

УДК 621.396.969

## **Обнаружение радиолокационных целей с помощью преобразования Хафа**

Семёнов А. Н.<sup>1,\*</sup>

<sup>\*</sup>[semenov.an@bmstu.ru](mailto:semenov.an@bmstu.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В работе рассмотрено преобразование Хафа и его применение для задачи обнаружения радиолокационных целей. Показано, что преобразование Хафа можно считать одним из эффективных непараметрических способов обнаружения за счет некогерентного накопления при высоком темпе обзора пространства. Приведен пример использования преобразования для обзорной РЛС и показаны аналитические соотношения, с помощью которых можно проводить анализ качества работы радиолокационной системы. Было показано, что применение преобразования Хафа позволяет повысить дальность обнаружения РЛС по сравнению с тремя вариантами работы РЛС: обнаружения по одному импульсу, обнаружения по когерентной и некогерентной пачке импульсов.

**Ключевые слова:** РЛС; радиолокация; преобразование Хафа; некогерентное накопление

---

### **Введение**

Развитие радиолокационной техники в последнее десятилетие все больше характеризуется внедрением эффективных цифровых методов обработки информации и способов повышения информативности РЛС для решения задачи обнаружения радиолокационных целей. Так в [1] был предложен способ формирования когерентной пачки большой длительности в одном пространственном канале за несколько периодов обзора, позволяющий повысить вероятность правильного обнаружения цели. Предложенный авторами способ является развитием классической теории обнаружения для продолжительных временных интервалов наблюдения за радиолокационной целью.

Другим подходом являются непараметрические способы обнаружения радиолокационных сигналов, в которых не используются априорные данные о виде действующих помех и не оцениваются их параметры в процессе наблюдения за целью. Наиболее известными из них являются знаковые и ранговые обнаружители. Целью этой статьи является описание еще одного эффективного непараметрического способа обнаружения, построенного на основе преобразования Хафа, в котором задача обнаружения цели трансформируется в задачу обнаружения траектории цели в пространстве ее траекторных параметров за некоторый промежуток времени.

Для обзорных РЛС характерно, что обнаружение цели осуществляется последовательно при помощи пороговой обработки для каждого элемента разрешения радиолокационного объема. При таком подходе существует две основные проблемы при обнаружении слабых сигналов. Во-первых, после принятия решения о наличии цели информация из рассмотренного элемента разрешения не используется, а задача обнаружения решается для соседнего элемента. При этом ошибочно принятое решение об отсутствии цели в элементе разрешения приводит к потере информации. Во-вторых, если используется энергетическое накопление отраженного сигнала от цели, то предполагается, что цель не выходит из элемента разрешения в течение всего времени накопления, что не всегда выполняется для высокоскоростных целей и приводит к ухудшению вероятности их обнаружения.

Преобразование Хафа позволило преодолеть обе эти проблемы. Впервые для решения задачи обнаружения оно было описано в работе Б.Д. Карлсона [2]. Особенностью предложенного метода было то, что совместно с обнаружением цели решалась задача оценки ее траекторных параметров. Для этого осуществлялось межобзорное накопление информации, в которой могли содержаться сигналы от слабых необнаруживаемых целей. Затем к накопленной информации применялось преобразование Хафа, формирующее экстремумы в пространстве траекторных параметров. Из анализа экстремумов принималось решение об обнаружении цели или ее отсутствии.

В отечественной литературе современные работы, посвященные применению преобразования Хафа в радиолокации, представлены в трудах А.А. Коновалова [3] и А.А. Монакова [4].

## 1. Преобразование Хафа

Преобразование Хафа (Hough Transform, HT) – это численный алгоритм, предназначенный для извлечения графических примитивов из изображений [5, 6]. Впервые его ввел и применил Пол Хаф в 1961 г., как метод обнаружения сложных фигур при обработке двоично квантованных изображений. Рассмотрим работу этого алгоритма на следующем примере. Пусть задано множество точек, принадлежащих одной прямой на некотором изображении. Связь между координатами точек прямой  $(x, y)$  на изображении можно описать следующим соотношением:

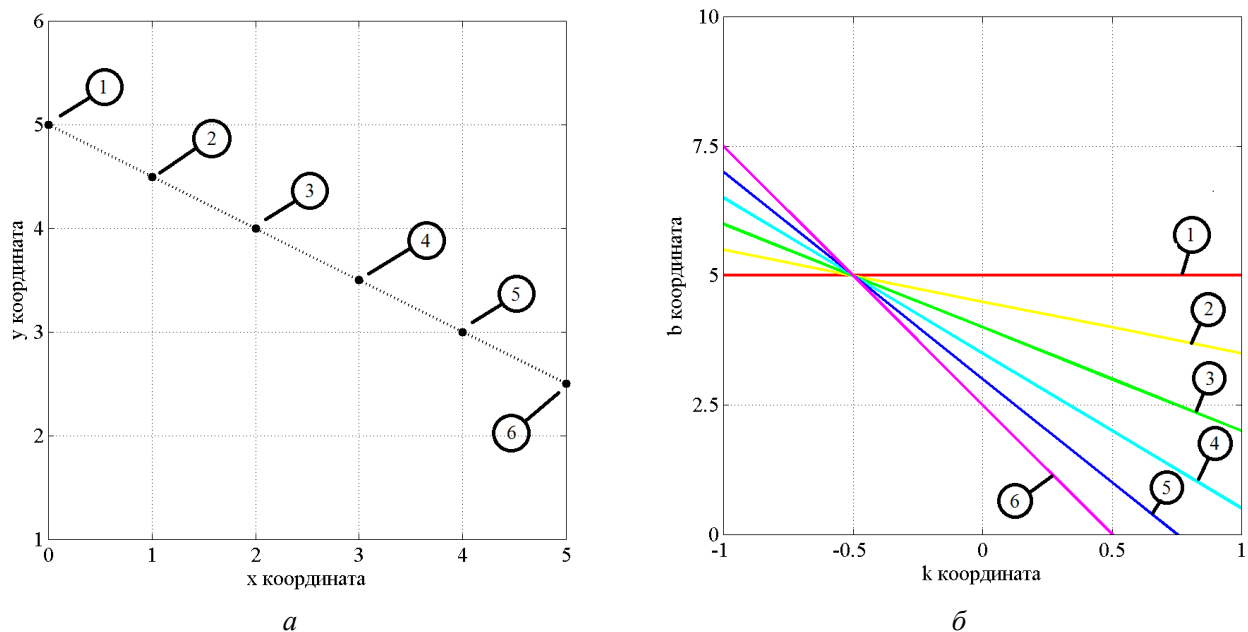
$$f(x, y | \hat{k}, \hat{b}) = y - \hat{k}x - \hat{b} = 0, \quad (1)$$

