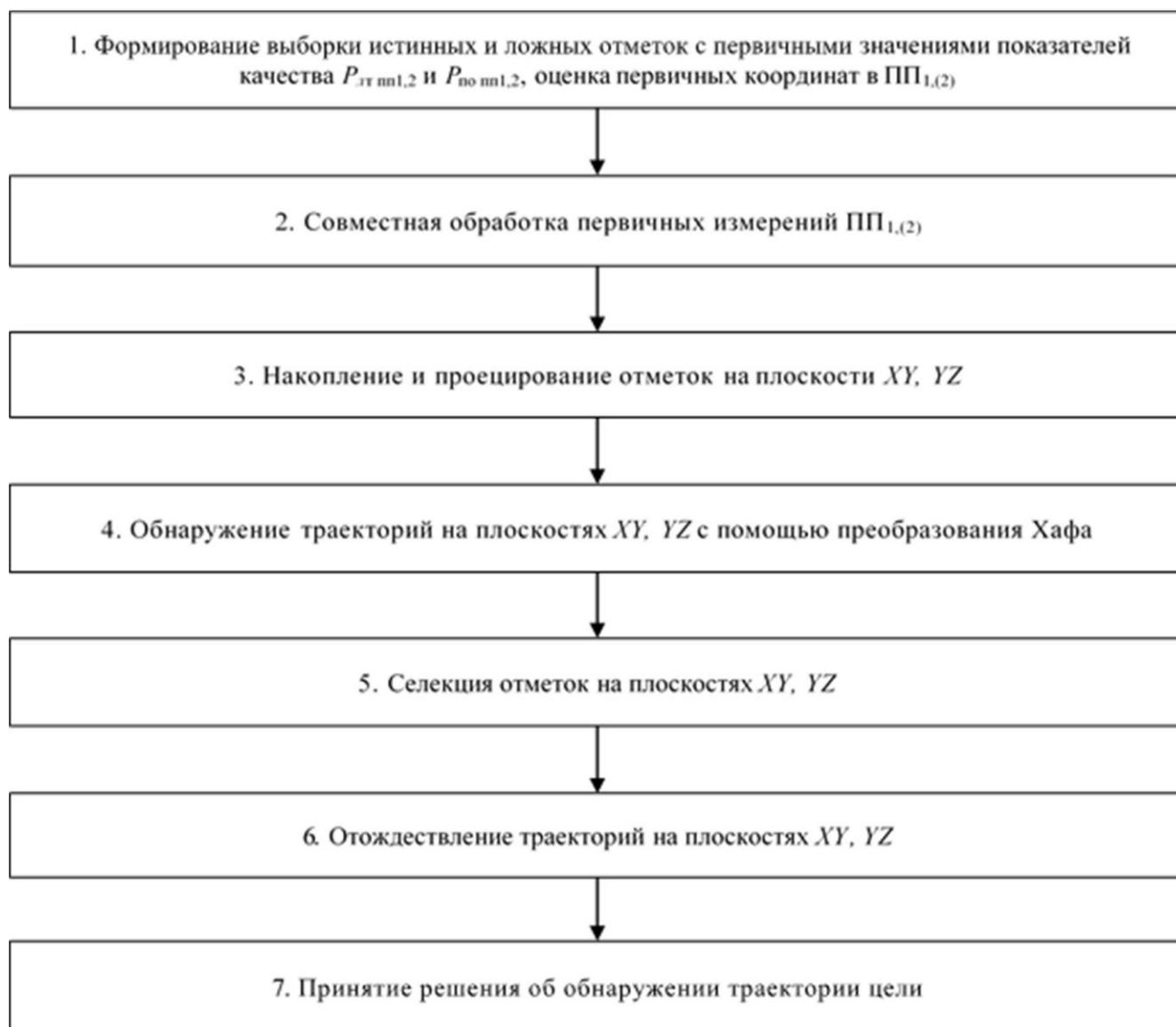


Рисунок 2 – Структурная схема методики обнаружения траектории аэродинамической цели, движущейся прямолинейно в пространстве
Этап 1. Формирование совокупности истинных и ложных отметок с первичными значениями показателей качества $P_{лт\text{ пп}1,(2)}$ и $P_{по\text{ пп}1,(2)}$, оценка первичных координат в пунктах приема 1 и 2.

В каждом из приемных пунктов решается задача обнаружения цели. В виду низкой энергетической доступности сигналов первичные пороги обнаружения должны быть низкими, для того чтобы обеспечить высокую вероятность правильного обнаружения истинных отметок от цели. Это неизбежно влечет к увеличению ложной тревоги. Так как для вычисления вторичных координат

требуются данные с обеих позиций, объединение первичных координат осуществляется по «жесткому» правилу по критерию « n из n » [14–16]. В этом случае вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги одной отметки в системе определяются по следующим выражениям:

$$P_{лт_с} = P_{лт_1} \cdot P_{лт_2}, \quad (1)$$

где $P_{лт_1,(2)}$ – первичная вероятность ложной тревоги в первом (втором) пункте, $P_{лт_с}$ – первичная вероятность ложной тревоги системы,

$$P_{по_с} = P_{по_пп1} \cdot P_{по_пп2}, \quad (2)$$

где $P_{по_пп1(2)}$ – первичная вероятность правильного обнаружения в первом (втором) пункте, $P_{по_с}$ – первичная вероятность правильного обнаружения в системе [14].

