

**А.А. Коновалов**

## **АЛГОРИТМ ЗАВЯЗКИ ТРАЕКТОРИИ ПРИ МНОГОПОЗИЦИОННОМ СОПРОВОЖДЕНИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ\***

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический универси-  
тет «ЛЭТИ»*

Алгоритм обнаружения траектории в многопозиционном радиолокационном комплексе (МПРЛК) с асинхронным объединением отметок [1,2] должен иметь этап завязки, учитывающий наличие отметок от нескольких асинхронных РЛС, обнаруживающих одну и ту же цель в случайные моменты времени. Этот алгоритм будет иметь определенные отличия от традиционного (моностатического) алгоритма завязки, анализу которых посвящена данная статья.

Завязка траектории начинается после получения отметки, не отождествленной ни с одной из сопровождаемых траекторий [3] (рассматриваем завязку траектории одиночной цели). В РЛС и МПРЛК с синхронным объединением отметок длительность завязки кратна периоду обзора. В МПРЛК с асинхронным объединением отметок вместо числа обзоров задается время завязки  $T_{зав}$ , а в качестве критерия его выбора – вероятность получения требуемого числа отметок [1]. Строб имеет форму кольца с радиусами, пропорциональными максимальной и минимальной скоростям сопровождаемых целей и времени стробирования, учет погрешностей измерений достигается путем проверки попадания отметки в эллиптический строб, размер которого определяется требуемой вероятностью стробирования [2].

Особенностью стробирования при завязке траектории в МПРЛК по сравнению с моностатической РЛС является построение строга в момент получения очередной проверяемой отметки (точнее, набора отметок: поскольку разница во времени прихода отметок от одной РЛС, попадающих в зону строга, мала, они обрабатываются одновременно). В РЛС размер строга можно задать сразу, поскольку появление следующего измерения возможно только через период обзора. Напротив, в МПРЛК формируется последовательность стробов, время выставления и размер которых соответствуют случайным временам прихода отметок от разных РЛС.

---

\* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы" (государственный контракт № П521 от 14.05.2010).

Результатом стробирования является совокупность истинных (т.е. соответствующих цели) и ложных отметок, удовлетворяющих гипотезе о возможных максимальных и минимальных скоростях движения целей, причем истинных отметок может быть несколько. Согласно логике работы традиционного алгоритма, по каждой из стробированных отметок должна быть завязана отдельная траектория, при этом часть траекторий будут соответствовать одной и той же цели. Однако на выходе алгоритма обнаружения траектории должна остаться только одна траектория, остальные будут сброшены как ложные. В результате часть полезной информации не будет учтена, что снижает потенциальную точность алгоритма. Поэтому возникает необходимость разработки механизма объединения истинных отметок на этапе завязки, задачей которого будет являться фильтрация ложных отметок и формирование оценки вектора параметров траектории на основе истинных измерений нескольких РЛС.

Одним из вариантов решения этой проблемы является алгоритм на основе преобразования Хафа (Hough Transformation), в настоящее время активно использующийся для обнаружения траекторий радиолокационных целей [4]. Суть метода Хафа поясним на примере обнаружения прямой, проходящей через некоторую точку изображения. Уравнение прямой в полярных координатах имеет вид  $x \cos \theta + y \sin \theta = \rho$ , где

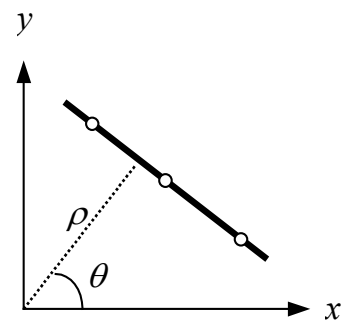


Рис. 1

$\rho$  – длина перпендикуляра от прямой к началу координат (см. рис. 1). Через каждую точку  $(x, y)$  можно провести несколько прямых с разными  $\rho$  и  $\theta$ , при этом каждой точке  $(x, y)$  изображения соответствует набор точек в фазовом пространстве  $(\rho, \theta)$ , образующий синусоиду. Набор точек прямой исходного пространства образует в фазовом пространстве набор синусоид, точка пересечения которых соответствует параметрам прямой  $\rho$  и  $\theta$ .

