

УДК 621.396:969.1

Е.П. Ворошила, Е.П. Ворошил, В.И. Тисленко

## Алгоритмы завязки траекторий подвижных объектов\*

Представлен обзор существующих алгоритмов завязки, выполненный по современным отечественным и зарубежным источникам.

**Ключевые слова:** вторичная обработка, захват траектории, критерий завязки и сброса, метод трансформации.

### Введение

Задача формирования координат цели по поступившим от нее отметкам (наблюдениям) решается на этапе вторичной обработки (ВО) радиолокационной информации. В общем случае, в вычислительное устройство поступают отметки от неизвестного числа целей при неизвестном их местоположении в области контроля. Большинство алгоритмов ВО требуют априорную информацию о местоположении объектов и, привязывая к ним поступающие отметки, лишь уточняют их координаты. В этом случае важна предварительная операция завязки, которая подразумевает захват цели без любых априорных данных о ее местоположении.

### Процедура завязки

Процесс завязки существенно влияет на точностные характеристики всей ВО. На выходе блока завязки формируются данные о количестве целей в зоне контроля и предварительная информация об их траектории (текущее местоположение, скорость и направление движения). Методам захвата отметок от цели в литературе уделяется достаточное внимание [1–10]. В процессе выполнения операции завязки анализируются отсчеты, принадлежность которых к уже обнаруженным объектам или местным предметам не установлена. Необходимо проверить любой такой «свободный» отсчет: не является ли он возможным началом траектории некоторой цели. На этом этапе применяются как эвристические подходы (завязка по правилу « $m$  из  $n$ », метод трансформации, метод разветвления), так и алгоритмы, основанные на расчете отношения функций правдоподобия [3–5]. Для характеристики качества того или иного алгоритма завязки используют три основных показателя:  $f_{\text{тр}}$  – частоту ложно обнаруживаемых траекторий и  $T_{\text{тр}}$  – время обнаружения траекторий с заданной вероятностью правильного обнаружения  $D_{\text{тр}}$  с момента появления цели в зоне ответственности [1].

Величина  $f_{\text{тр}}$  – это среднее число ложно обнаруженных целей (траекторий) за единицу времени. Вероятность правильного обнаружения траектории  $D_{\text{тр}}$  является функцией времени. Совершенно очевидно, что существует тенденция увеличения  $D_{\text{тр}}(t)$  с увеличением времени наблюдения  $t$ , но всегда есть определенные ограничения на временные ресурсы, отводимые для принятия решения о наличии цели. Поэтому наряду с вероятностью правильного обнаружения траектории обязательно указывается время  $T_{\text{тр}}$ , которое необходимо для достижения вероятности  $D_{\text{тр}}$ . Для появляющихся и исчезающих объектов, помимо принятия решения об обнаружении траектории, приходится принимать отдельные решения и о сбросе траекторий. Решение о сбросе может быть правильным, если сбрасывается исчезнувший объект или начавшая завязываться ложная траектория, а может быть ошибочным, если сбрасывается с сопровождения по тем или иным причинам (в том числе при срыве сопровождения в процессе фильтрации) траектория истинной цели. Характеристики  $f_{\text{тр}}$ ,  $T_{\text{тр}}$ ,  $D_{\text{тр}}(t)$  обнаружения траекторий зависят от большого числа факторов: качества информации, поступающей с выхода первичной обработки; используемых алгоритмов обнаружения; динамики изменения целевой и помеховой обстановки.

В целом задача обнаружения – измерения траекторных объектов может быть отнесена к динамической задаче проверки сложных гипотез в условиях нестационарной входной помеховой и целевой обстановки с широким диапазоном изменения внутренних парамет-

\* Статья написана в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (Государственный контракт № 02.740.11.0183).

ров и наличием ряда ограничений, также изменяющихся во времени. Общего решения этой задачи пока не существует.

Традиционно в условиях достаточно хорошего качества входной информации при выполнении операции завязки происходит обнаружение траектории и формирование предварительных данных о ее параметрах, при выполнении других операций – собственно сопровождение траектории и ее фильтрация. При усложнении целевой и помеховой обстановки достичь требуемых вероятностных и точностных характеристик удастся лишь на основе тесного взаимодействия всех операций ВО, реализующих не последовательное, а совместное обнаружение–оценивание траекторий. В этой ситуации алгоритм завязки отвечает за рациональное использование ресурсов РЛС, поддерживая компромисс между допустимым числом ложных траекторий, анализируемых алгоритмом ВО, скоростью завязки и ошибочным сбросом целевых отсчетов.