где  $\hat{k}, \hat{b}$  — параметры функции  $f(x, y)$ , характеризующие наклон прямой и точку ее пересечения с осью  $Oy$  (символ « $\hat{\phantom{x}}$ » использован для обозначения параметров функции). Выражение (1) осуществляет однозначное отображение пары параметров  $\hat{k}, \hat{b}$  в некоторое множество точек на изображении. С другой стороны, это же выражение можно трактовать наоборот: точка на изображении отображается во множество точек в пространстве параметров. Такое отображение точек  $(x, y)$  изображения называют обратным проецированием. Тогда связь между координатами точек в пространстве параметров  $(k, b)$  для выбранной точки на изо-

бражении  $(\hat{x}, \hat{y})$  можно записать в виде:

$$g(k, b \mid \hat{x}, \hat{y}) = b + \hat{x}k - \hat{y} = 0, \quad (2)$$

где  $\hat{x}, \hat{y}$  — параметры функции  $g(k, b)$ , характеризующие наклон прямой и точку ее пересечения с осью  $Ob$ . Из соотношения (2) видно, что каждая точка изображения  $(\hat{x}, \hat{y})$  будет определять прямую линию в пространстве параметров  $(k, b)$ . На рис. 1, *а* показаны несколько точек, лежащих на прямой, а на рис. 1, *б* показаны параметрические линии, полученные обратным проецированием этих точек в пространство параметров согласно выражению (2).



**Рис. 1.** Пояснения к преобразованию Хафа: *а* — изображение прямой  $y = -0,5x + 5$ ; *б* — параметрические линии в пространстве параметров прямых, построенные по шести точкам прямой на изображении

Как видно из рис. 1, *б*, параметрические линии пересекаются в одной общей точке, координаты  $(k, b)$  которой однозначно определяют прямую линию, которая соединяет все точки на рис. 1, *а*.

Очевидно, что этот метод может быть расширен для поиска не только прямых, но и для нахождения любых параметрически заданных фигур на изображении. При этом связь между точками на кривой может быть задана с помощью уравнения с  $n$  параметрами  $a_1, a_2, \dots, a_n$ :

$$f(x, y \mid \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_n) = 0. \quad (3)$$

Меняя роль параметров и переменных в выражении (3), можно получить уравнение обратного проецирования точек изображения на многомерные гиперповерхности в пространстве параметров с размерностью  $n$ :

$$g(a_1, a_2, \dots, a_n \mid \hat{x}, \hat{y}) = 0. \quad (4)$$

Пересечения соответствующих гиперповерхностей будут определять параметры фигур на изображении.

В рассмотренном случае уравнение прямой описывалось в пространстве параметров, заданном в декартовой системе координат  $(k, b)$ . Однако, уравнение прямой можно описать в пространстве параметров, заданном в полярной системе координат  $(\rho, \vartheta)$ . Тогда связь между координатами точек  $(x, y)$  на прямой и параметрическими линиями в пространстве  $(\rho, \vartheta)$  будет иметь вид:

$$\rho = x \cos \vartheta + y \sin \vartheta. \quad (5)$$

где  $\rho$  — кратчайшее расстояние от начала координат до прямой, а  $\vartheta$  — угол между нормалью к прямой и осью  $Ox$ .

Преобразование точек изображения в параметрические линии, представляющие синусоиды, в пространстве полярных координат  $(\rho, \vartheta)$  имеет существенное преимущество перед преобразованием в параметрические линии в пространстве декартовых координат  $(k, b)$ . Обнаружить прямые на изображении из пространства параметров  $(k, b)$ , характеризующиеся большим наклоном, т.е. когда  $k \rightarrow \infty$ , гораздо сложнее, чем в пространстве полярных координат  $(\rho, \vartheta)$ .

Таким образом, классический алгоритм преобразование Хафа сводится к выполнению следующей последовательности действий:

- 1) задать границы пространства параметров  $\Theta$ ;
- 2) выбрать сетку дискретизации  $(\Delta\rho, \Delta\vartheta)$  пространства  $\Theta$ ;
- 3) построить параметрические линии  $\rho = x \cos \vartheta + y \sin \vartheta$  для каждой точки изображения;
- 4) подсчитать число пересечений  $n$  каждого дискрета пространства параметров  $(\Delta\tilde{\rho}, \Delta\tilde{\vartheta})$  параметрическими линиями;
- 5) найти элементы разрешения  $(\Delta\hat{\rho}, \Delta\hat{\vartheta})|_{\max n}$  с максимальным числом пересечений;
- 6) восстановить траектории, за параметры которых берутся координаты центра ячейки  $(\Delta\hat{\rho}, \Delta\hat{\vartheta})|_{\max n}$ .

Пространство, в котором накапливается число пересечений параметрических линий, называют аккумулятором [2].