Значения первичных порогов, определяемых в соответствии с критерием Неймана-Пирсона вероятностью ложной тревоги, имеют вид:

$$U_{п_0} = -P_{п} \ln P_{лт_1(2)}, \quad (3)$$

где $P_{п}$ – мощность шумов [15].

Приемные пункты 1 и 2 принимают отраженные сигналы и на их основе формируют оценки первичных измерений: суммарную дальность L и угол места ε [17–20]. Далее оценки поступают на пункт совместной обработки НК МП РЛСО АЦ.

Для каждой отметки, превысившей порог первичного обнаружения в цикле обзора, определяются первичные координаты, представляемые в виде массивов

Наклонная дальность R и азимут β определяются по следующим выражениям:

$$R = \frac{Z_{\text{пп}_2} - \cos \varepsilon_2 (L_2 + B_{1_2} - L_1 - B_1)}{\cos \varepsilon_2}, \quad (5)$$

$$\beta = 180^\circ - \beta_1,$$

$$\beta = 180^\circ - \arccos \left[\frac{\left(\frac{Z_{\text{пп}_2} - \cos \varepsilon_2 (L_2 + B_{1_2} - L_1 - B_1)}{\cos \varepsilon_2} \right)^2 + X_{\text{пп}_2}^2 - (Z_{\text{пп}_2} \text{tg} \varepsilon_2)^2}{2 \left(\frac{Z_{\text{пп}_2} - \cos \varepsilon_2 (L_2 + B_{1_2} - L_1 - B_1)}{\cos \varepsilon_2} \right) X_{\text{пп}_2}} \right], \quad (6)$$

где ε_2 – угол места цели, измеренный в приемном пункте 2, L_1, L_2 – суммарная дальность до цели, B_1, B_{1_2} – база между спутником ретранслятором и приемными пунктами 1, 2, $Z_{\text{пп}_2}, X_{\text{пп}_2}$ – координаты приемного пункта 2.

Далее осуществляется переход от сферической системы координат к прямоугольной для всей совокупности истинных и ложных отметок по формулам [21–23]:

$$x_{\text{ц}} = -R \cos \beta \cos \varepsilon_1, \quad (7)$$

$$y_{\text{ц}} = R \sin \beta \cos \varepsilon_1, \quad (8)$$

$$z_{\text{ц}} = R \sin \varepsilon_1. \quad (9)$$

В результате формируется матрица координат отметок:

$$\begin{bmatrix} x_{k1} & \cdots & x_{kn} \\ y_{k1} & \cdots & y_{kn} \\ z_{k1} & \cdots & y_{kn} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

в единой для НК МП РЛСО АЦ системе координат.

Этап 3. Накопление и проецирование отметок на плоскости XY , YZ .

На данном этапе происходит сохранение координат всех отметок, полученных в циклах обзора в течение всего периода. В результате формируется массив

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{k1} & \cdots & x_{kn} \\ y_{k1} & \cdots & y_{kn} \\ z_{k1} & \cdots & z_{kn} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

который (11) далее разделяют на два массива координат плоскости XY и YZ соответственно.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{k1} & \cdots & x_{kn} \\ y_{k1} & \cdots & y_{kn} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{k1} & \cdots & y_{kn} \\ z_{k1} & \cdots & z_{kn} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Этап 4. Обнаружение прямых на плоскостях XY , YZ с применением преобразования Хафа.

При проведении параметрических преобразований, устанавливается наличие функциональной зависимости между элементами массивов (12) (рис. 4) [10–12]. В случае, если отметки от цели принадлежат одной прямой, параметрические кривые $\rho(\theta)$ пересекутся в точке с координатами ρ' , θ' , которые соответствуют параметрам этой прямой.