**Эвристический и логический метод**

Наиболее часто решение о завязке (предварительном обнаружении) траектории принимается логическим обнаружителем после получения в течение нескольких тактов наблюдения отсчетов, не противоречащих возможным перемещениям цели в пределах корреляционных стробов. Поскольку в канале наблюдения априорная информация о траекторных параметрах, как правило, крайне скудна, размеры строба при завязке выбираются большими, главным образом, исходя из представлений о максимальной и минимальной скорости возможных целей.

Пусть временное окно наблюдений состоит из  $N$  тактов. Когда число обнаруженных отметок во временном окне превысит определенную величину, то завязывается потенциальная траектория, в противном случае окно сдвигается на один такт вперед (завязка по правилу  $M$  из  $N$ ) [5]. Под потенциальной понимается траектория, которая требует дальнейшего подтверждения на последующих тактах ВО, иначе она будет сброшена с контроля как ложная. Недостаток подходов на основе правила  $M$  из  $N$  состоит в том, что при большой плотности помех будет сформировано множество потенциальных траекторий. Для уменьшения вероятности завязки ложной траектории необходимо увеличивать  $N$ , но тогда будет расти время, необходимое для завязки траектории. Для понижения числа потенциальных траекторий эвристический метод использует информацию о скорости и ускорении цели, а логический – предсказание и стробирование.

*Эвристический метод*

Пусть  $r_i, i=1,2,...N$  – наблюдения положения цели на  $N$  тактах. При эвристическом методе траектория завязывается, если любые  $M$  отметок на этих  $N$  тактах удовлетворяют следующим требованиям:

1. Измеренное значение скорости или ее оценка больше некоторой минимальной величины  $v_{\min}$  и меньше максимальной  $v_{\max}$ .
2. Измеренное значение ускорения или его оценка меньше максимальной величины  $a_{\max}$ .

Математическое описание этих требований:

$$v_{\min} \leq \left| \frac{r_i - r_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right| \leq v_{\max}, \quad \left| \frac{r_{i+1} - r_i}{t_{i+1} - t_i} - \frac{r_i - r_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right| \leq a_{\max} \cdot (t_i - t_{i-1}).$$

Для уменьшения вероятности формирования ложных траекторий используется еще одно требование, связанное с углом  $\phi$ , – угол между векторами  $r_{i+1} - r_i$  и  $r_i - r_{i-1}$ :

$$\phi = \cos^{-1} \left[ \frac{(r_{i+1} - r_i) \cdot (r_i - r_{i-1})}{|r_{i+1} - r_i| \cdot |r_i - r_{i-1}|} \right].$$

Требование по углу записывается следующим образом:  $|\phi| \leq \phi_0$ , где  $0 < \phi_0 \leq \pi$ . Если  $\phi_0 = \pi$ , то это значит, что ограничение по углу  $\phi$  снято.

*Логический метод*

Пусть  $z_i^k(t)$  –  $k$ -я компонента  $i$ -го наблюдения в момент времени  $t$ . Вектор разности  $\mathbf{d}_{ij}(t)$  для  $k$ -х компонент наблюдений  $z_i(t)$  и  $z_j(t+1)$ :

$$\mathbf{d}_{ij}(t) = \max \left[ 0, z_j^k(t+1) - z_i^k(t) - v_{\max}^k \cdot t_s \right] + \max \left[ 0, -z_j^k(t+1) + z_i^k(t) + v_{\min}^k \cdot t_s \right],$$

где  $t_s$  – временной интервал между двумя тактами.

Последнее выражение показывает, что если  $z_i^k(t)$  попадает в интервал  $\left[ z_i^k(t) + v_{\min}^k \cdot t_s, z_i^k(t) - v_{\max}^k \cdot t_s \right]$ , то вектор разности  $d_{ij}^k(t) = 0$ . Иначе он определяется отклонением от границ этого интервала. Это отклонение может быть обусловлено ошибками измерений. Предполагая, что ошибка наблюдений некоррелирована, гауссова с нулевым средним и ковариацией  $R_i(t)$ , нормированный квадрат вектора разности запишется в виде

$$D_{ij}(t) = d_{ij}^T(t) \cdot [R_i(t) + R_j(t+1)]^{-1} \cdot d_{ij}(t).$$

Параметр  $D_{ij}(t)$  используется для привязки двух наблюдений  $z_i(t)$  и  $z_j(t+1)$  к одному объекту. Он сравнивается с определенным порогом  $\gamma$ , основанным на распределении Хи-квадрат.