В 1917 г. австрийский математик Иоганн Радон ввел интегральное преобразование, названное впоследствии преобразованием Радона [7]. Преобразование Радона имеет простой геометрический смысл — это интеграл от функции вдоль прямой  $L(\rho, \vartheta)$ . Если  $L(\rho, \vartheta)$  описывает прямую, заданную уравнением  $\rho = x \cos \vartheta + y \sin \vartheta$ , то математически преобразование Радона функции  $f(x, y)$  можно представить в виде:

$$R(\rho, \vartheta) = \int_{L(\rho, \vartheta)} f(x, y) dl = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(\rho - x \cos \vartheta - y \sin \vartheta) dx dy, \quad (6)$$

где  $R(\rho, \vartheta)$  — луч-сумма преобразования,  $\delta(\cdot)$  — дельта-функция.

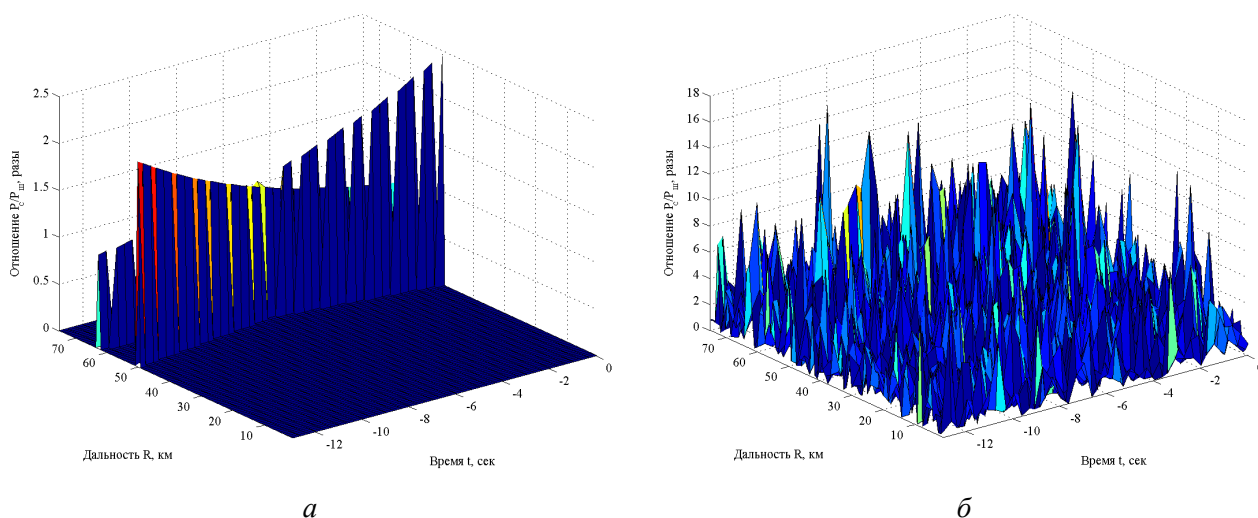
Из выражения (6) видно, что преобразование Радона позволяет проинтегрировать изображение, заданного функцией  $f(x, y)$ , вдоль прямых, определяемых уравнением (5) под различными углами  $\vartheta$ . Таким образом, преобразование Хафа математически можно представить как частный случай преобразования Радона при обнаружении прямых на плоскости изображения.

Несмотря на кажущуюся простоту метода, преобразование Хафа имеет несколько недостатков, которые необходимо учитывать в процессе построения обнаружителей [8]:

- чувствительность преобразования к шумам на изображении, приводящая к усложнению поиска локальных максимумов в аккумуляторе пространства параметров;
- чувствительность преобразования к размерам элементов разрешения пространства аккумулятора, приводящая к лучшему обнаружению протяженных фигур на изображении, а не точечных.

## 2. Обнаружение цели с помощью преобразования Хафа

В качестве примера использования преобразования Хафа рассмотрим задачу об обнаружении двух целей на встречно-пересекающихся траекториях,двигающихся со скоростями  $3M$  и  $-3M$  (рис. 2, *а*) и удаленных в начальный момент наблюдения на 63 км и 50 км соответственно [2]. Время наблюдения за целями составляет  $T_{\text{наб}} = 12,5$  с. Ось времени начинается из прошлого до текущего момента,  $t = 0$  с. На рис. 2, *б* показана аддитивная смесь сигналов от цели с белым шумом, мощность которого равна мощности отраженного сигнала на входе приемника от цели, удаленной на 63 км в момент начала наблюдения, т.е. отношение сигнал/шум (С/Ш) = 0 дБ. Из рис. 2, *а* видно, что с приближением цели мощность отраженного сигнала возрастает. Однако, как видно из рис. 2, *б*, выделить нефлуктуирующую цель на фоне шума без ложных тревог весьма трудно.