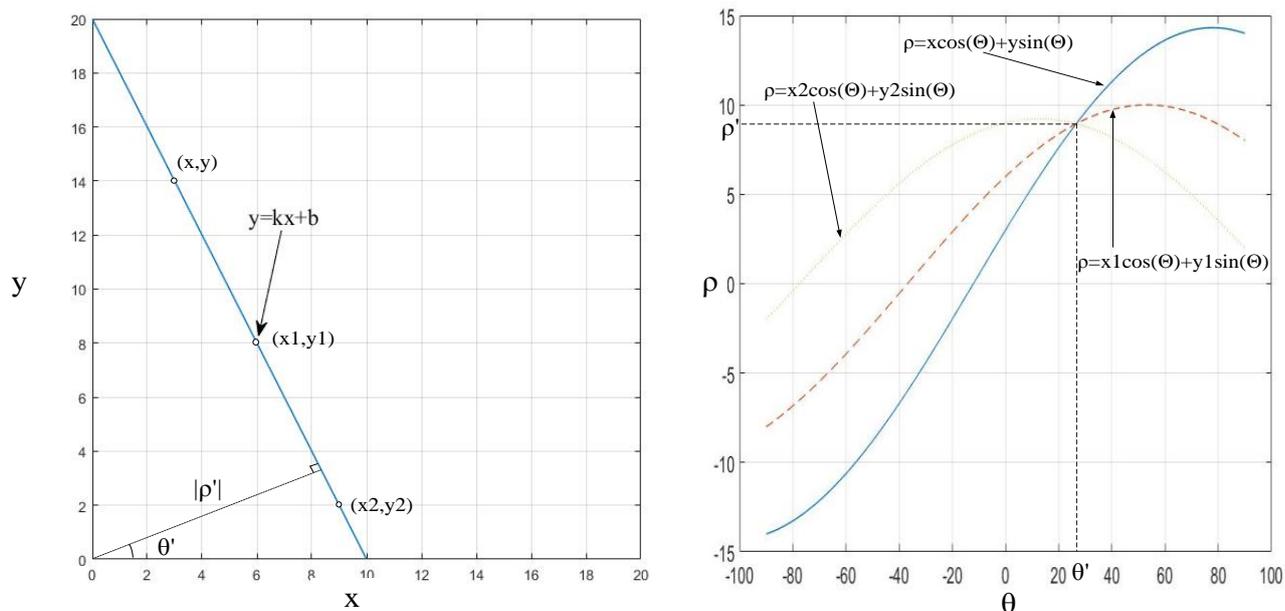


Рисунок 4 – Отображение отметок, представленных в декартовой системе координат параметрическими кривыми в пространстве параметров

Связь между пространствами координат и параметров выражается зависимостями, которые называют следами отметок [10, 11]:

$$\rho(\theta)_{xy} = \sqrt{x^2 + y^2} \sin\left(\theta_{xy} + \arctg \frac{x}{y}\right), \quad (13)$$

$$\rho(\theta)_{yz} = \sqrt{y^2 + z^2} \sin\left(\theta_{yz} + \arctg \frac{y}{z}\right). \quad (14)$$

Следует отметить, что размеры параметрического пространства ограничиваются по оси параметра ρ значениями в интервале между минимальной и максимальной дальностью обнаружения $[R_{\min} \dots R_{\max}]$, а по оси θ в интервале $[-90^\circ \dots 90^\circ]$ на плоскости XY , $[0^\circ \dots 90^\circ]$ на YZ , для обеспечения обнаружения траекторий со всевозможными курсовыми углами.

Далее, плоскости параметров ρ и θ , содержащие следы от каждой отметки массивов (12), рассчитанные по выражениям (13), (14), дискретизируются на ячейки,

представляющие собой счетчики, которые увеличивают свое значение на единицу при прохождении следа отметки через ячейку $[\rho';\theta']$. В литературе [9–11] совокупность ячеек получила название аккумулятор.

Размеры этих ячеек при отсутствии ошибок оценки координат воздушного объекта могут быть выбраны произвольно малыми. Однако, в реальных условиях, при малых размерах будет велика вероятность непопадания следа в необходимую ячейку. Для определения размеров учитывается, что случайные ошибки измерения дальности R , азимута β и угла места ε представляют собой независимые нормальные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и дисперсиями $\sigma_\beta^2, \sigma_\varepsilon^2, \sigma_R^2$.

Используя правило « 3σ », размеры вдоль координат ρ, θ могут быть вычислены на основании следующих равенств:

$$\Delta\rho = 6\sigma_R, \quad (15)$$

$$\Delta\theta = 6\sigma_\beta, \quad (16)$$

для плоскости XU

$$\Delta\theta = 6\sigma_\varepsilon. \quad (17)$$

для плоскости YZ [10].

Ячейки, значения которых превысили порог, подвергаются дальнейшей обработке. Каждая из них содержит матрицу с отметками, которые принадлежат одной прямой

$$A_i = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{k1} & \cdots & x_{kn} \\ y_{k1} & \cdots & y_{kn} \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{k1} & \cdots & y_{kn} \\ z_{k1} & \cdots & z_{kn} \end{bmatrix}, A_i \in (\rho_i, \theta_i)_{XY}, B_i \in (\rho_i, \theta_i)_{YZ}. \quad (18)$$

Следует отметить, вследствие дискретизации пространства параметров следует ожидать, что превышение порогового уровня будет наблюдаться в некотором множестве ячеек аккумулятора. Эти множества будут сосредоточены в окрестностях ячеек, в которых пересекаются следы отметок, принадлежащих истинной траектории (рис. 5).

