

9. Карманов А.Г., Кнышев А.И., Елисеева В.В. Геоинформационные системы территориального управления: учебное пособие. СПб: университет ИТМО, 2015. 127 с.

*Рыжий Николай Витальевич, канд. техн. наук, начальник лаборатории, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,*

*Щельников Валерий Николаевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского*

#### THE USE OF EXPERT SYSTEMS WHEN CHOOSING A LAND PLOT FOR THE PLACEMENT OF OBJECTS FOR VARIOUS PURPOSES

N.V. Ryzhy, V.N. Shchelnikov

*The article describes the types and some features of conducting reconnaissance surveys when choosing sites for the construction of facilities for various purposes. The expediency of expert decision support systems and their implementation in the work of reconnaissance survey commissions is substantiated. The basic requirements for their construction dictated by the practice of reconnaissance surveys, as well as their preliminary architecture, taking into account the use of the possibility of using geoinformation systems, are considered.*

*Key words: reconnaissance surveys, land plot, expert systems, decision support systems, electronic maps, geoinformation systems*

*Ryzhy Nikolay Vitalievich, candidate of technical sciences, chief of the laboratory, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,*

*Shchelnikov Valeriy Nikolaevich, candidate of technical sciences, senior researcher, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy*

УДК 519.688

DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-408-409

#### АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЦЕЛИ

П.Н. Мельников

*Рассматривается алгоритм прогнозирования траектории движения цели, предназначенный для расчета упрежденной точки, при наведении орудия зенитного артиллерийского комплекса вооружения.*

*Ключевые слова: алгоритм прогнозирования траектории движения цели.*

Алгоритм прогнозирования траектории движения цели на период времени полета артиллерийского снаряда является наиболее проблемным в алгоритмическом обеспечении процесса наведения зенитного орудия в упрежденную точку. Вызвано это тем, что задача прогнозирования, принципиально, не имеет точного решения. Прогнозирование траектории цели осуществляется на основании анализа параметров траектории движения цели в прошлом вплоть до текущего момента времени (до выстрела). В будущем (после выстрела) артиллерийский снаряд летит по жесткой неуправляемой траектории, а траектория цели в любой произвольный момент времени может измениться. Параметры траектории цели может изменить человек (пилотируемый объект) или программа управления движением воздушного объекта.

Причем, ни момент, ни интенсивность изменения параметров движения цели стреляющему заранее не известны. Отсутствие к настоящему моменту времени информации о маневре цели в будущем и делает принципиально невозможным точное прогнозирование траектории ее движения.

В случае отсутствия «фактора дополнительного внешнего управления» движением воздушного объекта в течении интервала прогнозирования, наиболее общим принципом при разработке алгоритма прогнозирования можно принять *принцип сохранения в будущем параметров движения цели, которые она приобрела к настоящему моменту времени*. Иными словами, если будут известны все точные значения производных от координат на текущий момент времени, то теоретически возможно произвести точное прогнозирование траектории движения цели на произвольный интервал времени в будущем. Однако и в такой постановке не удастся получить точного решения задачи прогнозирования. Связано это с тем, что система сопровождения зенитного комплекса не может точно определить параметры траектории движения цели (например, дальность и угловое положение цели определяются с погрешностями). И как следствие, нет возможности точно оценить траекторные параметры цели (координаты, скорости, ускорения и т.д.). Что, в свою очередь, обусловит наличие погрешностей в прогнозной координате. Причем, чем больше интервал времени прогноза, тем больше погрешность предсказания.

Величины траекторных координат и производных оцениваются с помощью алгоритмов фильтрации входных сигналов, которые поступают от системы сопровождения цели. С ростом степени производной наблюдается падение достоверности ее оценки. Исходя из требуемой точности решения задачи встречи снаряда с целью, назначается допустимая точность в оценке прогнозной координаты цели. Допустимая точность прогнозирования накладывает ограничения на предельную величину интервала времени прогноза и максимальную степень производной в параметрах движения, которая учитывается в расчетах прогноза. Точность средств автоматического сопровождения скоростных воздушных целей, как правило, составляет единицы метров по дальности и единицы миллирадиан по углам. В этих условиях предлагается ограничиваться в алгоритме целевой фильтрации оценками только координат, скоростей и ускорений цели.