Процесс поиска состоит из следующих этапов:

- По наблюдению, поступившему на первом такте, устанавливается (исходя из возможных минимальной и максимальной скорости цели) корреляционный строб. По любому наблюдению, попавшему в этот строб на следующем такте, формируется потенциальная траектория.

- Для каждой потенциальной траектории, состоящей из двух наблюдений, путем экстраполяции прямой линией (полиномом первого порядка) формируется строб на третьем такте. Размеры стога определяются предсказанной ковариацией ошибки наблюдений. Если в него попало несколько наблюдений, то для обновления параметров потенциальной траектории используется либо ближайшее к предсказанному значению, либо траектория расщепляется по всем наблюдениям.

- На следующем такте потенциальная траектория обновляется путем экстраполяции полиномом 2-го порядка, т.е. уже по трем точкам.

Данная процедура повторяется до тех пор, пока не выполнится критерий завязки  $M$  из  $N$ . Если в течение нескольких тактов в строб потенциальной траектории не попадает ни одной отметки, то она сбрасывается.

#### Завязка методом трансформации

Метод трансформации применяется в многопозиционных системах и основывается на следующем факте. Все точки, расположенные вдоль прямой линии в координатном пространстве, преобразуются в несколько линий, пересекающихся в одной точке в параметрическом пространстве [3]. Пусть имеется набор отметок (рис. 1, а) и модель движения объекта предполагается линейной. Этим отметкам в параметрическом пространстве (рис. 1, б) будут соответствовать прямые линии ( $c = x$  при  $b = 0$ , а сама прямая идет перпендикулярно к радиусу-вектору в координатном пространстве  $x(t)$ ).

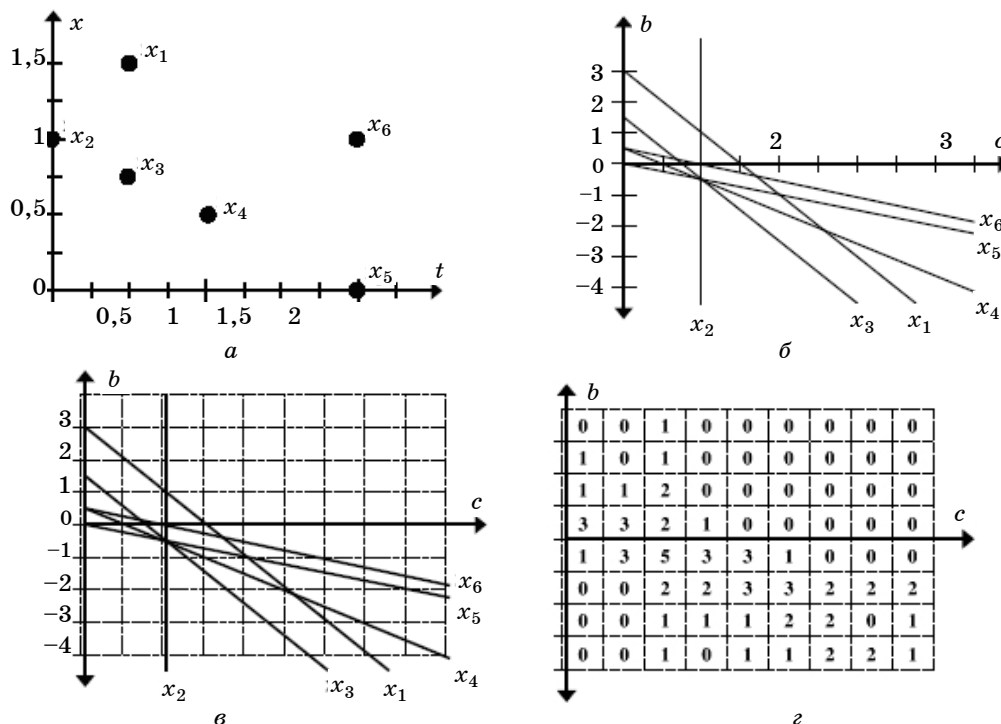


Рис. 1. Графическое пояснение к методу трансформации

В параметрическом пространстве строится сетка (рис. 1, в) и в каждой ячейке рассчитывается число проходящих через нее линий (рис. 1, г). Если это число больше некоторого порогового значения, то считается, что обнаружена новая цель, и к ней привязываются соответствующие (лежащие на одной линии в пространстве  $x(t)$ ) отметки. На рис. 1, в видно, что в одной точке пересекаются линии по отметкам  $x_2, x_3, x_4$  и  $x_5$ . Это означает, что они лежат на одной прямой в координатном пространстве, и по этим отметкам выполняется захват траектории цели.