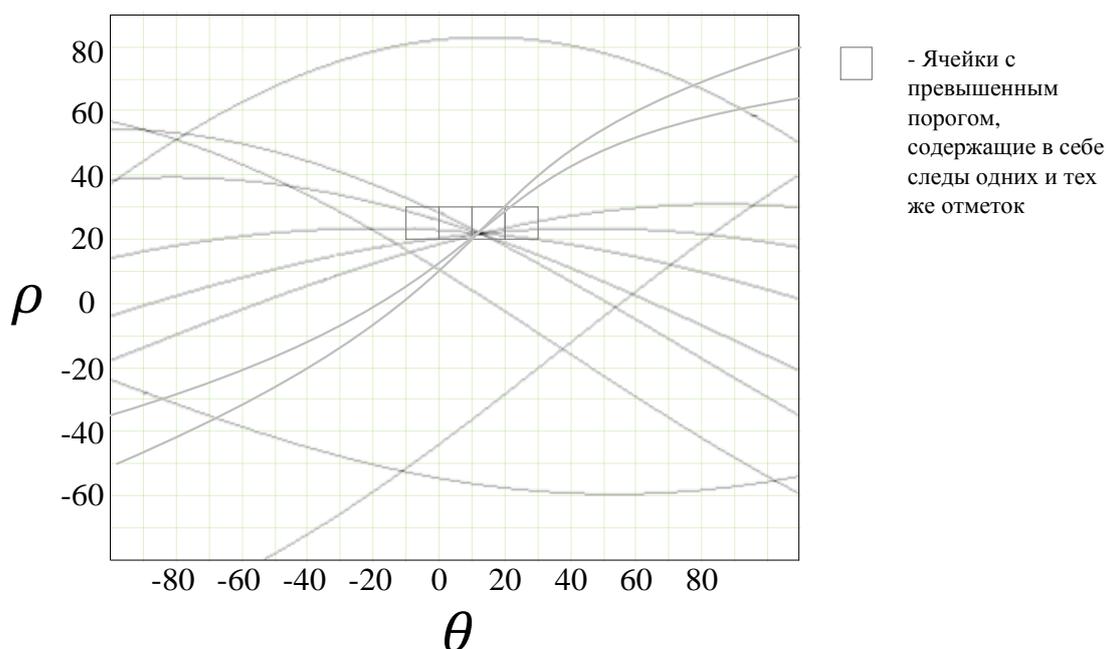


Рисунок 5 – Появление множества ячеек с превышенным порогом

Для сокращения объемов вычислений требуется выделять ячейку с истинными отметками из всего множества ячеек с превышенным порогом. Для этого можно использовать алгоритм, описанный в [10]. Алгоритм работает следующим образом:

Шаг 1. Из множества матриц A_i, B_i с превышенным порогом, выбирается матрица A, B у которой наибольшее количество элементов.

Шаг 2. Вычисляется значение величины, отражающей количество одинаковых следов между ячейками $(A - A_i, B - B_i)$:

$$L(A, A_i)_{XY} = \frac{|H(A) \setminus H(A_i)|}{\sqrt{|H(A)||H(A_i)|}}, \quad (19)$$

$$L(B, B_i)_{YZ} = \frac{|H(B) \setminus H(B_i)|}{\sqrt{|H(B)||H(B_i)|}}, \quad (20)$$

где $|H(A) \setminus H(A_i)|$, $|H(B) \setminus H(B_i)|$ – количество различных элементов между матрицами A и A_i , B и B_i соответственно, $|H(A)|$, $|H(B)|$ – количество элементов A , B , $|H(A_i)|$, $|H(B_i)|$ – количество элементов A_i , B_i . Значения величин L сравниваются с порогом. В случае если порог не превышен, то принимается решение, что рассматриваемые пары ячеек содержит в себе похожие матрицы с большим количеством одинаковых элементов. В этом случае матрицы A_i , B_i обнуляются.

Шаг 3. Матрицы A, B исключаются из входного множества, а ее элементы подлежат дальнейшей обработке.

Шаг 4. Происходит переход на шаг 1.

Алгоритм работает до тех пор, пока в исходном множестве не останутся ячейки с превышенным порогом. В итоге результатом этапа будут выделенные из множества (18) ячейки с истинными отметками.

Этап 5. Селекция отметок по скорости и времени на плоскости XY, YZ .

Селекция отметок выполняется для исключения нескольких траекторий, принадлежащих одной прямой, друг от друга и фильтрации ложных отметок, расположенных на одной траектории. Все элементы матриц A_i , B_i в выделенных на этапе 4 ячейках, принадлежащие обнаруженной траектории, группируются по времени. Далее, рассчитываются расстояния между отметками, которые принадлежат соседним временным ячейкам. Из всех отметок формируются группы (предполагаемые траектории) следующим образом: во-первых, группе может принадлежать только одна отметка из каждой временной ячейки (селекция по времени), во-вторых, расстояния, соответствующие переходам между отметками ячеек, не должны превышать максимально допустимого значения (рис. 6).

