

УДК 621.396.96

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ МЕТОДОМ ПРИТЯЖЕНИЯ ПРИ ОТОЖДЕСТВЛЕНИИ ТРАЕКТОРИЙ И ОТМЕТОК В СИСТЕМЕ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.А. АПОРОВИЧ, Р.В. БОНДАРЕНКО

*ОАО «АГАТ – системы управления» –
управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления»
пр. Независимости, 117, Минск, 220114, Беларусь*

Поступила в редакцию 25 ноября 2014

Приведены результаты разработки и исследования алгоритма экстраполяции методом притяжения при отождествлении траекторий и отметок в системе вторичной обработки радиолокационной информации.

Ключевые слова: обработка радиолокационной информации, групповое сопровождение, отождествление, притяжение, траектория, экстраполяция.

Введение

Одной из операций вторичной обработки радиолокационной информации (РЛИ) является сопровождение траекторий целей по новым отметкам, поступающим от радиолокационной станции (РЛС) на очередном обзоре [1]. Важнейшей частью данной операции является отождествление уже сопровождаемых траекторий и новых отметок. При отождествлении осуществляются: экстраполяция траекторий на время локации новых отметок и привязка экстраполированных отметок (ЭО) к отметкам целей (ОЦ) с учетом их взаимной близости.

В настоящее время качество отождествления при сопровождении групп целей остается неудовлетворительным, особенно когда расстояние между целями в группе соизмеримо со среднеквадратичной ошибкой (СКО) измерения их координат [2]. Особую сложность представляет сопровождение группы маневрирующих целей. Вследствие близкого взаимного расположения целей в группе и их сонаправленного движения, возможны случаи (особенно при совершении маневра группой), когда ОЦ, принятые на текущем обзоре РЛС, оказываются ближе к ЭО соседних целей, чем к собственным, что может привести к перепутыванию траекторий. Поэтому совершенствование процесса отождествления является актуальной задачей. В данной работе предложен новый алгоритм экстраполяции, позволяющий повысить качество отождествления.

Теоретический анализ

При вторичной обработке РЛИ для различных классов целей используются различные алгоритмы экстраполяции. Например, для аэродинамических целей (самолетов) на участках прямолинейного равномерного движения (без маневров) используется линейная экстраполяция. На участках маневров – линейная или квадратичная [1, 2]. Для баллистических целей часто применяется квадратичная экстраполяция [3]. Последующая привязка ЭО к ОЦ обычно производится методами линейного программирования, например, венгерским методом для задачи о назначениях [4].

Особенностью всех известных алгоритмов экстраполяции является то, что они оперируют только данными предыдущих обзоров РЛС и не учитывают взаимное «влияние» соседних траекторий и отметок.

Предлагаемый алгоритм экстраполяции основан на имитации процесса взаимного притяжения одноименно заряженных частиц и отталкивания разноименно заряженных частиц по аналогии с известным физическим явлением. Будем рассматривать систему всех траекторий как электромеханическую систему, в которой движущимися элементами являются радиолокационные отметки с единичными по модулю зарядами. Крайние отметки траекторий (ОТ) с предыдущего обзора РЛС условно определим как отрицательно заряженные частицы, ОЦ определим как положительные заряды. По аналогии с физическим процессом отрицательные ОТ притягиваются к положительным ОЦ и одновременно отталкиваются друг от друга, что приводит к их условному движению по направлению к ОЦ, но препятствует пересечению их траекторий. Очевидно, что ЭО по этому методу будут находиться близко к соответствующим ОЦ вследствие их взаимного притяжения.

Алгоритм

Приведем описание предложенного алгоритма экстраполяции на основе принципа притяжения.

