

УДК 004.942

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ МАЛЫХ ОТНОШЕНИЯХ СИГНАЛА К ШУМАМ****Артемьев В.М., Наумов А.О.***Институт прикладной физики НАН Беларуси***Костромицкий С.М.***Центр радиотехники НАН Беларуси***Введение**

Обработка радиолокационных измерений с целью обнаружения сигналов объектов и измерения их координат осуществляется на основе теории статистических решений [1]. При этом для получения оптимального решения используется энергетический признак в виде отношения сигнала к шумам (ОСШ) в полосе ширины спектра полезного сигнала. Как правило, в соответствии с критерием Немана-Пирсона, на практике задаются малыми значениями вероятностей ложных тревог ( $F_c \sim 10^{-7} - 10^{-5}$ ) и стремятся получить максимальные уровни вероятностей правильного обнаружения сигналов ( $D_c$ ). Этого можно добиться при ОСШ по мощности  $\rho > 30$  [2], что обеспечивает однозначность обнаружения. Для повышения ОСШ используют три основных способа: увеличение мощности излучения, некогерентное или когерентное накопление энергии принятого сигнала и использование сложных сигналов. В принципе накопление позволяет получать желаемые величины ОСШ, однако требует, чтобы за время накопления параметры сигнала и координаты объекта оставались неизменными. Их изменение снижает допустимое время накопления и тем самым приводит к малым значениям ОСШ.

Одним из способов решения задачи повышения ОСШ движущихся объектов является использование дополнительного признака обнаружения в виде учета параметров движения объекта, например, коррелированности во времени координат траектории движения. Это приводит к использованию метода одновременного обнаружения и сопровождения (track before detect) [3]. В имеющихся публикациях, например [4, 5], решение такой задачи осуществляется на основе апостериорного статистического (байесовского) подхода, что требует знания априорной статистики, как входных сигналов, так и параметров траектории движущегося объекта. Для такого подхода ха-

рактерно использование метода многоочечной аппроксимации функций плотности распределения вероятностей (partical filtering) [6]. При этом анализу подвергаются все элементы разрешения исследуемого пространства, что приводит к решению задач высокой размерности и требует больших вычислительных затрат.

В данной работе для обнаружения движущихся объектов, в отличие от критерия Немана-Пирсона, задаются высоким уровнем правильного обнаружения сигнала  $D_c \sim 0.8 \div 0.9$ . Это требует использования низкого порога обнаружения, что приводит к существенному росту числа ложных тревог. Для решения задачи обнаружения предлагается использовать метод селекции, являющийся одним из принципов самоорганизации [7]. В результате задача обнаружения сводится к селекции полезного сигнала среди совокупности ложных тревог, для чего можно использовать признаки параметров движения объекта.

Для учета этих параметров требуется периодическая последовательность измерений, на основе которых строятся траектории движения всех сигналов (полезного и ложных тревог), осуществляется селекция наиболее подходящей из них к траектории объекта и производится решение об обнаружении по траекторным признакам.

**Формулировка задачи**

Измерения в радиолокации могут осуществляться путем сканирования пространства по координатам дальности, радиальной скорости и угловым координатам периодически во времени. Первоначально производится быстрое сканирование во всех диапазонах изменения координат объекта с интервалом  $\tau_0$ , в течение которого их значения можно полагать постоянными. Затем оно повторяется с периодом  $T_0 \gg \tau_0$  и за это время значения координат могут изменяться за счет движения

объекта. Сканирование может осуществляться отдельно по каждой из координат (одномерный случай) или совместно (многомерный случай). Непрерывный по времени выходной сигнал приемника в пределах интервала  $\tau_0$  представляется в виде смеси шума и полезного сигнала, который обрабатывается пороговым устройством (квантователем), преобразующим непрерывный сигнал в бинарный. В дальнейшем полагаем, что элементы разрешения и длительности квантованных сигналов много меньше интервала  $\tau_0$ , поэтому бинарные сигналы на оси координат  $x$  можно полагать точечными.