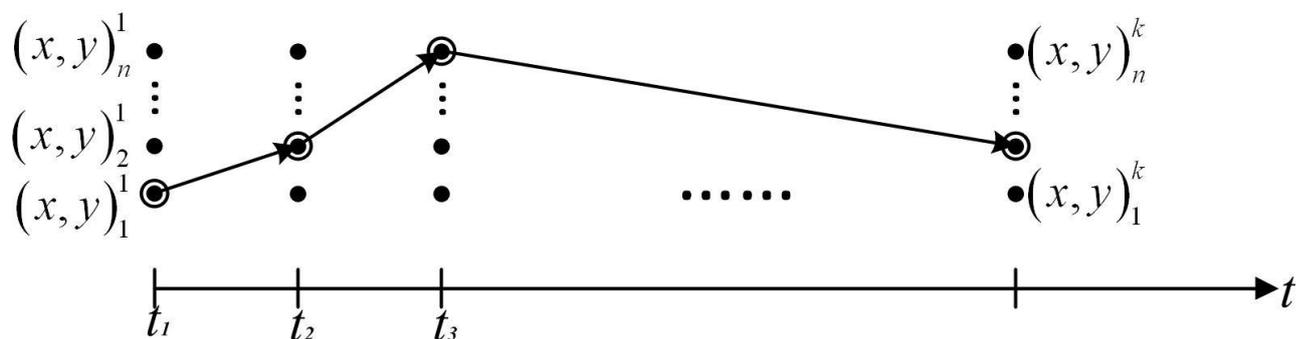


Рисунок 6 – Селекция отметок

Если число отметок в группе превышает значение порога N , рассчитанного на седьмом этапе, то формируется искомая траектория. На выходе блока будут матрицы с набором координат, соответствующих искомым траекториям цели на плоскостях XU , YZ .

$$A_{Ti} = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_k \\ y_1 & \cdots & y_k \end{bmatrix}, B_{Ti} = \begin{bmatrix} y_1 & \cdots & y_k \\ z_1 & \cdots & z_k \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Отметим, что индекс n здесь исчезает в виду того, что для одной траектории в каждый момент времени остается только одна отметка.

Этап 6. Отождествление траекторий на плоскостях XU , YZ .

Задачей данного этапа является отождествление траекторий с плоскостями XU и YZ , и их последующее объединение в траектории в пространстве. Набор отметок, принадлежащих одной траектории на плоскости проверяется на соответствие наборам отметок, принадлежащим траекториям на другой плоскости, путем сравнения общей координаты y_k . Для принятия решения о соответствии наборов отметок с разных плоскостей используется алгоритм, рассмотренный на этапе 4. Вычисляется величина S , характеризующая степень различия между наборами отметок на плоскостях XU и YZ по координате y_k .

$$S(A_{Ti}, B_{Ti}) = \frac{|H(A_{Ti}) \setminus H(B_{Ti})|}{\sqrt{|H(A_{Ti})| |H(B_{Ti})|}}, \quad (22)$$

где $|H(A_{Ti}) \setminus H(B_{Ti})|$ – количество различных отметок между наборами A_{Ti} и B_{Ti} , $|H(A_{Ti})|$ – количество отметок набора A_{Ti} , $|H(B_{Ti})|$ – количество отметок набора B_{Ti} . При не превышении $S(A_{Ti}, B_{Ti})$ порога принимается решение о соответствии отметок траектории A_{Ti} отметкам траектории B_{Ti} . На выходе блока формируется матрица, соответствующая траектории цели в пространстве.

$$(A_{Ti}, B_{Ti}) = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_k \\ y_1 & \cdots & y_k \\ z_1 & \cdots & z_k \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Этап 7. Сравнение количества отметок в объединенной траектории с порогом N .

На заключительном этапе происходит сравнение количества отметок, содержащихся в траектории, с пороговым значением и на основе этого принимается решение об обнаружении траектории. Порог обнаружения N рассчитывается, исходя из значений показателей качества обнаружения [10, 24–27].

Траектория обнаруживается по критерию « N из M », итоговая вероятность правильного ее обнаружения определяется с использованием теоремы Бернулли

$$D = \sum_N^M C_M^N P_{\text{по}_c}^N (1 - P_{\text{по}_c})^{M-N}, \quad (24)$$

а итоговая вероятность ложной тревоги

$$F = \sum_N^M C_M^N P_{\text{лт}_c}^N (1 - P_{\text{лт}_c})^{M-N}, \quad (25)$$

где M – максимальное количество отметок, которое может содержать траектория, $P_{\text{по}_c}$ – вероятность правильного обнаружения одной отметки в системе, $P_{\text{лт}_c}$ – вероятность ложной тревоги в системе, N – значение порога.