Исходными данными алгоритма являются координаты J отметок с текущего обзора и K отметок с предыдущего обзора, а также вектора скоростей целей:

- $c[j] = (x_c, y_c, z_c)[j]$ – вектор координат j -й отметки на текущем обзоре (ОЦ);
- $p[k] = (x_p, y_p, z_p)[k]$ – вектор координат k -й отметки на предыдущем обзоре (ОТ);
- $v[k]_0 = (v_x, v_y, v_z)[k]_0$ – вектор скорости k -й цели.

На текущем обзоре происходит пошаговое построение экстраполированных траекторий по имитации движения ОТ к ОЦ. Количество шагов T принимаем равным длительности обзора РЛС в секундах (T_0). На каждом t -м шаге рассчитываются промежуточные ЭО, которые характеризуют траекторию условного движения ОТ. В дальнейшем при расчетах промежуточные ЭО принимаем за временное положение «движущихся» ОТ, определяя их как отрицательно заряженные частицы. Временной закон условного движения ОТ описывается уравнением

$$e[k]_t = e[k]_{t-1} + v[k]_t \cdot \partial t + a[k]_t \cdot \frac{\partial t^2}{2}, \quad (1)$$

где $e[k]_t = (x_e, y_e, z_e)[k]_t$ – вектор координат k -й промежуточной ЭО на t -м шаге, причем $e[k]_0 = p[k]$, а $e[k]_T = e[k]$ – вектор координат k -й конечной ЭО; $v[k]_t = (v_x, v_y, v_z)[k]_t$ – вектор шаговой скорости k -й отметки на t -м шаге; $a[k]_t = (a_x, a_y, a_z)[k]_t$ – вектор шагового ускорения k -й отметки на t -м шаге; $\partial t = T_0/T$ – длительность шага (здесь принято $\partial t = 1$ с).

На каждом шаге корректируются направления и величины шаговых скоростей и ускорений. Для этого заново определяются силы притяжения между всеми отметками, по ним рассчитываются результирующие силы (РС) для каждой ОТ. РС задают направления условного движения ОТ, необходимые для расчета шаговых скоростей отметки.

В физике кулоновские силы обратно пропорциональны квадрату расстояния между частицами. Исследование метода притяжения показало, что наилучший результат достигается в случае, если не учитывать расстояния между отметками, а использовать только направления действия сил притяжения. В данном случае принимаем величины сил притяжения равными единицам, а векторы РС рассчитываем по правилам сложения векторов. Исходя из этого, вектор силы, притягивающей k -ю ЭО к j -й ОЦ,

$$f_{kj}^+ = \frac{c[j] - e[k]_t}{\|c[j] - e[k]_t\|}, \quad (2)$$

где $\|c[j]-e[k]_t\| = \sqrt{(x_c[j]-x_e[k]_t)^2 + (y_c[j]-y_e[k]_t)^2 + (z_c[j]-z_e[k]_t)^2}$.

Вектор силы, действующей между k -й и i -й ЭО ($1 \leq i \leq K$),

$$f_{ki}^- = \begin{cases} -\frac{e[i]_t - e[k]_t}{\|e[i]_t - e[k]_t\|}, & i \neq k \\ 0, & i = k \end{cases} \quad (3)$$

где $\|e[i]_t - e[k]_t\| = \sqrt{(x_e[i]_t - x_e[k]_t)^2 + (y_e[i]_t - y_e[k]_t)^2 + (z_e[i]_t - z_e[k]_t)^2}$.

Вектор РС для k -й ЭО вычисляется путем суммирования всех векторов сил, относящихся к ней,

$$sf[k] = \sum_{j=1}^J f_{kj}^+ + \sum_{i=1}^K f_{ki}^-. \quad (4)$$

Шаговые скорости по абсолютной величине равны соответствующей начальной скорости $v[k]_0$. При расчете вектор шаговой скорости получается поворотом вектора начальной скорости по направлению РС (рис. 1)

$$v[k]_t = sf[k] \cdot \frac{\|v[k]_0\|}{\|sf[k]\|}, \quad (5)$$

где $\|v[k]_0\| = \sqrt{v_x[k]_0^2 + v_y[k]_0^2 + v_z[k]_0^2}$ – длина вектора начальной скорости k -й отметки;
 $\|sf[k]\| = \sqrt{sf_x[k]^2 + sf_y[k]^2 + sf_z[k]^2}$ – длина вектора РС k -й отметки.