От размеров сетки зависит точность работы алгоритма. При увеличении дисперсии наблюдений следует увеличить и размеры ячейки. Это предотвращает пропуск отметок, но в то же время повышается вероятность захвата ложной цели. К недостаткам алгоритма можно отнести достаточно большой объем вычислений и требование к памяти.

**Метод ветвления**

Согласно этому подходу [6] по наблюдениям строится дерево на рассматриваемых временных тактах (по одному дереву на каждый такт). Метод построения дерева позволяет принимать решение о состоятельности потенциальной траектории не только по предыдущим тактам, но и по следующим. Это показано на рис. 2.

На рис. 3 изображен пример построения дерева в одномерном пространстве. Дерево строится на каждом из  $M$  временных тактах. Корень дерева представляет собой совокупность всех отметок на данном временном такте. Затем идет продвижение по веткам дерева: совокупность наблюдений делится на 2 части и уже представляет собой отдельные поднаборы отметок (рис. 3, б). Такое деление продолжается рекурсивно, пока в каждом поднаборе не окажется только одна отметка – лист дерева (рис. 3, в). На рис. 4 изображена структура одного дерева.

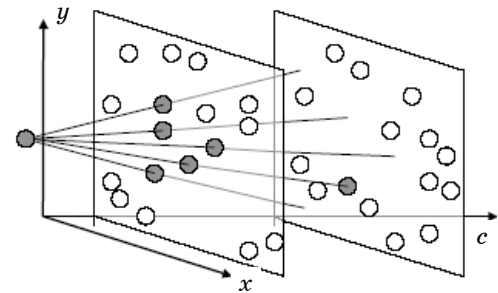


Рис. 2. Процесс отбраковки потенциальных траекторий на текущем такте по данным следующего такта

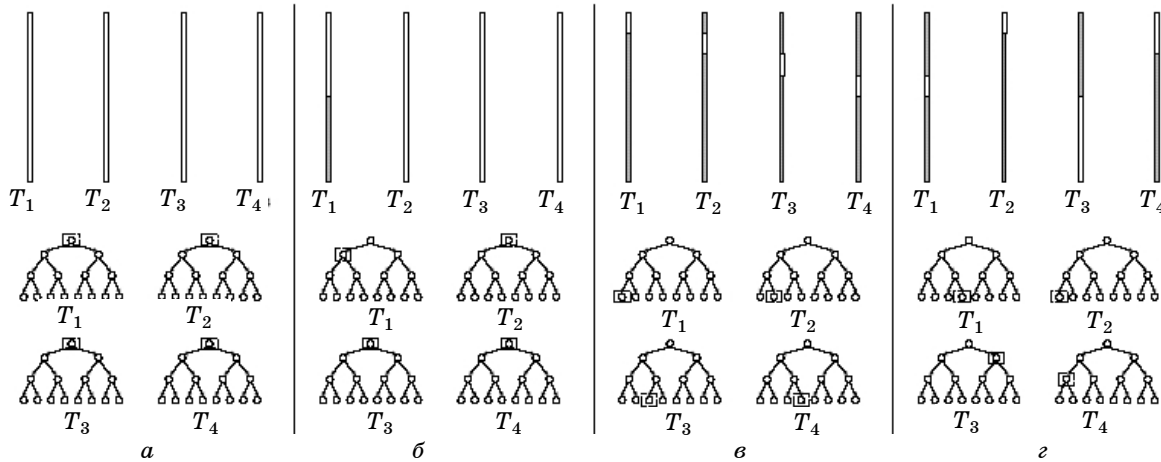


Рис. 3. Алгоритм построения дерева

Когда в результате продвижения на всех деревьях достигнуты листья (отдельные отметки), то алгоритм проводит тест по всем комбинациям этих отметок (одна отметка с каждого дерева-такта). Захват цели осуществляется по тем отметкам, которые удовлетворяют некоторой модели траектории (например, линейной) с учетом доверительных стробов. На рис. 5 изображен простейший пример, когда рассматривается линейная модель траектории в одномерном пространстве на пяти временных тактах. Между собой прямой линией можно соединить 4 группы отметок (обозначены незаштрихованными кружками).