Ограничения в расчетах траекторных параметров (принимается схема двух производных) влияют на выбор системы координат для решения задачи встречи снаряда с целью. На основании анализа наиболее вероятных траекторий полета цели в зоне противовоздушной обороны (например, прямолинейные) назначается такая система координат, в которой выбранные идеальные траектории наиболее точно (без методических погрешностей) математически описываются в схеме двух производных. Для прямолинейных траекторий такой системой может служить прямоугольная система координат. Сферическая система координат не позволяет без методических погрешностей описать прямолинейные траектории полета цели в схеме двух производных. Однако следует заметить, что измерение положения цели осуществляется системой сопровождения зенитного комплекса в сферической системе координат (дальность и углы в горизонтальной и вертикальной плоскостях). Поэтому первичные погрешности измерения координат цели формируются в сферической системе координат. Преобразование координат цели из сферической в прямоугольную систему координат может быть получено для каждого текущего отсчета положения цели:

$$x_c = D_c \cdot \cos(e_c) \cdot \cos(q_c); \quad y_c = D_c \cdot \sin(e_c); \quad z_c = D_c \cdot \cos(e_c) \cdot \sin(q_c) \quad (1)$$

где  $D_c$  - дальность до цели относительно системы сопровождения;  $e_c$  - угол наклона вектора дальности к горизонтальной плоскости (угол места);  $q_c$  - угол между направлением на север и проекцией вектора дальности в горизонтальной плоскости (пеленг).

Пусть задача встречи снаряда с целью решается в земной прямоугольной системе координат [1], где ось  $X$  – лежит в плоскости местного горизонта и направлена на север, ось  $Z$  – лежит в горизонтальной плоскости и направлена на восток, ось  $Y$  – направлена вверх по местной вертикали. Задача прогнозирования траектории движения цели является составной частью задачи встречи снаряда с целью. Алгоритм прогнозирования, как часть задачи встречи, также будет строиться в прямоугольной системе координат. На выходе алгоритма сопровождения цели (алгоритм целевой фильтрации) вырабатываются оценочные величины параметров движения цели по траектории:  $(x_t, y_t, z_t)$  – прямоугольные проекции координат положения цели в текущий момент времени относительно точки установки орудия;  $(\dot{x}_t, \dot{y}_t, \dot{z}_t)$  – прямоугольные проекции скорости движения цели;  $(\ddot{x}_t, \ddot{y}_t, \ddot{z}_t)$  – прямоугольные проекции ускорения движения цели. Эти величины и будут являться входными для решения задачи прогнозирования траектории движения цели на время полета снаряда до упрежденной точки.

Следуя принятой схеме двух производных, аналитическая формула прогнозирования может быть получена как разложение непрерывной функции времени в ряд Тейлора в текущей точке траектории:

$$x_p = x_t + \dot{x}_t \cdot t_p + \ddot{x}_t \cdot t_p^2 / 2; \quad y_p = y_t + \dot{y}_t \cdot t_p + \ddot{y}_t \cdot t_p^2 / 2; \quad z_p = z_t + \dot{z}_t \cdot t_p + \ddot{z}_t \cdot t_p^2 / 2 \quad (2)$$

где  $(x_p, y_p, z_p)$  – координаты цели в точке прогноза;  $t_p$  – время прогнозирования.

Предложенная формула прогнозирования дает оптимальное решение не только для множества прямолинейных равноускоренных траекторий полета цели, но также и для множества криволинейных параболических траекторий. Траектория физического объекта является прямолинейной, если векторы скорости и ускорения находятся на одной прямой, либо ускорение отсутствует. Отклонения траектории от прямой линии наблюдается, когда между векторами скорости и ускорения образуется угол. Косинус угла между векторами находится из известного в аналитической геометрии уравнения:

$$\cos(\vec{v} \wedge \vec{a}) = (\dot{x}_t \cdot \ddot{x}_t + \dot{y}_t \cdot \ddot{y}_t + \dot{z}_t \cdot \ddot{z}_t) / v_t / a_t \quad (3)$$

где  $v_t = \sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{y}_t^2 + \dot{z}_t^2}$ ;  $a_t = \sqrt{\ddot{x}_t^2 + \ddot{y}_t^2 + \ddot{z}_t^2}$ .