Величина M вычисляется, исходя из условия, что в каждом цикле обзора за период, отметка от воздушного объекта обнаруживается в каждой позиции, т.е.

$$M = \frac{T_{\text{н}}}{t_{\text{ц}}}, \quad (26)$$

где $T_{\text{н}}$ – период обзора, $t_{\text{ц}}$ – цикл обзора. В качестве примера выбран зондирующий сигнал в виде пачки из четырех ЛЧМ радиоимпульсов, излучаемый в каждом цикле обзора. На рисунке 7 изображен принятый отраженный сигнал за период обзора ($T_{\text{н}}$ включает четыре цикла). В случае обнаружения пачки будут формироваться

отметки от цели, а решение об обнаружении траектории будет приниматься на основе решения обнаружения отметок за период (рис. 7).

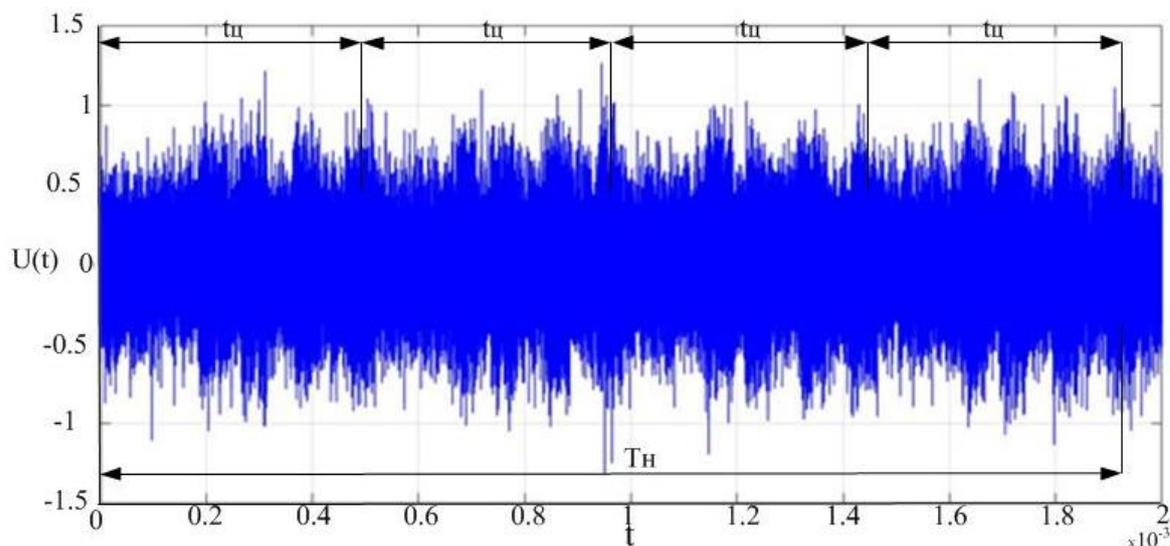


Рисунок 7 – Иллюстрация отраженного сигнала

Задача определения оптимального порога сводится к решению оптимизационной задачи поиска решающего правила « N из M », обеспечивающего максимум целевой функции (24), при установленных ограничениях (25). Решение этой задачи методом перебора позволяет сравнить все правила принятия решения и выбрать оптимальное. На рисунке 8 приведены графики итоговых вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги. Так, например, при значении допустимой итоговой вероятности ложной тревоги $F_{\text{доп}}=10^{-6}$ и отношении сигнал-шум $q^2=8\text{дБ}$, оптимальным решающим правилом по критерию « N из M » будет «4 из 10» при первичной вероятности ложной тревоги в приемном пункте $P_{\text{лт}_{1,(2)}}=0.1$, что обеспечит итоговую вероятность правильного обнаружения траектории $D=0.945$.