При обнаружении прямой вводится дискретизация пространства  $(\rho, \theta)$ , каждой его ячейке  $(\rho_{ij}, \theta_{ij})$  ставится в соответствие счетчик, соответствующий количеству точек  $(x, y)$ , лежащих на прямой  $x \cos \theta_{ij} + y \sin \theta_{ij} = \rho_{ij}$  и попадающих в данную ячейку. Ячейка с максимальным значением счетчика соответствует самой длинной прямой, которая принимается за траекторию.

Алгоритм обнаружения траектории на основе ПХ имеет ряд существенных достоинств: он является устойчивым по отношению к изменению характера распределения ложных отметок и пропуску отметок от цели, может использоваться для параллельного обнаружения сразу нескольких новых траекторий.

Обнаружение траектории по этому методу при малых ошибках измерений координат цели и отсутствии ложных отметок производится надежно и точно. Однако за счет погрешностей измерений точки пересечения синусоид расходятся, максимум «размывается», ложные отметки приводят к появлению лишних линий. Из-за возможного попадания отметок в соседние ячейки и наличия ложных отметок оценка точки пространства  $(\rho, \theta)$  с максимальным значением счетчика может оказаться ошибочной, что приведет к ухудшению результатов обнаружения траектории или к ее неправомерному сбросу. Для выбора размеров ячеек обычно используется информация о погрешностях измерений, однако как это делать при разноточных измерениях нескольких РЛС – вопрос пока не решен. Кроме того, ПХ воспринимает набор исходных данных как полученную одновременно статичную картину, информация о времени прихода отметок в ней не учитывается. В результате может возникнуть ситуация, когда ложные отметки, отстоящие довольно далеко от истинного положения цели в момент их получения, накладываются на положение цели в последующие обзоры, тем самым внося искажения в результат оценивания.

Возникает задача разработки алгоритма завязки, в котором учитывалось бы и время получения отметок, и разная точность измерений. Предлагаемая идея заключается в следующем. На малом временном промежутке, который занимает завязка, движение цели можно считать линейным с постоянной скоростью (это допущение используется практически во всех современных алгоритмах обнаружения траектории, в том числе на основе ПХ). Все отметки, принадлежащие цели, соответствуют одному вектору скорости, тогда как ложные отметки соответствуют разным «векторам скорости». На этой основе и возможно произвести объединение: оценить вектор скорости цели для всех пар «начальная отметка – стробированная отметка», и те, у которых оценка скорости близка, считать принадлежащими одной цели. (Можно использовать другие модели движения – с постоянной скоростью поворота, с постоянным ускорением и пр. – меняется только набор оцениваемых параметров).

Пусть получена первая отметка траектории, состоящая из вектора наблюдения  $\mathbf{z}_1 = [x_1, y_1]^T$  и его корреляционной матрицы  $\mathbf{P}_1$ . За время  $T_{заб}$  получено  $m-1$  стробированных отметок  $\mathbf{z}_i = [x_i, y_i]^T, i = 2, m$  с корреляционными матрицами  $\mathbf{P}_i$ , соответствующих положению цели в моменты времени  $\tau_i$ . Для каждой из стробированных отметок производится оценка скорости цели  $\hat{\mathbf{v}}_i = (\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_1) / \tau_i$ , корреляционная матрица этой оценки  $\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{v}}_i}$  равна:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\hat{v}_i} &= E[\mathbf{v}\mathbf{v}_i^T] = E\left[\left(\frac{\mathbf{z}_2 - \mathbf{z}_i}{\tau_i}\right) \cdot \left(\frac{\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_1}{\tau_i}\right)^T\right] = \\ &= \frac{1}{\tau_i^2} E\left[\left(\mathbf{z}_i\mathbf{z}_i^T - \mathbf{z}_i\mathbf{z}_1^T - \mathbf{z}_1\mathbf{z}_i^T + \mathbf{z}_1\mathbf{z}_1^T\right)\right] = (P_i + P_1) / \tau_i^2 \end{aligned}$$