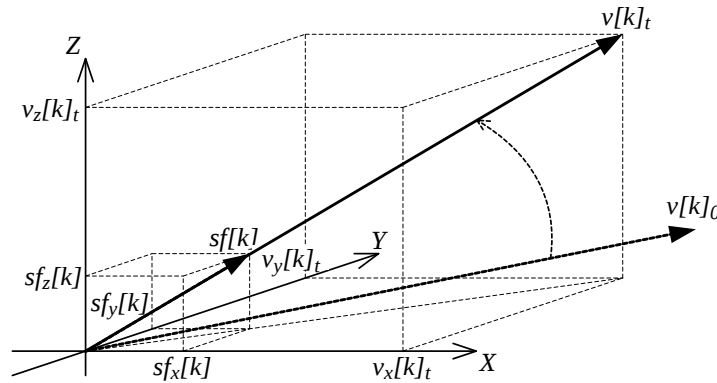


Рис. 1. Векторы РС и шаговой скорости

На рис. 1 показан процесс образования вектора шаговой скорости поворотом вектора начальной скорости в направлении РС для одной отметки. Длина вектора скорости сохраняется, меняется только направление.

Шаговые ускорения приобретаются за счет сил притяжения, действующих между каждой ЭО и всей группой ОЦ, поэтому при расчете используется расстояние от k -й ЭО до центра масс группы ОЦ. Вектор шагового ускорения для k -й ЭО

$$a[k]_t = \frac{1}{T-t+1} \cdot \left(\frac{\sum_{j=1}^J c[j]}{J} - e[k]_t \right) - v[k]_t. \quad (6)$$

В физическом смысле вектор ускорения корректирует направление РС ближе к центру масс группы ОЦ. Подставляя вектора шаговых скоростей и ускорений из формул (5) и (6) соответственно в выражение (1), рассчитываются вектора координат промежуточных ЭО. В итоге происходит построение T шагов. На последнем шаге рассчитываются вектора координат конечных ЭО, которые отождествляются в дальнейшем с ОЦ. Процесс пошаговой экстраполяции методом притяжения проиллюстрирован на рисунке.