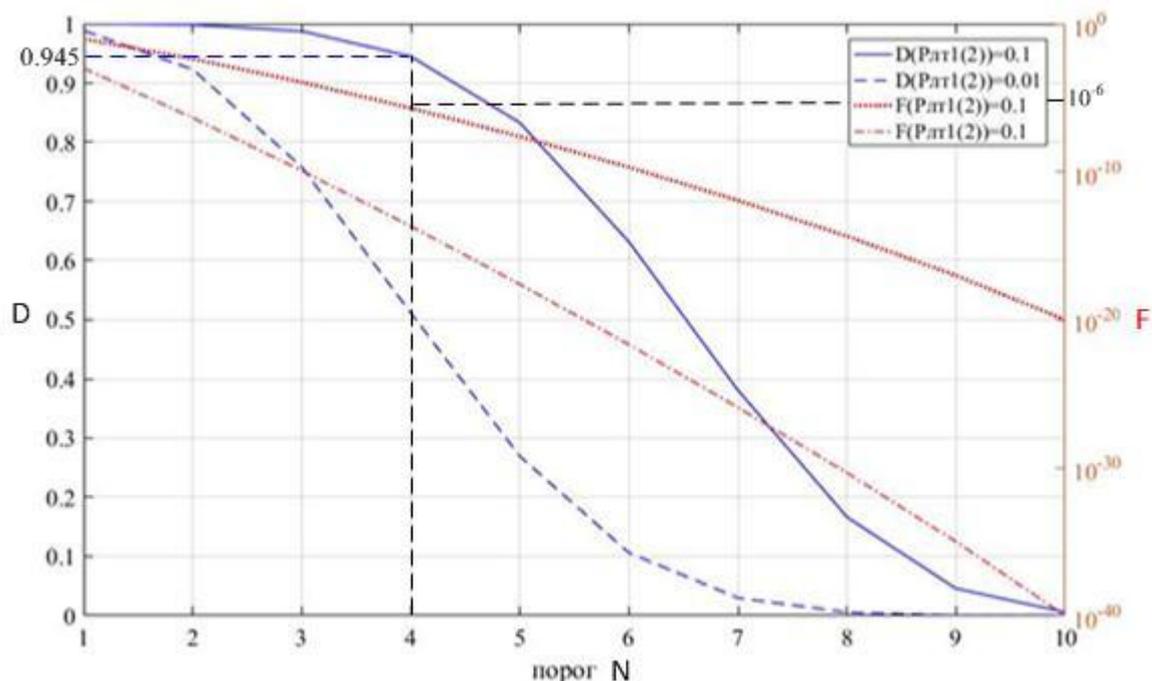


Рисунок 8 –Итоговые вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги при $P_{лт_1(2)}=0.1$ и 0.01 , $q^2=8$ дБ

В случае, если количество отметок одной траектории превысило заданное значение порога, принимается решение об обнаружении траектории, которая представляется в виде прямолинейного отрезка, включающего в себя отметки от цели с координатами $x_{ц}$, $y_{ц}$, $z_{ц}$.

На рисунке 9 представлены результаты обнаружения прямолинейной траектории в пространстве с использованием преобразования Хафа.

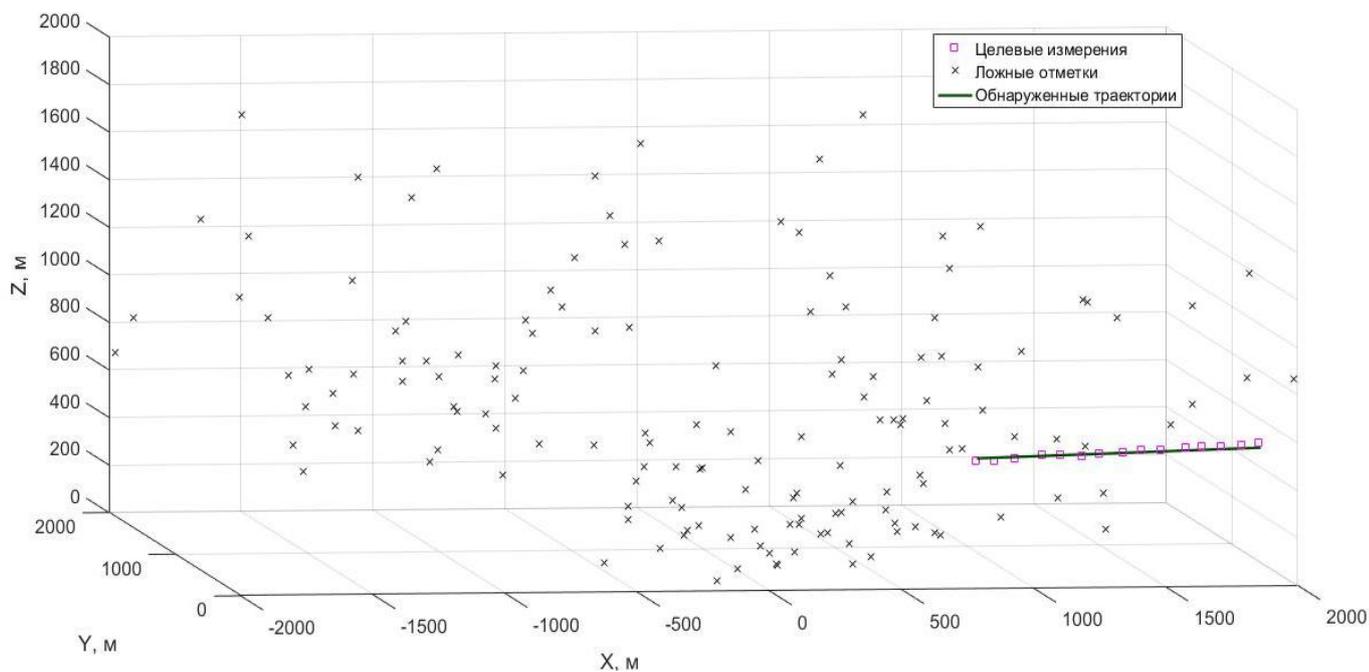


Рисунок 9 – Результат обнаружения прямолинейной траектории цели в пространстве

Таким образом, разработанный научно-методический аппарат позволяет решить задачу обнаружения траектории цели в пространстве в условиях низкой энергетической доступности принимаемых радиолокационных сигналов. В процессе разработки методики проведена оптимизация нескольких этапов ее работы, связанная с определением выбором оптимальных размеров ячеек параметрического пространства и аккумулятора, селекцией истинных и ложных отметок на искомой траектории и определением количества истинных отметок, необходимых для принятия решения о обнаружении траектории.