При низких порогах  $h$  за счет возрастания вероятностей ложных тревог появляются шумовые точечные сигналы, которые при бинарном представлении будут неотличимы от полезного, что приводит к неоднозначности в обнаружении полезного сигнала. Для одномерного случая процедура формирования точечных сигналов изображена на рис. 1. На этом рисунке горизонтальная ось является осью непрерывного времени  $t$  с периодами  $T_0$ . Дискретные моменты времени  $k=0, 1, 2, \dots$  являются началом интервалов сканирования  $\tau_0$ , которые при условии  $\tau_0 \ll T_0$  полагаются точками на оси  $t$ . Значения координат  $x$  бинарных случайных точек откладываются на вертикальной оси в диапазоне от  $x_{\min}$  до  $x_{\max}$ . На  $k$ -ом периоде сканирования появляется случайное число точек  $n_k$ , координаты которых

обозначаются символом  $x_k(j)$ ,  $j = \overline{1, n_k}$ , где индекс  $j$  является номером случайной точки. Траектория объекта показана штриховой линией и в местах ее пересечения вертикальными линиями отмечено положение точек сигналов объекта  $x_{ck}$ . Поскольку вероятность  $D$  превышения порога квантования сигналом объекта меньше единицы, то имеют место пропуски точек объекта за счет замираний полезного сигнала. Для примера, такая ситуация приведена на рис. 1 в момент  $t = r$ . Ситуация, аналогичная изображенной, может быть представлена и для многомерного случая, при котором координату  $x_k$  можно рассматривать как вектор.

Сущность предлагаемого метода состоит в том, что по результатам сканирования строятся траектории всех точечных сигналов, как объектов, так и шумовых. В силу предположения о коррелированности координат точек сигналов объектов, в сравнении со статистической независимостью координат шумовых точек, в среднем длительности участков траектории объекта между моментами замирания полезных сигналов могут быть сделаны большими, чем у шумовых. На этой основе проводится селекция траектории объекта и осуществляется принятие решения об обнаружении. Вероятность правильного обнаружения по траекторным признакам  $D_m$  будет меньше, чем по сигнальным  $D_c$  и требуется минимизировать их разницу.

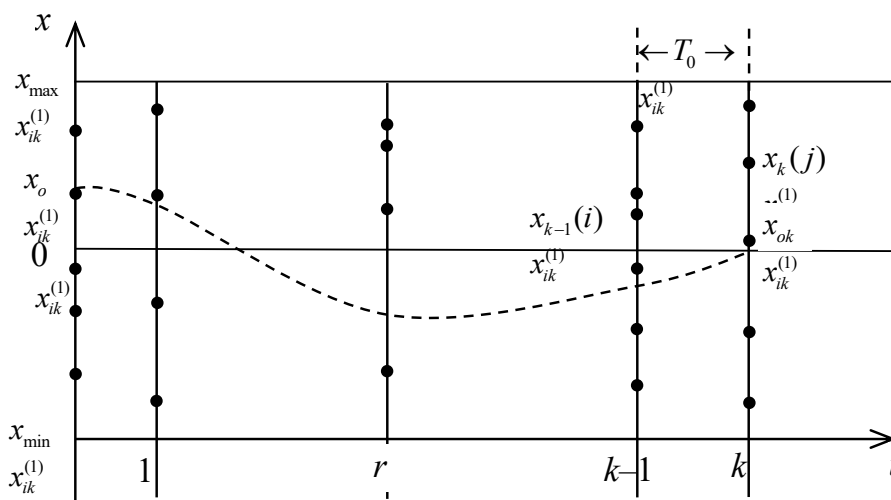


Рис. 1. Положения случайных точечных сигналов при одномерном сканировании

Таким образом, решение задачи обнаружения движущихся объектов состоит из этапов: периодического получения совокупности бинарных сигналов; формирования их траекторий во времени; селекции траекторий; принятия решений об обнаружении движущихся объектов по характеристикам выделенных траекторий.

### Формирование траекторий

В многомерном случае в момент  $k$  каждая точка объекта или шумов задается посредством координат в  $m$ -мерном пространстве и представляется вектором

$$\mathbf{x}_k(j) = [x_{1k}(j); x_{2k}(j); \dots; x_{mk}(j)]^T, \quad (1)$$

где  $j = \overline{1, n_k}$  есть номер точки, а верхний индекс  $T$  определяет операцию транспонирования. Пусть вектор координат траектории объекта в момент  $k-1$  равен  $\mathbf{x}_{ck-1}(j)$ , а в последующий момент имеет значение  $\mathbf{x}_{ck}(i)$ . Траектория объекта является коррелированной во времени функцией и это условие может задаваться различными способами. В данной работе оно определяется следующим образом: предполагается, что в дискретные моменты времени компоненты вектора приращения  $\mathbf{x}_{ck} - \mathbf{x}_{ck-1}$  не могут быть больше заданного и лежат в пределах  $\pm \delta_{lk}$  ( $l = \overline{1, m}$ ). При этом считается, что значения координат в этой области являются случайными величинами с равномерным законом распределения вероятностей. В этом случае уравнение значений  $\mathbf{x}_{ck}$  можно представить в виде уравнения первого порядка:

$$\mathbf{x}_{ck} = \mathbf{x}_{ck-1} + \mathbf{f}_k, \quad (2)$$

где  $\mathbf{f}_k$  есть  $m$ -мерный дискретный белый шум с равномерным законом распределения в области с компонентами  $\pm \delta_{lk}$ .