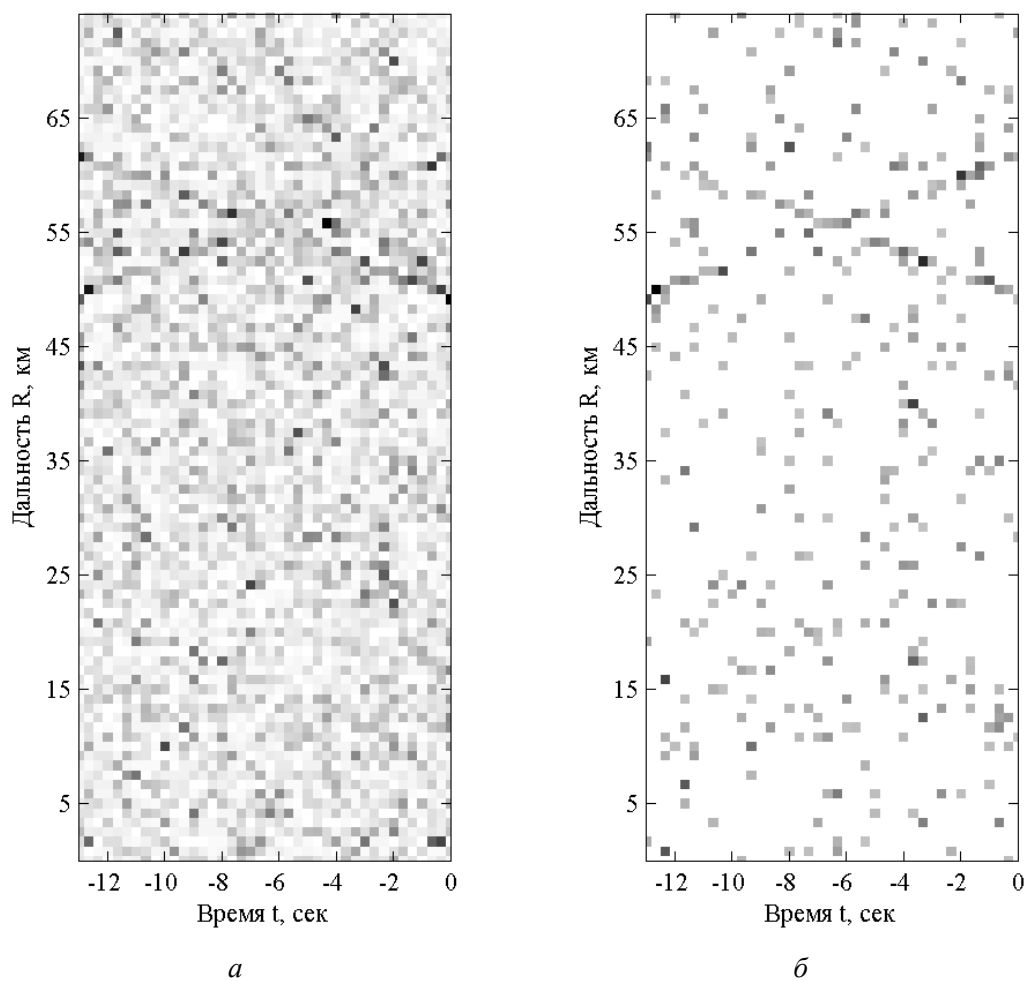


**Рис. 2.** Пояснения к задаче обнаружения целей: *а* — сигналы от целей; *б* — аддитивная смесь сигналов от целей и шума на входе приемника

Пусть имеется обзорная РЛС с разрешающей способностью  $\Delta R = 750$  м и максимальной дальностью обнаружения  $D = 67,5$  км. Период обзора сектора равен  $T_{\text{обз}} = 10$  с. Для каждого углового направления осуществляется передача и прием нескольких когерентных пачек зондирующих импульсов длительностью  $T_{\text{ког}} = 0,3125$  с каждая.

Как правило, цель считается обнаруженной, если сумма  $M$  из  $N$  излученных когерентных пачек за несколько периодов обзора превысит порог в выставленном строке дальности, что требует значительных временных затрат. При этом увеличение темпа обзора будет приводить к уменьшению времени нахождения цели в луче, а следовательно к ухудшению параметров обнаружения при традиционной обработке сигналов. Однако, массив исходных данных, формирующийся за счет высокого темпа обзора, можно использовать для обнаружения целей с применением преобразования Хафа. Пусть темп обзора РЛС увеличился в 32 раза и стал равен  $T_{\text{обз Хафа}} = T_{\text{обз}}/32 = T_{\text{ког}} = 0,3125$  с,

Накопленную межобзорную информацию можно представить в виде изображения эхосигналов, как показано на рис. 3, а. При этом размер изображения для преобразования Хафа будет равным  $\frac{T_{\text{наб}}}{T_{\text{обз Хафа}}} \times \frac{D}{\Delta R} = \frac{12,5 \text{ с}}{0,3125 \text{ с}} \times \frac{67,5 \text{ км}}{0,75 \text{ км}} = 40 \times 90$  дискретов по времени и даль-



**Рис. 3.** Исходные данные в РЛС для преобразования Хафа: *а* — изображение эхосигналов до порога; *б* — изображение эхосигналов после порога в 7 дБ

ности соответственно. Для человеческого глаза не составляет труда найти траекторию цели на фоне шума, однако для технических устройств это может быть сложной задачей.

Согласно преобразованию Хафа обратная проекция каждой точки на изображении будет представлять собой синусоиду в пространстве параметров, заданную уравнением

$$\rho = r \sin \vartheta + t \cos \vartheta = \sqrt{r^2 + t^2} \sin\left(\vartheta + \arctg \frac{r}{t}\right). \quad (7)$$

Для уменьшения количества вычислений вводится низкий порог. Если установить его равным 7 дБ для рассматриваемого случая, то помимо эхосигналов от цели его пересечет не более 300 ложных отсчетов (см. рис. 3, б). Все точки, превысившие порог, переносятся в пространство параметров, размеры которого были выбраны равными  $\rho \times \vartheta = 256 \times 256$  элементов разрешения. В аккумуляторе пространства параметров может накапливается как количество проходов параметрических линий через точку пространства параметров (бинарное накопление), так и энергия отраженного эхосигнала (энергетическое накопление). Элементы разрешения пространства параметров выбираются таким образом, чтобы обеспечить разрешение цели в аккумуляторе.

Преобразование Хафа можно выполнить при помощи операций над матрицами. Пусть массив точек  $D$  на изображении сформирован пороговой обработкой эхосигналов от цели за все время наблюдения. Тогда

$$D = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & \dots & r_n \\ t_1 & t_2 & \dots & t_n \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $r_1, \dots, r_n$  — дальности до целей, эхосигнал от которых превысил порог;  $t_1, \dots, t_n$  — моменты времени, в которые поступил эхосигнал от цели;  $n$  — число точек, превысивших порог. Матрица преобразования в пространство Хафа записывается в виде:

$$H = \begin{pmatrix} \sin \vartheta_1 & \sin \vartheta_2 & \dots & \sin \vartheta_k \\ \cos \vartheta_1 & \cos \vartheta_2 & \dots & \cos \vartheta_k \end{pmatrix}^T, \quad (9)$$

где  $k$  — размерность пространства по координате  $\vartheta$ . Произведение матриц  $D$  и  $H$  приводит к матрице  $R$  размерностью  $n \times k$ , содержащую рассчитанные обратные проекции  $\rho$  точек изображения:

$$R = HD = \begin{pmatrix} \rho_{1,1} & \rho_{1,2} & \dots & \rho_{1,n} \\ \rho_{2,1} & \rho_{2,2} & \dots & \rho_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{k,1} & \rho_{k,2} & \dots & \rho_{k,n} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Размеры матрицы  $R$ , а следовательно, и вычислительные затраты, прямо пропорциональны числу точек, превысивших порог. Матрица  $H$  может быть рассчитана заранее и ее размеры зависят только от количества элементов разрешения в пространстве параметров.