Разложим вектор полного ускорения на три ортогональные составляющие:  $\vec{a}_s$  – продольное ускорение (вдоль вектора скорости);  $\vec{a}_n$  – поперечное ускорение (перпендикулярно вектору скорости), которое, в свою очередь, раскладывается на векторы поперечных ускорений  $\vec{a}_n^e, \vec{a}_n^q$  (в вертикальной и горизонтальных плоскостях, соответственно). Величины составляющих полного ускорения рассчитывается по формулам:

$$\begin{aligned} a_v &= (\dot{x}_t \cdot \ddot{x}_t + \dot{y}_t \cdot \ddot{y}_t + \dot{z}_t \cdot \ddot{z}_t) / v_t \\ a_n^e &= \ddot{y}_t \cdot v_t^g / v_t - \dot{y}_t \cdot (\dot{x}_t \cdot \ddot{x}_t + \dot{z}_t \cdot \ddot{z}_t) / (v_t \cdot v_t^g) \\ a_n^q &= (\ddot{z}_t \cdot \dot{x}_t - \ddot{x}_t \cdot \dot{z}_t) \cdot v_t / (v_t^g \cdot v_t^g) \end{aligned} \quad (4)$$

где  $v_t^g = \sqrt{\dot{x}_t^2 + \dot{z}_t^2}$  – горизонтальная скорость цели в текущий момент времени. Величина поперечного ускорения  $a_n(a_n^e, a_n^q)$  определяет кривизну траектории цели.

В качестве примера на рис.1 представлены графики изменения указанных ускорений, рассчитанные для следующей параболической траектории:

$$\begin{aligned} x_0 &= 2000\text{м}; \quad \dot{x}_0 = -45\text{м/с}; \quad \ddot{x}_0 = 2\text{м/с}^2; \quad z_0 = 1000\text{м}; \quad \dot{z}_0 = -30\text{м/с}; \quad \ddot{z}_0 = 4\text{м/с}^2; \\ y_0 &= 3000\text{м}; \quad \dot{y}_0 = -15\text{м/с}; \quad \ddot{y}_0 = 3\text{м/с}^2 \end{aligned}$$

Результаты расчетов показывают сложный характер изменения координат и составляющих полного ускорения для класса параболических траекторий движения цели.

Прогнозирование параболической траектории по соотношениям (2) реализуется точно (методические погрешности отсутствуют). На практике, как правило, только

отдельные участки траектории полета цели приближаются к параболическому представлению. К таким примерам можно отнести траектории различных типовых маневров летательных аппаратов: пикирование, петля, вираж, спираль, горка, боевой разворот. Отмеченные траектории не удастся точно (без методических погрешностей) прогнозировать в схеме двух производных.