Подобная модель может быть усложнена, если полагать что значение вектора  $\mathbf{x}_{ck}$  будет зависеть не только от предыдущего значения  $\mathbf{x}_{ck-1}$ , но и от скорости изменения  $\mathbf{x}_{ck-1} - \mathbf{x}_{ck-2}$ . Уравнения второго порядка такой траектории определяется соотношением

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{ck} &= \mathbf{x}_{ck-1} + [\mathbf{x}_{ck-1} - \mathbf{x}_{ck-2}] + \mathbf{f}_k = \\ &= c_1 \mathbf{x}_{ck-1} + c_2 \mathbf{x}_{ck-2} + \mathbf{f}_k, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $c_1 = 2$ ,  $c_2 = -1$ . Аналогичным образом возможен учет и других более высоких уровней приращений, приводящих к уравнению

$$\mathbf{x}_{ck} = \sum_{r=1}^R c_r \mathbf{x}_{ck-r} + \mathbf{f}_k. \quad (4)$$

Рост числа приращений приводит к увеличению степени коррелированности траектории.

Формирование траекторий движения точек по результатам измерений производится следующим образом. В начальный момент времени  $k=0$  относительно положений каждой точки вектора  $\mathbf{x}_0$  задается строб  $\Delta_0$  с компонентами  $\pm \delta_0$  в области которого могут находиться или отсутствовать точки из следующего момента времени  $k=1$ . Если такие точки имеют место, то от каждого элемента вектора  $\mathbf{x}_0$  строятся траектории до соответствующих элементов каждой из точек, находящихся в стробе. Таким образом, происходит завязка шумовых траекторий или траекторий объектов. В последующие моменты времени  $k=1, 2, \dots$  процедура повторяется для всех точек. Здесь возможны несколько основных случаев.

Если точка  $\mathbf{x}_k$  соответствует координате объекта  $\mathbf{x}_{ck}$ , то следующее значение этой координаты в момент  $k+1$  с вероятностью  $D_c$  попадет в строб  $\Delta_{k+1}$  в силу заданной модели движения и построенный участок будет продолжением траектории объекта. При замираниях сигнала она прерывается. Таким образом, сформированная траектория объекта будет прерывистой.

Если исходная точка шумовая и в следующем за ней стробе точка вновь окажется шумовой, то произойдет формирование шумовой траектории, которая прервется, если в последующем стробе шумовой точки не будет. Поскольку положения шумовых точек случайны и статистически независимы, то в среднем длина шумовой траектории может быть меньше средней длины участка траектории объекта. Если после шумовой точки в стробе окажется точка объекта, то шумовая траектория переключается на траекторию объекта. Если длительность шумовой траектории меньше длительности объектовой, то это несущественно повлияет на формирование траектории объекта. Когда в стробе после шумо-

вой точки появятся как шумовая, так и точка объекта или несколько шумовых, то формируются несколько траекторий, из которых шумовые будут в среднем короче объектовой.

Таким образом, в результате формирования траекторий в области изменения координат появятся отрезки как шумовых, так и траекторий объектов. В среднем первые должны быть короче вторых и на этом факте основана процедура селекции траекторий объектов относительно шумовых.

Главным фактором предлагаемого метода является обеспечение того, чтобы средняя длительность шумовых траекторий была меньше средней длительности участков траектории объекта. Если траектории компонент вектора  $x_{ck}$  статистически независимы, то задача обнаружения может рассматриваться отдельно по каждой из них, что и делается в дальнейшем.