На основе матрицы  $R$  осуществляется формирование либо бинарного, либо энергетического накопления в аккумуляторе. Преимущество бинарного накопления заключается в том, что оно позволяет при помощи одного порога разрешить «слабые» и «сильные» цели на фоне шума. Однако, его эффективность ниже энергетического накопления, которое лучше разрешает траекторию цели на фоне шума [2]. На рис. 4 показаны трехмерное изображение и вид сверху аккумуляторов с применением энергетического и бинарного накопления в пространстве параметров  $(\rho, \vartheta)$ .

Видно, что максимумы на рисунках соответствуют точкам, в которых параметрические линии пересекаются наибольшее число раз.

Для окончательного принятия решения об обнаружении цели необходимо применить пороговую обработку к накопленной в аккумуляторе информации. Полученные после пороговой обработки координаты точек в пространстве параметров будут соответствовать траекторным параметрам целей в зоне обнаружения. Применяя операцию обратного проецирования точек из пространства параметров на изображение, происходит восстановление траектории движения цели за все время наблюдения, как показано на рис. 5. Пороги подбираются, исходя из требуемого уровня ложных тревог и вероятности правильного обнаружения.

### 3. Дальность обнаружения РЛС при использовании преобразования Хафа

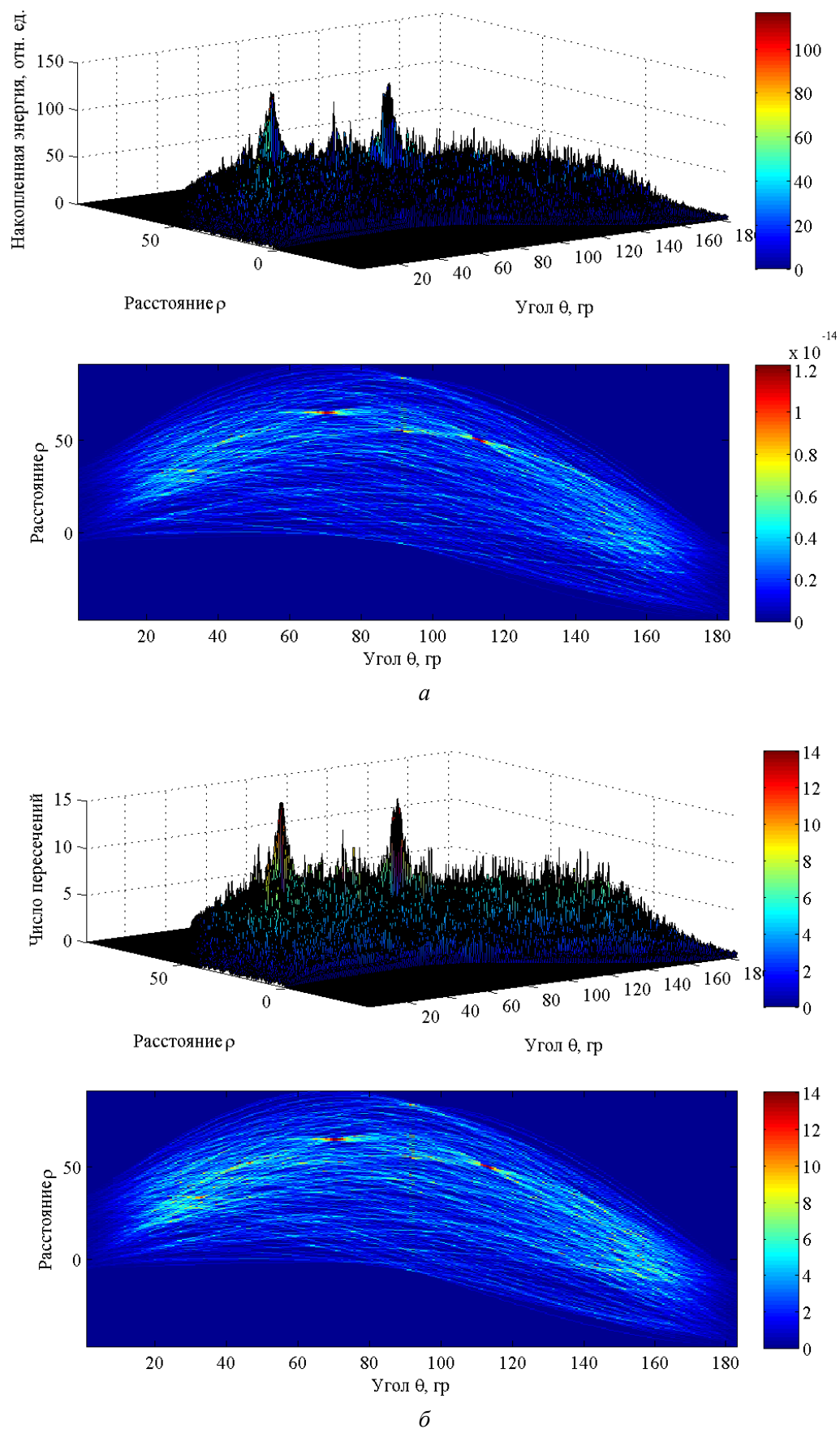
Аналитические выражения характеристик обнаружения с использованием преобразования Хафа для случая неподвижной цели были получены в [2]. При этом предполагалось, что используется двухпороговая схема обработки сигнала: сначала «изображение» эхосигналов сравнилось с низким порогом, а затем после преобразования Хафа данные в аккумуляторе сравнивались со вторым порогом. Было показано, что для определения вероятности правильного обнаружения цели со случайной начальной фазой и амплитудой при фиксированном уровне ложных тревог, можно воспользоваться следующими соотношениями [2]:

$$P_D = 1 - (1 - p_D)^N - \sum_{m=1}^{m^*-1} C_m^N \cdot p_D^m (1 - p_D)^{N-m} \left[ 1 - e^{-\frac{\xi - m\eta}{1 + \bar{S}}} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{\xi - m\eta}{1 + \bar{S}} \right)^k \right], \quad (11)$$