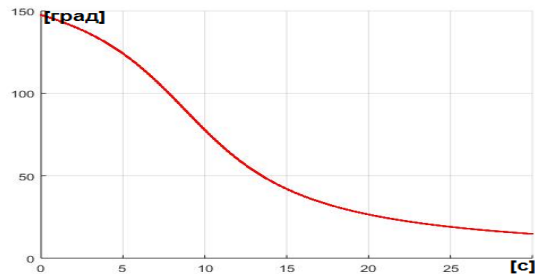


Рис. 1. Угол между векторами  $\vec{a} \wedge \vec{v}$

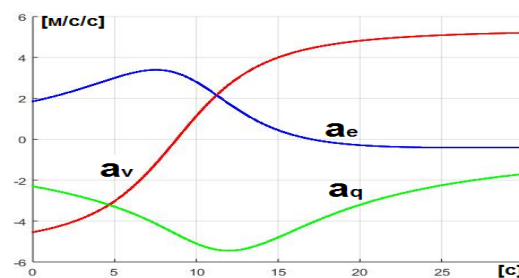


Рис. 2. Величины ускорений  $a_v(t), a_n^e(t), a_n^q(t)$

Рассмотрим наиболее проблемный для прогнозирования по соотношениям (2) вариант движения воздушного объекта – по окружности. Траектория является «сложной» при восстановлении в прямоугольной системе координат (бесконечный ряд производных). Траектория имеет строгое математическое описание и адекватно моделируется гладкой кривой. Для примера приняты следующие исходные (идеальные) параметры круговой траектории (рис.3):

$$v = 150 \text{ м/с}; \quad a = 25 \text{ м/с}^2; \quad r = v \cdot v / a; \quad x_0 = 1000 \text{ м}; \quad y_0 = 1000 \text{ м}; \quad z_0 = 1000 \text{ м};$$

$$x_t = r \cdot \sin[(v/a) \cdot t] + x_0; \quad y_t = r \cdot \cos[(v/a) \cdot t] + y_0; \quad z_t = z_0.$$

Координаты, скорости и ускорения рассчитываются с помощью трехкаскадного апериодического фильтра [2] с постоянной времени каждого каскада  $T = 0.5 \text{ с}$ . На рис.4 показаны ошибки в оценках координаты, скорости и ускорения ( $x_t, \dot{x}_t, \ddot{x}_t$ ) на выходе фильтра, работающего в схеме двух производных. Из результатов моделирования следует, что на точность прогнозирования поведения цели наибольшее влияние будут оказывать ошибки в оценках ускорения и скорости движения цели. Ошибки в оценках параметров (координаты, скорости, ускорения), а также параболическая зависимость прогнозной функции (2) приводят к ошибке в прогнозе места положения цели равной  $24 \text{ м}$  для времени прогноза  $t_p = 2.0 \text{ с}$ .

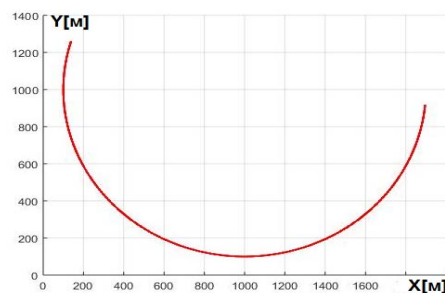


Рис. 3. Круговая траектория цели

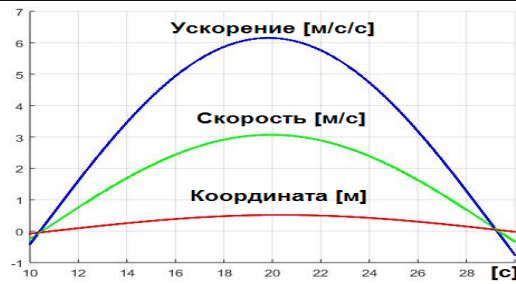


Рис. 4. Ошибки в оценках  $(x_t, \dot{x}_t, \ddot{x}_t)$

В качестве альтернативного способа прогнозирования траектории движения цели, а также в стремлении уменьшить методические ошибки прогнозирования круговых траекторий предлагается решать задачу прогноза в системе координат, связанной с вектором скорости цели. В этом случае, прямоугольные координаты прогноза находятся с помощью численного интегрирования системы дифференциальных уравнений на интервале  $[0...t_p]$ :

$$\begin{aligned} \dot{v} &= a_v; & \dot{\varepsilon}_v &= a_n^e / v; & \dot{q}_v &= a_n^q / v; \\ \dot{x} &= v \cdot \cos(\varepsilon_v) \cdot \cos(q_v); & \dot{y} &= v \cdot \sin(\varepsilon_v); & \dot{z} &= v \cdot \cos(\varepsilon_v) \cdot \sin(q_v). \end{aligned} \quad (5)$$

*Замечание.* Оценки  $a_v, a_n^e, a_n^q$  производятся по соотношениям (4), которые имеют особые точки при  $v_t^g = 0$ . Поэтому необходимо предусмотреть процедуры, ограничивающие прямой расчет по соотношениям (5) в районе нулевого значения  $v_t^g$ .