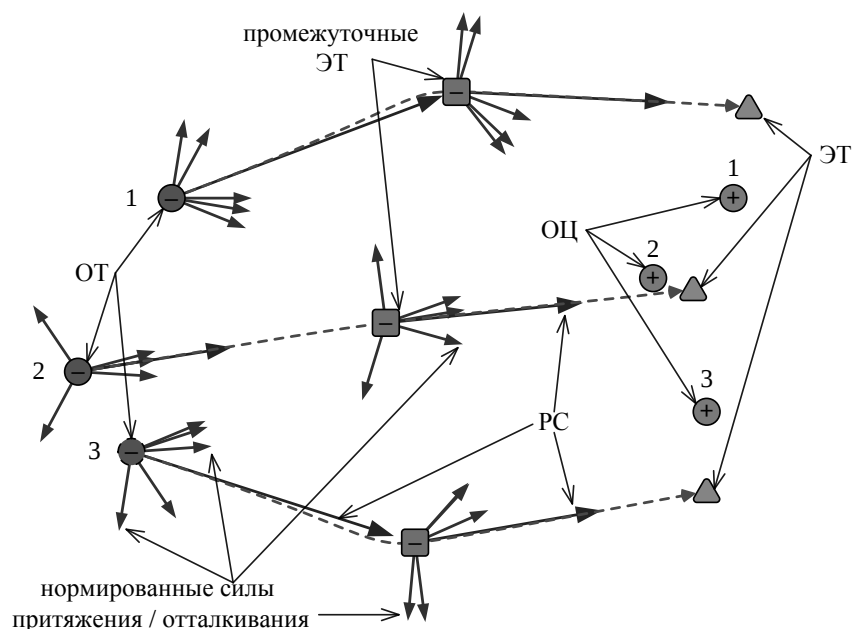


Рис. 2. Процесс пошагового построения условных траекторий

Как видно из рис. 2, ЭО от ОТ 1 оказалась вблизи ОЦ 1, ЭО от ОТ 2 оказалась вблизи ОЦ 2, аналогично ЭО от ОТ 3 оказалась вблизи ОЦ 3. Примененная методика не дала траекториям пересечься, также ЭО притянулись к ОЦ, а не «разошлись» по сторонам. Дальнейшая привязка даст правильный результат отождествления.

Моделирование

Для проверки эффективности предложенного алгоритма проведено моделирование процесса отождествления при использовании следующих методов экстраполяции:

- метод притяжения;
- линейная экстраполяция;
- квадратичная экстраполяция.

Моделировалось движение группы из K траекторий при маневре типа «змейка» с боковым сдвигом на расстояние ΔS . При $\Delta S = 0$ имитируется прямолинейное движение целей в группе. Скорость группы $V = 500$ м/с, период обзора РЛС $T = 10$ с, количество обзоров $N = 200$. Моделирование проводилось при различных дистанциях между целями ΔD , для различных СКО измерения РЛС σ , при различных вероятностях обнаружения РЛС P_d и при различных вероятностях появления ложной отметки P_f , распределенной равномерно в области помех. Вид траекторий приведен на рис. 3.

Отождествление осуществлялось в два этапа:

- экстраполяция одним из трех методов;
- привязка траекторий и отметок венгерским методом.

Эффективность отождествления оценивалась вероятностью правильного отождествления P . Данная вероятность определялась как отношение количества отождествлений одних и тех же пар «траектория – отметка» на двух обзорах подряд к общему количеству актов отождествления.

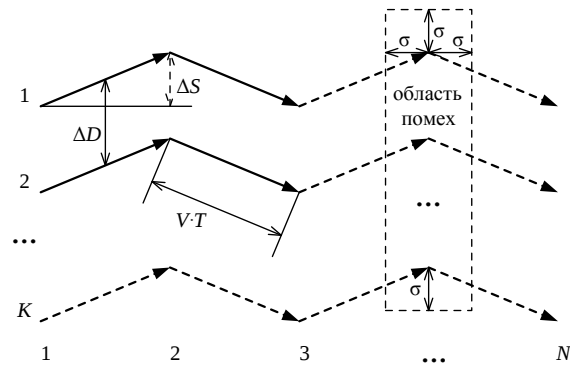


Рис. 3. Вид траекторий

Результаты

На рис. 4 приведены графики зависимостей вероятности P от различных параметров. Проведено сравнение качества отождествления в случае использования методов линейной и квадратичной экстраполяции. При сравнении использовались всевозможные комбинации условий, такие как различные СКО РЛС, количество сопровождаемых объектов, различные расстояния сдвига траекторий при совершении маневров объектами, различные расстояния между целями в группе. Также имитировались ложные отметки и пропуски отметок.

При изменении условий проведения опытов различным образом и в различных комбинациях, общее превосходство метода притяжения над другими методами экстраполяции сохраняется.