(здесь учтено, что  $E[\mathbf{z}_1\mathbf{z}_1^T] = \mathbf{P}_1$ ,  $E[\mathbf{z}_i\mathbf{z}_i^T] = \mathbf{P}_i$ ,  $E[\mathbf{z}_1\mathbf{z}_i^T] = E[\mathbf{z}_i\mathbf{z}_1^T] = \mathbf{0}$ ).

Полученные оценки скорости для наглядности представим в виде точек в двумерном пространстве скоростей  $(v_x, v_y)$ . Для разделения полученных отметок на истинные и ложные можно воспользоваться методами кластерного анализа [5]. В кластерном анализе имеющееся множество объектов разбивается на подмножества (кластеры) так, чтобы каждый из них объединял объекты, сходные в некотором смысле, и при этом отличные от объектов других кластеров. В нашем случае выделение отметок от цели основано на том, что их рассеяние подчиняется нормальному закону распределения с известной для каждой отметки ковариацией  $\mathbf{P}_{\hat{v}_i}$ , тогда как ложные отметки рассеяны по зоне наблюдения по другому закону (который обычно полагается равномерным). Центр рассеяния для всех истинных скоростных измерений является общим, но неизвестным.

Основным вопросом процедур кластерного анализа является выбор метрики, устанавливающей степень несходства объектов. Поскольку вектор скорости задается в двумерном пространстве вещественных чисел  $\mathbb{R}^2$ , следует ориентироваться на евклидово расстояние  $d_{ije} = (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)^T$  или расстояние Махаланобиса  $d_{ijm} = (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)\mathbf{W}^{-1}(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)^T$ , где  $\mathbf{W}$  – матрица рассеяния. Последнее предпочтительнее, так как учитывает рассеяние объектов, описываемое матрицей  $\mathbf{P}_{\hat{v}_i}$ . Расстояния между парами векторов представляются в виде симметричной матрицы

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{1n} & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

Наиболее распространенной процедурой кластерного анализа является последовательная [5], в ходе которой сначала находится пара объектов с минимальным расстоянием, они образуют первый кластер, затем ищется пара следующих объектов с минимальным расстоянием и так далее, причем сами кластеры воспринимаются как объекты и расстояния между кластерами и объектами, а также между кластерами, вычисляются по определенным правилам (например, как среднее между входящими в них объек

тами). Результаты этой процедуры представляются в виде т.н. дендрограммы. Как показывают результаты моделирования, кластерный анализ можно использовать для селекции ложных измерений в пространстве скоростей, но существуют два нюанса. Во-первых, отсутствует четкая методика выбора порога расстояний для формирования кластера из истинных отметок. Во-вторых, этот алгоритм не в состоянии правильно отобрать истинные отметки, приходящие через небольшие временные промежутки после начальной – они дают довольно неточную оценку скорости, вследствие чего оказываются далеко от остальных истинных отметок. Можно использовать другие методы кластеризации, например алгоритм ФОРЕЛЬ, в котором в один кластер попадают объекты, отстоящие друг от друга на расстояние не больше заданного. Однако поскольку все алгоритмы кластерного анализа используют в качестве исходной одну и ту же информацию (матрицу  $\mathbf{D}$ ), то их результаты для данной задачи оказываются схожими.

Следовательно, нужен алгоритм кластеризации, который учитывал бы всю доступную информацию и производил более точную селекцию отметок.