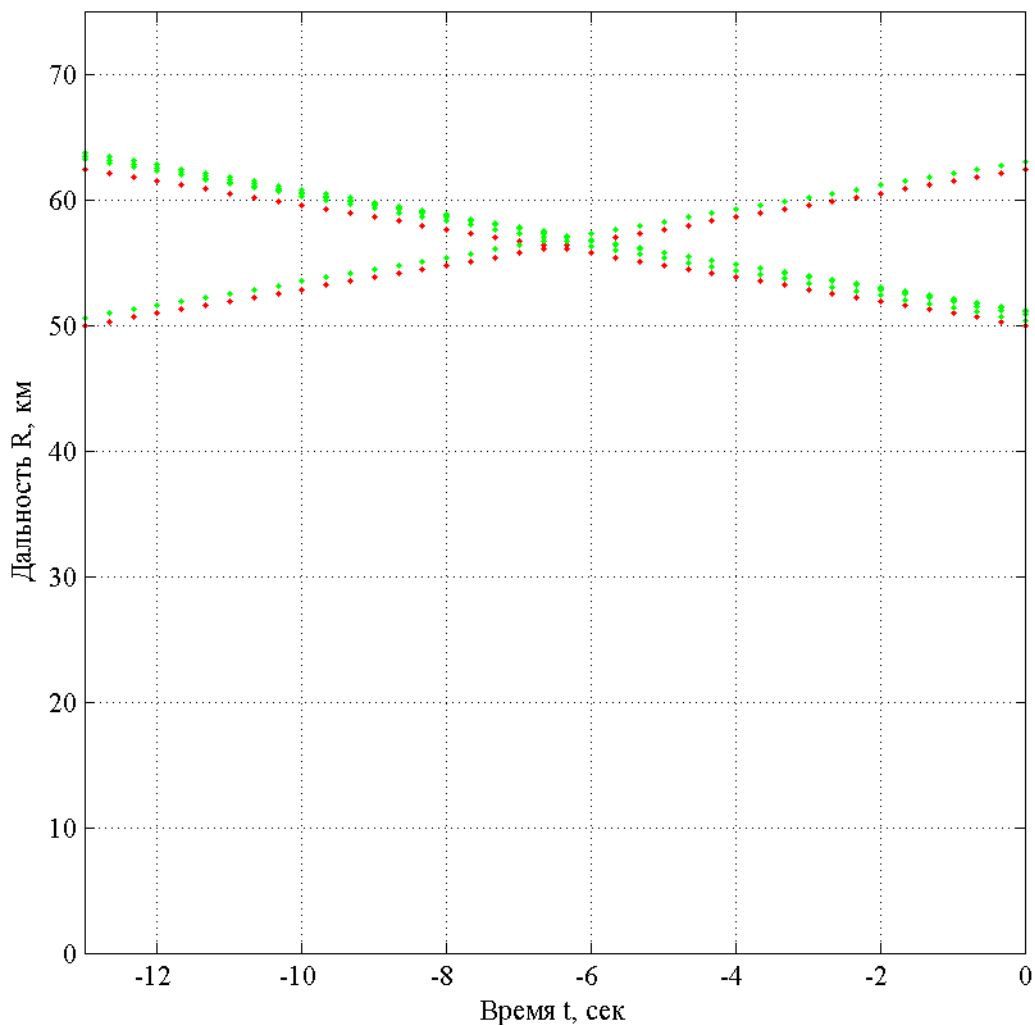
$$P_F = 1 - (1 - p_F)^N - \sum_{m=1}^{m^*-1} C_m^N \cdot p_F^m (1 - p_F)^{N-m} \left[ 1 - e^{-(\xi - m\eta)} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(\xi - m\eta)^k}{k!} \right], \quad (12)$$

где  $p_D$  — вероятность правильного обнаружения цели в элементе разрешения «изображения»;  $p_F$  — вероятность ложной тревоги в элементе разрешения «изображения»;  $N$  — максимальное значение аккумулятора с бинарным накоплением в пространстве параметров при отсутствии шума на входе приемника;  $C_m^N$  — число сочетаний  $m$  по  $N$ ;  $\bar{S}$  — среднее значение отношения сигнал/шум за время наблюдения;  $\eta$  — величина низкого порога обнаружения;  $\xi$  — величина второго порога обнаружения;  $m^*$  — величина, вычисляемая по формуле  $m^* = \text{ceil}(\xi/\eta)$  (здесь  $\text{ceil}(\cdot)$  — функция, возвращающая целое значение числа);  $P_D$  — вероятность правильного обнаружения цели;  $P_F$  — вероятность ложной тревоги.





**Рис. 4.** Аккумулятор в пространстве параметров  $(\rho, \vartheta)$  (вверху — трехмерное изображение, внизу — вид сверху): *a* — с энергетическим накоплением; *б* — с бинарным накоплением



**Рис. 5.** Истинные (красным цветом) и восстановленные (зеленым цветом) траектории целей при низком пороге 7 дБ до преобразования Хафа и втором пороге 22 дБ после преобразования

Определим на сколько увеличится дальность обнаружения РЛС при использовании алгоритма на основе преобразования Хафа при одинаковом времени наблюдения за целью  $T_{\text{наб}} = 12,5$  с по сравнению с двумя случаями: одна короткая пачка когерентных импульсов за все время наблюдения и некогерентная сумма нескольких пачек импульсов в течение всего времени наблюдения.