Библиографический список

1. Лешко Н.А., Сахно В.И., Сахно Д.И., Сахно И.В., Теремов М.П., Шалдаев С.Е. Направления создания многопозиционной системы радиолокационного наблюдения

воздушно-космического базирования // III всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники»: сборник статей. Санкт-Петербург, 2016, С. 396 – 401.

2. Петроченков Д.М., Федотов А.В. Временной метод определения дальности до сканирующего источника радиоизлучения в многопозиционной радиолокационной системе с некооперируемым подсветом // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2018. № 2 (3). С. 78 - 84.

3. Петроченков Д.М., Федотов А.В. Организация обзора пространства в многопозиционной радиолокационной системе с некооперируемым источником подсвета на основе комбинаторного принципа // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. 2018. Т. 11. № 7. С. 831 - 841.

4. Ильин Е.М., Климов А.Э., Пашин Н.С., Полубехин А.И., Черевко А.Г., Шумский В.Н. Пассивные локационные системы. Перспективы и решения // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2. [URL:http://doc.knigi-x.ru/22raznoe/5050-1-udk-62139696-passivnie-lokacionnie-sistemi-perspektivi-resheniya-ilin-klimov-paschin-polubehin-cherevko-shumsk.php](http://doc.knigi-x.ru/22raznoe/5050-1-udk-62139696-passivnie-lokacionnie-sistemi-perspektivi-resheniya-ilin-klimov-paschin-polubehin-cherevko-shumsk.php)

5. Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Живучесть радиолокационных систем // Радиотехника. 2006. № 11. С. 5 - 10.

6. Кирюшкин В.В., Волков Н.С. Межпозиционное отождествление результатов измерений и определение координат воздушных целей в многопозиционной

радиолокационной системе на беспилотных летательных аппаратах // Теория и техника радиосвязи. 2019. № 1. С. 107 - 116.

7. Горбунова А.А. Разработка алгоритма получения точечного портрета сложной цели по комплексному радиолокационному изображению // Труды МАИ. 2011. №

45. URL: http://trudymai.ru/published.php?ID=25366&PAGEN_2=2

8. Булыгин М.Л., Муллов К.Д. Формирователь зондирующего сигнала для радиолокатора с синтезированной апертурой // Труды МАИ. 2015. № 80. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=57040>

9. Boers Y., Ehlers F., Koch W., Luginbuhl T., Stone L.D., Streit R.L. Track before Detect Algorithms // Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2008, Article ID 413932, 2 pages, doi:10.1155/2008/413932.

10. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. - СПб: Изд-во ЛЭТИ, 2013. - 164 с.

11. Монаков А.А. Обнаружитель движущейся цели для радиолокационного приемника на основе алгоритма Хафа // XX международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь»: сборник докладов, - Воронеж, 15 – 17 апреля 2014. С. 1584 - 1594.

12. Семенов А.Н. Обнаружение радиолокационных целей с помощью преобразования Хафа // Наука и Образование. 2014. № 12. С. 619 - 632.

13. Hough P.V.C. Methods and means for recognizing complex patterns. Patent 3.069.654. US. 1962.

14. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. - М.: Радио и связь, 1993. - 416 с.
15. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. – Минск: Наука и техника, 1978. - 184 с.
16. N.J. Willis. Bistatic Radar, 2nd Ed., Silver Spring, MD: Technology Service Corp., 1995. Corrected and republished by Raleigh, NC: SciTech Publishing, Inc., 2005, 337 p.
17. Griffiths H.D., Baker C.J. An Introduction to Passive Radar, New York, Artech House, 2017, 110 p.
18. Мельников Ю.П., Попов С.В. Радиотехническая разведка. Методы оценки местопределения источников излучения. - М.: Радиотехника, 2008. – 432 с.
19. Bergin J., Guerci J.R. MIMO Radar: Theory and Application. Boston, London, Artech House, 2018, 280 p.
20. Wang R., Deng Y. Bistatic SAR System and Signal Processing Technology, Springer, 2018, 286 p.
21. Лешко Н.А., Ашурков И.С. Расчет рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы по стороннему источнику подсвета // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62297>
22. Сколник М.И. Справочник по радиолокации. – М.: Техносфера, 2014. Кн. 2. - 680 с.
23. Лешко Н.А., Цыбульник А.Н. Радиотехническая разведка и скрытная радиолокация. - Ярославль: Изд-во Ярославского гос. пед. университета, 2006. - 152 с.

24. Ашурков И.С., Лешко Н.А., Какаев В.В. Оптимизация пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6 (79). С. 81 - 85.
25. Анненкова И.Ю., Грибанов А.С. Ошибки линий положения для различных методов определения направления на источник излучения // Труды МАИ. 2011. № 42. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24260>
26. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: - М.: Юрайт, 2015. - 343 с.
27. Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. - М.: Советское радио, 1971. - 368 с.