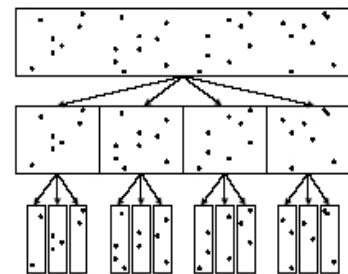


Рис. 4. Структура одного дерева

Последовательность наблюдений  $(x_{I_1}, \dots, x_{I_K})$  соответствует некоей модели движения, если существует траектория  $g$  такая, что выполняется условие

$$\delta^L[d] \leq x_{I_i}[d] - g(t_{I_i})[d] \leq \delta^H[d], \forall d, i; \quad d \in 1 \dots D, i \in 1 \dots K.$$

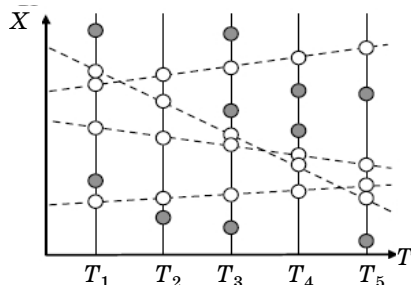


Рис. 5. Наблюдения в одномерном пространстве, потенциально принадлежащие равномерно движущимся целям

Это означает, что наблюдения принадлежат произвольной (линейной, квадратичной и др.) траектории  $g$ , если они попадают в интервал  $[g(t_{I_i})[d] + \delta^L[d], g(t_{I_i})[d] + \delta^H[d]]$  по каждой оси  $D$ -мерного пространства. Значения порога  $\delta^L$  и  $\delta^H$  определяют нижнюю и верхнюю границы интервала, и в совокупности представляют собой область в  $D$ -мерном пространстве.

#### Заключение

Обзор показал, что операция завязки во многом носит эвристический характер. Она учитывает по возможности всю доступную, обычно сравнительно скудную, априорную информацию. По этой причине для получения

нужных характеристик операции завязки требуется моделирование и дополнительное определение ее параметров в ходе испытаний в конкретных условиях.

#### Литература

1. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ. / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 319 с.
2. Информационные технологии в радиотехнических системах: учеб. пособие / И.Б. Федоров. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2004. – 764 с.
3. Kubica J. Fast and robust track initiation using multiple trees [Интернет]. – Режим доступа: [http://www.cs.cmu.edu/~jkubica/papers/kubica\\_tr0462.pdf](http://www.cs.cmu.edu/~jkubica/papers/kubica_tr0462.pdf), свободный.
4. Alexiev K.M. A Hough transform track initiation algorithm for multiple passive sensors [Интернет] / К.М. Alexiev, L.V. Bojilov. – Режим доступа: [http://mmsip.bas.bg/mmosi/publ/fusion\\_2000.pdf](http://mmsip.bas.bg/mmosi/publ/fusion_2000.pdf), свободный.
5. Leung H. Evaluation of multiple target track initiation techniques in real radar tracking environment // IEE Proc. Radar, Sonar and Navigation. – 1996. – Vol. 143, № 4. – P. 246–254.
6. Kubica J. A multiple tree algorithm for the efficient association of asteroid observation [Интернет]. – Режим доступа: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1081889/>, свободный.
7. Kubica J. Variable KD-tree algorithms for spatial pattern search [Интернет] – Режим доступа: [http://books.nips.cc/papers/files/nips18/NIPS2005\\_0433.pdf](http://books.nips.cc/papers/files/nips18/NIPS2005_0433.pdf), свободный.
8. Semerdjiev E. Multiple sensor data association algorithm using Hough transform for track initiation [Интернет] / E. Semerdjiev, K. Alexiev, L. Bojilov. – Режим доступа: [http://mmsip.bas.bg/mmosi/publ/fusion\\_98.pdf](http://mmsip.bas.bg/mmosi/publ/fusion_98.pdf), свободный.

#### Ворошилина Елена Павловна

Аспирант каф. радиотехнических систем  
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники  
Тел.: 8-923-408-46-71 (для ред.)  
Эл. почта: Raliens@kvadro.net

#### Ворошилин Евгений Павлович

Старший преподаватель каф. радиотехнических систем  
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники  
Тел.: 8-923-421-19-56 (для ред.)  
Эл. почта: ver2007@kvadro.net

#### Тисленко Владимир Ильич

Канд. техн. наук, доцент каф. радиотехнических систем  
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники  
Тел.: (3-822) 41-38-89, 8-913-802-61-41 (для ред.)  
Эл. почта: wolar1491@yandex.ru

E.P. Voroshilina, E.P. Voroshilin, V.I. Tislenko

#### Track initiation methods for moving targets

The article presents modern overview of techniques for track initiation.

**Keywords:** secondary treatment, track initiation, track formation and termination test, Hough transform algorithm.