Ширину одномерного постоянного во времени строга обозначим через  $\Delta = 2\delta$  и будем определять его размеры числом элементов разрешения в нем. Если в строге находится точка объекта, то из-за замирания сигналов вероятность ее появления

$$p_c = D_c < 1. \quad (5)$$

Полагая, что замирания статистически независимы от одного периода сканирования к другому (быстрые флуктуации), то средняя длительность отрезка траектории  $\tau_c$  между

соседними замираниями будет равна величине [8]

$$\tau_c = \frac{1}{1 - D_c}. \quad (6)$$

Вероятность появления шумовой точки в элементе разрешения равна  $F_c$  и их положение полагаем статистически независимыми величинами как относительно координат, так и времени. Вероятность появления в строге  $\Delta$  хотя бы одной шумовой точки определяется соотношением

$$p_{ш} = 1 - (1 - F_c)^\Delta. \quad (7)$$

Средний размер длительности шумовой траектории будет определяться формулой

$$\tau_{ш} = \frac{1}{(1 - F_c)^\Delta}. \quad (8)$$

Рассматриваемый метод будет работоспособен при значениях  $\tau_{ш} < \tau_c$  и это условие можно выразить посредством коэффициента

$$\alpha = \frac{\tau_{ш}}{\tau_c} = \frac{1 - D_c}{(1 - F_c)^\Delta} < 1. \quad (9)$$

Соотношение можно конкретизировать, если процесс на входе квантователя имеет распределение Релея. Для этого случая справедлива формула связи между  $D_c$ ,  $F_c$  и  $\rho$  [1]:

$$F_c = D_c^{1+\rho}. \quad (10)$$

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента  $\alpha$  от величины ОСШ  $\rho$  при значениях вероятностей правильного обнаружения  $D_c = 0.5 - 0.9$  и  $\Delta = 4$ .

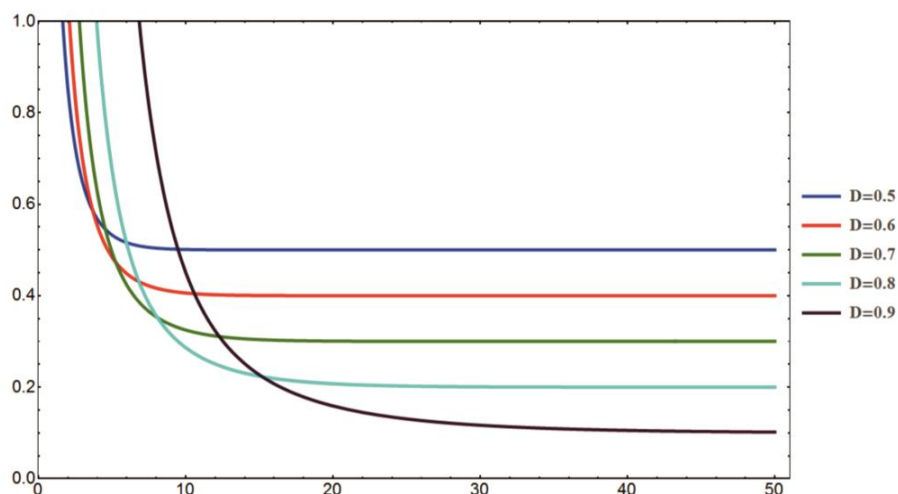


Рис. 2. Отношение средней длительности шумовой траектории к средней длительности участка траектории объекта  $\alpha$  от ОСШ  $\rho$  при  $\Delta = 4$

Из формулы (9) следует, что при  $\rho = \infty$  имеет место минимальное значение

$$\alpha_{\min} = 1 - D_c < 1. \quad (11)$$

Таким образом, величина вероятности правильного обнаружения  $D$  задает минимальную величину коэффициента  $\alpha$ , ниже которой предлагаемый метод будет неработоспособен.

### Селекция траектории объекта

Полагая, что условие  $\alpha > \alpha_{\min}$  выполнено, селекцию траектории объекта относительно шумовых можно выполнить путем фильтрации (отсеивания) траекторий по их длительностям с размерами  $\tau_{ш} < l < \tau_c$ . В силу статистического характера длительностей фильтруемых участков возможны случайные ошибки фильтрации двух типов: прохождение через фильтр шумовых траекторий; подавление фильтром траекторий объектов. Эти ошибки можно оценивать соответствующими вероятностями.