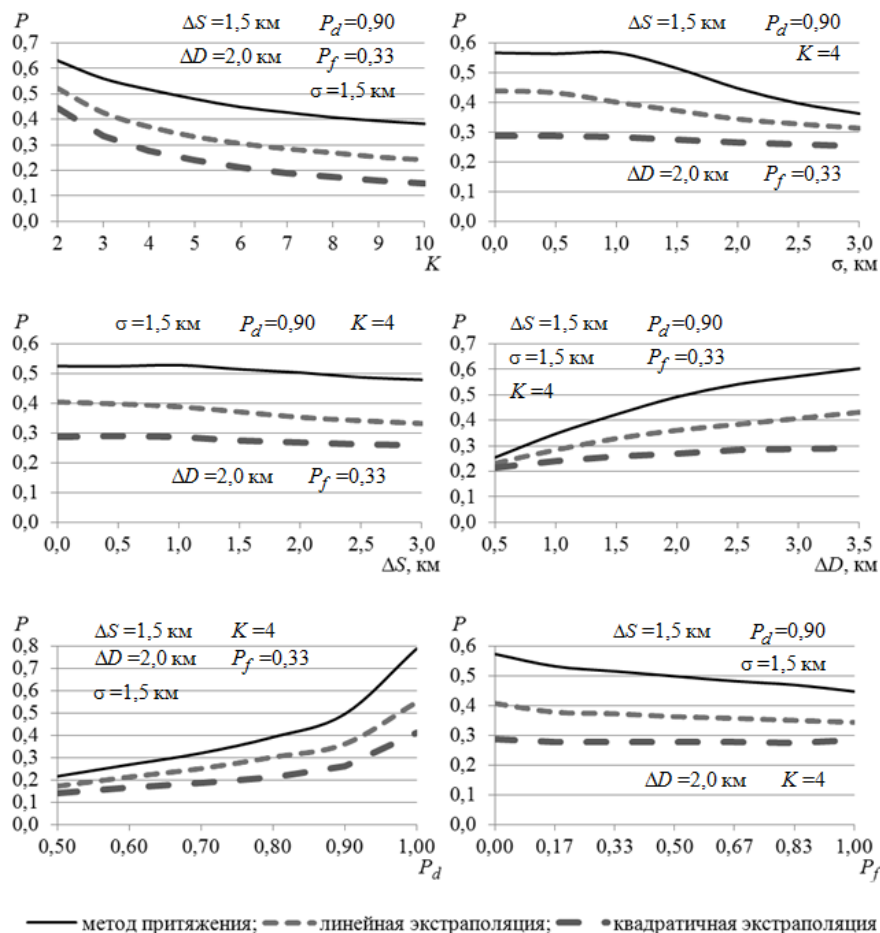


Рис. 4. Графики зависимостей вероятности правильного отождествления от различных параметров

Заключение

Предложенный алгоритм экстраполяции при отождествлении в составе вторичной обработки РЛИ основывается на принципе притяжения по аналогии с физическим явлением притяжения заряженных частиц.

Значения вероятностей правильного отождествления, рассчитанные для предложенного алгоритма, существенно превосходят значения, рассчитанные для других методов экстраполяции, что показывает высокую эффективность предложенного метода притяжения и позволяет рекомендовать новый метод для использования при вторичной обработке РЛИ.

EXTRAPOLATION BY ATTRACTION METHOD FOR IDENTIFICATION OF TRACKS AND PLOTS IN SYSTEM OF SECONDARY RADAR INFORMATION PROCESSING

U.A. APAROVICH, R.V. BONDARENKO

Abstract

One of the main problems in the secondary radar information processing (trace-while-scan) is the correct identification of sensed plots with corresponding tracks of targets being tracked by extrapolated marks. The proposed extrapolation algorithm is based on the principle of gravity by analogy with the physical phenomena of charged particles attraction. Modeling shows that probabilities of correct identification calculated according to this algorithm significantly higher than the values calculated by the methods of linear and quadratic extrapolation. It shows high efficiency of the proposed attraction method.

Список литературы

1. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М., 1974.
2. Blackman S., Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Boston, London, 1999.
3. Minvielle P. // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2005. Vol. 20, № 8. CF 1–14.
4. Романов А.Н., Фролов Г.А. Основы автоматизации систем управления. М., 1971.