При расчетах по соотношениям (5) ошибка в прогнозе места положения цели становится равной 19[м] для времени прогноза  $t_p = 2.0[c]$ . Уменьшение постоянной времени фильтра на  $T = 0.25[c]$  приведет к снижению уровня ошибок в оценках параметров движения цели, и, как следствие, приведет к уменьшению ошибок прогноза до 13[м] и 8[м], соответственно двум рассматриваемым вариантам алгоритмов прогноза. Уменьшение постоянной времени целевого фильтра приведет к ухудшению свойств фильтра к подавлению входных высокочастотных шумов.

Сравним два способа прогнозирования (соотношения (2) и (5)) по точности предсказания для траектории полета цели типа пикирование. На рис.5 представлен график изменения нормальной перегрузки летательного аппарата при маневре пикирование. Цель пикирует с высоты 4000[м] со скоростью 300[м/с]. На рис.6 представлен график ошибок прогнозирования на интервал времени 2 секунды. Оценка параметров траектории полета цели определяется многокаскадным аperiодическим фильтром с постоянной времени каскада  $T = 0.25[c]$ . Расчет прогноза реализован по соотношениям (2) - красная линия графика и по соотношениям (5) - синяя линия графика.

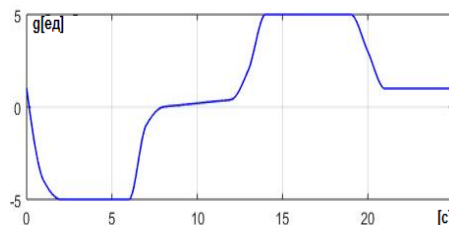


Рис. 5. Изменение нормальной перегрузки

Максимальные значения ошибок прогноза (3 пика на графике рис.6) вызваны резким изменением величины нормальной перегрузки при движении по пикирующей траектории. Как видно из графика ошибок прогнозирования (рис.6) высокий уровень ошибок связан не с ошибками в оценках параметров движения цели и не с ошибками

расчета прогнозных координат, а с «непредсказуемым» поведением (маневром) цели на траектории движения. Изменения в поведении цели на траектории, которые произойдут в будущие моменты времени, не удастся учесть в прогнозе, который рассчитывается в текущий момент времени. На участках траектории пикирования, где величина вертикальной перегрузки постоянная и равна  $\pm 5g$ , траектория движения цели близка к движению по окружности. И как следствие, ошибки прогнозирования, рассчитанные по соотношениям (5), имеют меньший уровень по сравнению с ошибками прогнозирования, рассчитанные по соотношениям (2). Важным замечанием по результатам проведенного анализа является то, что моделирование процессов прогнозирования осуществлялось на гладком входном сигнале, не подверженном искажениям помехами (ошибками), которые имеют место при сопровождении цели по траектории ее движения.

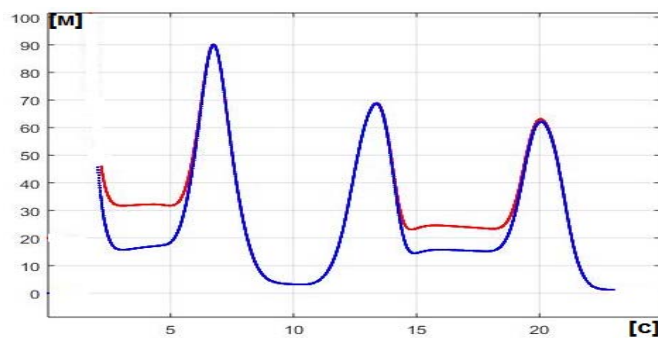


Рис. 6. Ошибки прогнозирования на 2с

В заключение рассмотрим вопросы, связанные с оценкой качества алгоритма прогнозирования. Оценка расхождения реальных и расчетных координат на момент времени в будущем не возможна по причине того, что в текущий момент времени неизвестны реальные координаты цели для некоторого момента времени в будущем. Предлагается оценивать расхождение не для будущего момента времени, а для настоящего момента времени. Производится сравнение текущей координаты с величиной прогнозной координаты, рассчитанной на момент в прошлом, сдвинутым от настоящего на интервал  $t_p$ .