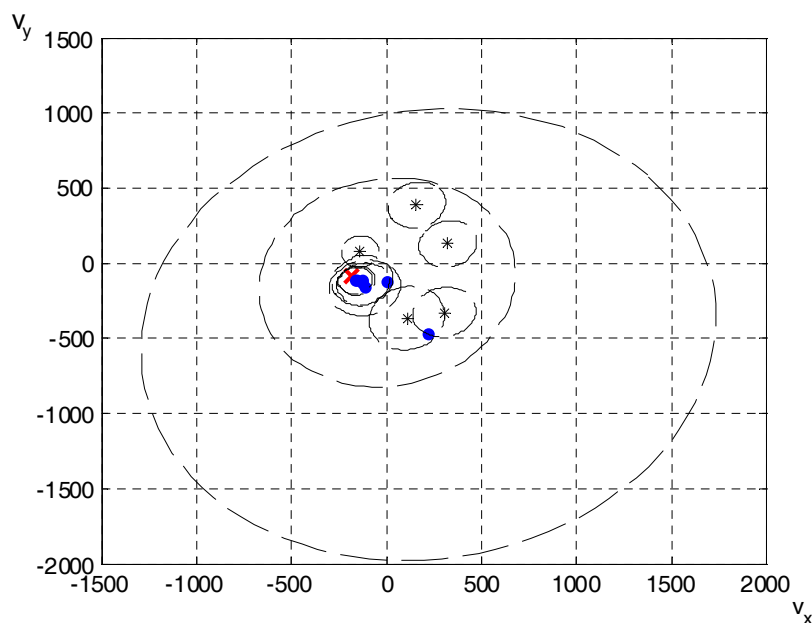


Рис. 2

Предлагаемый алгоритм основан на том, что эллипсы равных вероятностей всех истинных отметок должны (с заданной при их построении вероятностью) охватывать истинное значение скорости, и как следствие – располагаться в пространстве, охватывая друг друга. Напротив, эллипсы ложных отметок располагаются в случайных местах пространства  $(v_x, v_y)$ , их попадание внутрь эллипсов истинных отметок маловероятно. На рис. 2 приведен пример работы алгоритма, где точками обозначены истинные отмет

ки, звездочками – ложные, эллипсы вокруг них соответствуют вероятностям 0,9, истинное значение вектора скорости показано крестиком.

Таким образом, алгоритм селекции по скорости находит последовательности эллипсов, располагающихся внутри друг друга и наибольшую (по числу элементов) из них принимает за набор отметок от истинной цели.

Наконец, по выбранным отметкам надо сформировать оценку положения цели и вектора скорости. В предположении о линейном характере движения цели и нормальном распределении аддитивного шума измерений и с учетом неодинаковой точности измерений разных РЛС (то есть нестационарности процесса наблюдения) оптимальным устройством фильтрации (по критерию МСКО) является фильтр Калмана. Полученная с его помощью оценка вектора состояния цели, состоящего из двух пространственных координат цели и двух составляющих вектора скорости, и его корреляционная матрица являются выходными данными алгоритма завязки траектории.

#### Список литературы

1. А.А. Коновалов. Выбор критерия завязки траектории цели в многопозиционном радиолокационном комплексе с асинхронным объединением отметок. // Материалы конгресса «Цели развития тысячелетия» 2010, СПб, с. 100-104.
2. А.А. Коновалов. Формирование строга захвата траектории с учетом погрешностей радиолокационных измерений. // Материалы конгресса «Цели развития тысячелетия» 2009, СПб, том 1, с. 68-73.
3. С.З. Кузьмин. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВИЦ, 2000. 428 с.
4. Alexiev Kiril. Implementation of Hough Transform as Track Detector. // Proc. of the International Conf. On Multisource-Multisensor Information Fusion, 2000. Volume ThC4, pp. 11-16.
5. Б. Дюран, П. Оделл. Кластерный анализ. М.: Статистика, 1977. 128 с.