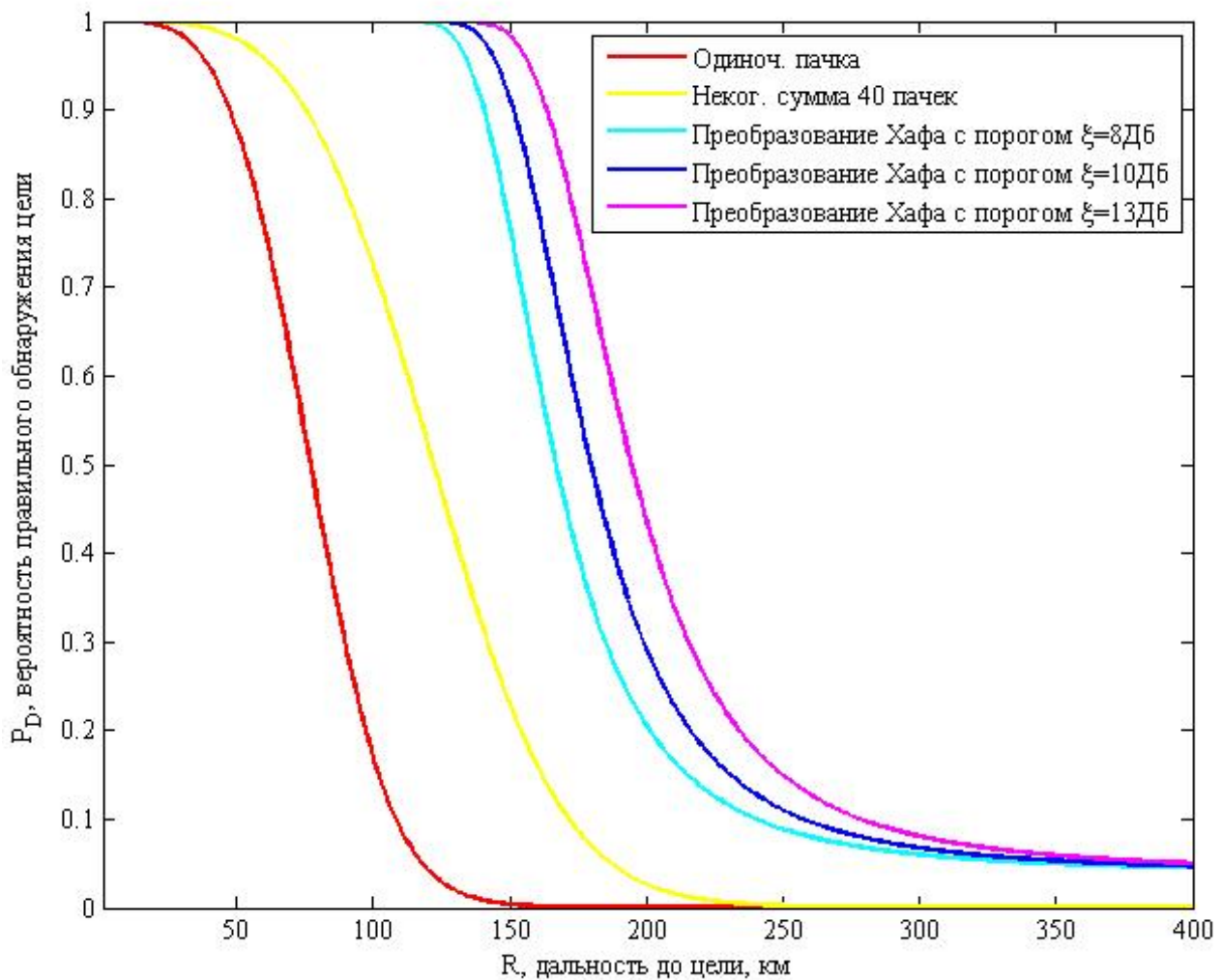
Пусть рассмотренная в предыдущей части РЛС обнаруживает цель, эхосигнал от которой приходит со случайной амплитудой и случайной начальной фазой, по одной пачке когерентных импульсов с вероятностью правильного обнаружения  $p_D = 0,5$  и вероятностью ложной тревоги  $p_F = 10^{-3}$  на дальности 67,5 км. Вероятность ложной тревоги в одном угловом направлении на один элемент разрешения по дальности будет равна  $p_F|_{\Delta R} = 1 - (1 - 10^{-3})^{1/90} = 1,1 \cdot 10^{-5}$ , а вероятность ложной тревоги на всем интервале наблюдения в 40 периодов обзора будет равна  $P_F|_{40} = 1 - (1 - 0,001)^{40} = 0,0392$ .

Тогда для сравнения характеристик обнаружения вероятность ложной тревоги в течение всего времени наблюдения с использованием преобразования Хафа также должна быть равна

$P_F|_{40}$ . При этом из формулы (12) следует, что вероятность ложной тревоги, приходящаяся на один элемент разрешения на «изображении» будет равна  $p_F|_{\text{Хаф}} = 10^{-3}$ . Зависимость отношения С/Ш в РЛС обнаружения при наблюдении цели с ЭПР  $1 \text{ м}^2$  можно представить следующим соотношением:

$$S = k/R^4, \quad (13)$$

где  $S$  — отношение С/Ш;  $R$  — дальность до цели;  $k$  — коэффициент, связанный с потенциалом станции, который для рассматриваемой РЛС равен  $5,4 \cdot 10^{20} \text{ м}^4$ . Тогда зависимости вероятности правильного обнаружения от дальности до цели для трех случаев: 1) при использовании преобразования Хафа, 2) при зондировании одной пачкой когерентных импульсов за все время наблюдения; 3) при некогерентном суммировании 40 пачек импульсов в течение всего времени наблюдения — будут иметь вид, показанный на рис. 6. Как видно из рисунка, использование преобразования Хафа позволяет увеличить дальности действия РЛС в среднем в 2,5 раза.