$$S_{\Delta} = \sqrt{\{[x_p(t - t_p) - x(t)]^2 + [y_p(t - t_p) - y(t)]^2 + [z_p(t - t_p) - z(t)]^2\}}$$

Такое решение вносит запаздывание в оценку качества прогноза на интервал времени равный  $t_p$ . Однако, назначение величины  $t_p$  достаточно малой (единицы секунд) обеспечивает приемлемый компромисс. При реализации алгоритма потребуется запоминать (в циклическом буфере) результаты расчетов прогнозируемых координат цели ( $x_p, y_p, z_p$ ) в течении интервала прогнозирования  $t_p$ . Объем буфера для частоты решения задачи управления равной  $f$  составит  $w = 3 \cdot f \cdot t_p \cdot k$ , где  $k$  - длина представления числовых величин в байтах. Например, для  $f = 100[гц], t = 2[с], k = 4[байт]$ , объем буфера в оперативной памяти составит  $w = 2400[байт]$ .

### Список литературы

1. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения.
2. Мельников П.Н. Оценка параметров полиномиального сигнала способом апериодической фильтрации. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №.7. С. 192-197.

Мельников Петр Николаевич, канд. техн. наук, ведущим научный сотрудник, [peter@olvs.miee.ru](mailto:peter@olvs.miee.ru), Россия, Москва, Национальный исследовательский университет электронной техники

## ALGORITHM FOR PREDICTING TARGET TRAJECTORY

P.N. Melnikov

*The article considers an algorithm for predicting target trajectory, designed to calculate a preemptive point when pointing a gun of an anti-aircraft artillery armament complex.*

*Key words: algorithm for predicting target trajectory.*

Melnikov Peter Nikolaevich, candidate of technical science, researcher, [peter@olvs.miee.ru](mailto:peter@olvs.miee.ru), Russia, Moscow, National Research University of Electronic Technology

УДК 330.4

DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-414-415

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ МЕТОД АНТИРОБАСТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

С.И. Носков

*В работе приведен краткий обзор публикаций, в которых исследование предполагает разбиение исходной выборки данных на подвыборки. В частности, рассмотрены: метод разделения выборок на эквивалентные подвыборки; метод для оценки ковариационной матрицы многомерного отклика с учетом набора ковариат с использованием структуры случайного леса; влияние усечения обучающих данных при подборе деревьев регрессии; построение модели дерева классификации и регрессии для оценки риска наводнений на основе имеющихся данных для провинции Хунань; непараметрический метод для оценки распределения статистики отношения «сигнал-шум», когда шум принадлежит к довольно общему классу случайных процессов, которые охватывают как короткодействующие, так и далекодействующие зависимости, а также нелинейности. Решена задача определения параметров линейной регрессионной модели с помощью многокритериального метода антиробастного оценивания (МАО), в котором функция потерь представляет собой вектор, каждая компонента которого задана на сформированной подвыборке исходной выборки данных. Предложен алгоритм расчета векторов параметров, соответствующих паретовским вершинам многогранника, заданного соответствующим МАО ограничениям с векторной целевой функцией и состоящий в решении серии задач линейного программирования. При этом все множество паретовских оценок параметров может быть сформировано как объединение паретовских граней симплекса, представляющих собой выпуклые комбинации его паретовских вершин.*

*Ключевые слова: регрессионная модель, оценки параметров, многокритериальная функция потерь, метод антиробастного оценивания, множество Парето, задача линейного программирования.*

При построении регрессионных моделей сложных объектов иногда возникает необходимость в разбиении исходной выборки данных на подвыборки с тем, чтобы использовать его при уточнении некоторых характеристик будущей модельной конструкции. Так, в работе [1] предлагается метод разделения выборок на эквивалентные подвыборки, аналогичный тому, который уже был предложен в контексте многомерного