Вероятность появления хотя бы одной шумовой точки в составе  $\mathcal{Q}$  последовательных стробов, с учетом формулы (7), определяется выражением  $[1 - (1 - F_c)^\Delta]^\mathcal{Q}$ . На ее основе можно получить выражение для функции плотности распределения вероятности длительностей шумовых траекторий  $w_{ш}(\mathcal{Q})$  в виде

$$w_{ш}(\mathcal{Q}) = \frac{(1 - F_c)^\Delta}{1 - (1 - F_c)^\Delta} [1 - (1 - F_c)^\Delta]^\mathcal{Q}, \quad (12)$$

где первый множитель является коэффициентом нормировки, обеспечивающим равенство  $\sum_{\mathcal{Q}=1}^{\infty} w_{ш}(\mathcal{Q}) = 1$ . Если фильтр отсеивает траектории с длительностью, меньшей чем  $l$ , то вероятность ошибок первого типа, с учетом формулы (8), равна

$$P_{ш}(l) = \sum_{\mathcal{Q}=l}^{\infty} w_{ш}(\mathcal{Q}) = [1 - (1 - F_c)^\Delta]^\mathcal{Q} = \left( \frac{\tau_{ш} - 1}{\tau_c} \right)^l \quad (13)$$

Вероятность появления подряд точек объекта в  $\mathcal{Q}$  последовательных стробах равна  $p_c(\mathcal{Q}) = D_c^\mathcal{Q}$ . Тогда функция плотности распределения вероятности длительностей участков траектории объекта  $w_c(\mathcal{Q})$  получается в виде

$$w_c(\mathcal{Q}) = (1 - D_c) D_c^{\mathcal{Q}-1}. \quad (14)$$

Вероятность  $P_c(l)$  подавления фильтром участков траектории объекта равна

$$P_c(l) = \sum_{\mathcal{Q}=1}^l w_c(\mathcal{Q}) = 1 - D_c^l = 1 - \left( \frac{\tau_c - 1}{\tau_c} \right)^l. \quad (15)$$

Графики функций (13) и (15) для значений  $\tau_c = 5 \div 10$  и  $\tau_{ш} = 2 \div 5$  приведены на рис. 3.

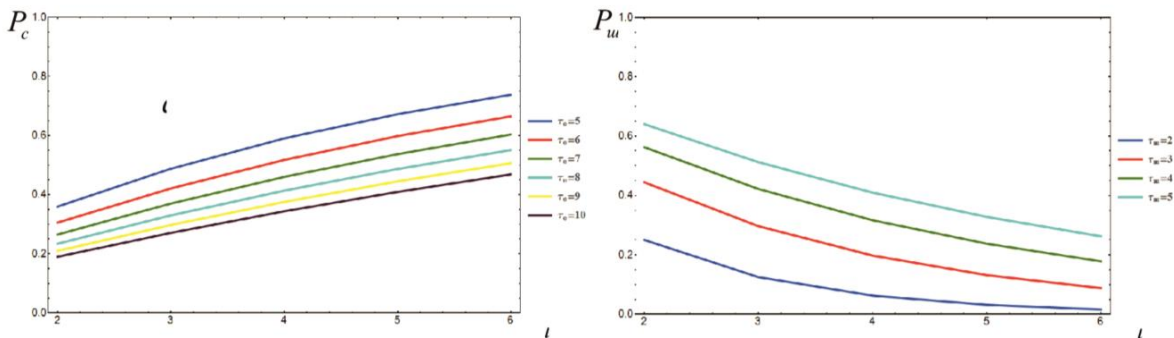


Рис. 3. Вероятности ошибок фильтрации отрезков траекторий объектов  $P_c(l)$  (а) и шумовых  $P_{ш}(l)$  (б) для фильтров размером  $l$

### Литература

1. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982, 624 с.
2. Blackman S.S. Multiple-target tracking with radar applications. MA: Artech House, 1986, 464 p.

3. Hadzagic M., Michalska H., Lefebvre E. Track-before detect methods in tracking low-observable targets: A survey // Sensors Trans Mag 54 (1), 2005, pp. 374-380.
4. Zwaga J.H., Driessen H., Meijer W.J.H. Track-Before Detect for Surveillance Radar: a Recursive Filter Based Approach // Proc. SPIE. 4728, Signal and Data Processing of Small Targets, 2002.
5. Boers Y., Driessen H., Torstensson J., Trieb M., Karlsson R., Gustafsson F. Track-before-detect algorithm for tracking extended targets // IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, 2006, vol. 153, no. 4, pp. 345-351.
6. Boers Y., Driessen H. Partical filters based track before detect algorithms // Signal and data processing of small targets Proceedings of SPIE, Vol. 5204, 2003. – p. 20-30.
7. Принципы самоорганизации. Под ред. ред. А.Я. Лернер. М.: Мир, 1966, 622 с.
8. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М: Наука, 1991. 383 с.