**Рис. 6.** Зависимость вероятности обнаружения цели от дальности при вероятности ложной тревоги на элемент разрешения  $p_F|_{\Delta R} = 1,1 \cdot 10^{-5}$

## Заключение

В работе было рассмотрено преобразование Хафа и его применение для задачи обнаружения радиолокационных целей. Преобразование Хафа можно считать одним из эффективных непараметрических способов обнаружения цели за счет некогерентного межобзорного накопления при высоком темпе обзора пространства. При этом обнаружение цели происходит не за счет дополнительного увеличения энергии сигнала, а за счет ее накопления с разных элементов разрешения с предыдущих периодов наблюдения.

Приведен пример использования преобразования Хафа для обзорной РЛС и аналитические соотношения, позволяющие проводить анализ радиолокационных систем. Было показано, что применение преобразования Хафа позволяет повысить дальность обнаружения РЛС в среднем в 2,5 раза. Преобразование Хафа удобно для обнаружения как быстролебящих, так и объектов с малой радиолокационной заметностью с постоянной радиальной скоростью, однако, может применяться и для обнаружения других классов целей [3] при сохранении своих характеристик.

## Список литературы

1. Федоров И.Б., Слукин Г.П., Нефедов С.И. Перспективы применения технологии длительного когерентного накопления в обзорных радиолокационных станциях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2005. Спец. вып. С. 112–131.
2. Carlson B.D., Evans E., Wilson S. Search Radar Detection and Track with the Hough Transform. I. System Concept // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems. 1994. Vol. 3, no. 1. P. 102–108. DOI: [10.1109/7.250410](https://doi.org/10.1109/7.250410)
3. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Часть 1. Спб.: СПбГУ. 2013.
4. Монаков А.А. Обнаружитель движущейся цели для радиолокационного приёмника на основе алгоритма Хафа // XX Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2014) (г. Воронеж, 15–17 апреля 2014 г.): сб. тр. Т. 3. Воронеж, 2014. С. 1584–1594.
5. Hough P.V.C. Methods and means for recognizing complex patterns: pat. US no. 3,069,654. Dec. 18, 1962.
6. Illingworth J., Kittler J. A survey of the Hough transform // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 1988. Vol. 44, no. 1. P. 87–116. DOI: [10.1016/S0734-189X\(88\)80033-1](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(88)80033-1)
7. Deans R.S. The Radon Transform and Some of Its Applications. Malabar: Krieger. 2007. 296 p.
8. Elazar M. Search radar track-before-detect using the hough transform. MS in Electrical Engineering. Monterey, 1995. 139 p.

## Target Detection based on the Hough Transform

Semenov A. N.<sup>1,\*</sup>

\* [semenov.an@bmstu.ru](mailto:semenov.an@bmstu.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** radar, Hough transformation, noncoherent integration

---

The article considers a nonparametric target detection method for radar signals on the basis of target trajectory detection using the Hough transform. Unlike a traditional sequential observation of the radar space and making decision of a target presence for each radar resolution element, a use the Hough transform is based on the processing and analysis of radar data accumulated in the form of images during the observation period. This approach enables us to overcome two difficulties that are typical for the traditional method of processing, namely deteriorating probability to detect high-speed targets because of the target migration between the range-resolution cells and information loss on the targets with weak echo-signals, which were wrong recognized as an absent target.

The essence of detection algorithm based on the Hough transform is the following. Radar data accumulated for several coverage periods and represented in the form of images is compared with the primary low threshold. A set of points passed the threshold is transmitted from the space coordinates in the image to the parametric space of possible trajectory parameters as parametric sinusoidal lines. For each unit cell in the parameters space the number of its intersections by the parametric lines is calculated, with the result stored in a two-dimensional array, i.e. accumulator. After processing of all the image points exceeding low threshold, data stored in the accumulator are compared with the second threshold. Points exceeding the second threshold will characterize the trajectory parameters of the detected targets. Knowing these parameters a trajectory of the detected target can be recovered.

The paper presents analytical equations that allow us to analyze the radar system. It shows that the use of Hough transform allows a 2.5 times improvement of the average range of target detection as compared to using non-coherent signal integration.

### References

1. Fedorov I.B., Slukin G.P., Nefedov S.I. Prospects of Using Technology of Long-term Coherent Acquisition in Surveillance Radar Stations. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.*

*Priborostroenie = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering*, 2005, spec. is., pp. 112-131 (in Russian).

2. Carlson B.D., Evans E., Wilson S. Search Radar Detection and Track with the Hough Transform. I. System Concept. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 1994, vol. 3, no. 1, pp. 102–108. DOI: [10.1109/7.250410](https://doi.org/10.1109/7.250410)
3. Kononov A.A. *Osnovy traektornoy obrabotki radiolokatsionnoy informatsii. Chast' 1* [Radar tracking processing. Part 1]. St. Petersburg, SPbSU Publ., 2013 (in Russian).
4. Monakov A.A. Target detection for survey radars based on Hough algorithm. *20 Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz" (RLNC-2014): sb. tr.* [Proc. of the 20 International Scientific and Technical Conference "Radiolocation, Navigation, Communication" (RLNC-2014)], Voronezh, 15–17 April, 2014. Vol. 3. Voronezh, 2014, pp. 1584–1594 (in Russian).
5. Hough P.V.C. Methods and means for recognizing complex patterns. Pat. US no. 3,069,654. Dec. 18, 1962.
6. Illingworth J., Kittler J. A survey of the Hough transform. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1988, vol. 44, no. 1, pp. 87–116. DOI: [10.1016/S0734-189X\(88\)80033-1](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(88)80033-1)
7. Deans R.S. *The Radon Transform and Some of Its Applications*. Malabar, Krieger, 2007. 296 p.
8. Elazar M. *Search radar track-before-detect using the Hough transform. MS in Electrical Engineering*. Monterey, 1995. 139 p.