

ПОСТРОЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПАССИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ НЕЛИНЕЙНО ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА

Пюнинен С.А.,
док-р техн. наук, проф. Первухин Д.А.

Санкт-Петербургский государственный горный университет
Факультет приборостроения, информационных и электронных систем
Кафедра системного анализа и управления инновациями

Аннотация

В данной работе проводится структурный анализ систем определения координат и параметров движения объектов по угломерной информации, и даются рекомендации по построению эффективных методов решения задачи сопровождения нелинейно движущихся объектов.

Ключевые слова

Анализ траектории, реконструкция траектории, ортогональные полиномы, преобразование координат

Abstract

In this paper, we determine the structural analysis of systems of coordinates and parameters of the motion objects use bearings-only information, and provide recommendations for the construction of efficient methods for solving nonlinear driving the resistance of moving objects.

Keywords

Trajectory analysis, reconstruction trajectory, orthogonal polynomials, coordinate transformation

В современных условиях развития науки и техники для выявления объективных закономерностей и принципов функционирования сложных систем необходимо осуществлять их комплексное, как теоретическое, так и экспериментальное исследование [1,3,4].

В задачах управления и навигации активные системы обнаружения (радиолокационные, акустические, лазерные и т.п.) из-за затухания сигнала во внешней среде в 1,5 – 2 раза уступают по дальности пассивным системам. Кроме того, наличие в системах сопровождения активных средств, существенно увеличивает аппаратную составляющую навигационных комплексов, что крайне нежелательно при разработке навигационно-управляющих систем для маломерных судов и аппаратов.

Таким образом, остро встает вопрос о совершенствовании систем определения координат и параметров движения объектов, действующих в пассивном режиме.

Одним из наиболее широко применяемых способов сопровождения подвижных объектов является сопровождение по угломерной информации.

Общая постановка задачи, решаемой системой сопровождения, звучит так: «По данным об углах наблюдения подвижного объекта со стороны подвижного наблюдателя, необходимо определить местонахождение наблюдаемого объекта в каждый момент времени».

В течении последних 40 лет было разработано и усовершенствовано большое количество различных методов решения задачи определения КПДО УИ, наибольшее значение из которых получили: методы пеленгов, различные варианты фильтра Кальмана, фильтры частиц, Марковские модели, метод множественных моделей и некоторые другие.

Данные методы используют различные подходы к решению задачи, имеют собственные диапазоны адекватности и границы применимости. Очевидно, что такое обилие методов результат отсутствия системной методологии в изучении данного вопроса.

Несмотря на видимое многообразие, большинство из приведенных методов базируются на идентичных принципах, выявить которые позволит классификация данных методов по категориям, предложенным в настоящей работе.

Основные методы решения задачи

Для начала, произведем классификацию основных методов решения задачи по типу используемой математической модели.

Таблица 1. Классификация методов решения задачи сопровождения подвижных объектов по типу математической модели

Геометрические методы	Методы динамических систем
<ul style="list-style-type: none">• Метод 4-х пленгов• Метод N пленгов• Модиф. метод N пленгов	<ul style="list-style-type: none">• Фильтр Кальмана• Расширенный Фильтр Кальмана• Сигма-точечный фильтр Кальмана• Метод Марковских цепей

В основе всех геометрических методов лежит принцип геометрического расчета расстояний до наблюдаемого объекта. Положение объекта определяется, по данным угловых наблюдений в совокупности с данными о положении наблюдателя.

Точность данных методов сильно зависит от качества определения наблюдаемых углов и точности счисления местоположения наблюдателя.

Всем геометрическим методам присуща вычислительная простота. Данные методы не требуют для своей реализации априорной оценки КПДО, что позволяет успешно использовать их в качестве вспомогательных в других методах расчетов.

Среди прочих методов, геометрические методы играют важнейшую роль, так как обладают значительной вычислительной простотой и часто используются в качестве методов первого шага в более сложных методах.

В основе методов решения задачи определения КПДО построенных на принципах динамических систем, лежит построение динамической системы оценки параметров движения объекта. Данные угловых измерений служат для коррекции значений выходных параметров.

Построение систем ведется, как правило, на базе кинематического уравнения движения объекта наблюдения. В зависимости от сложности применяемого метода в кинематическом уравнении движения может быть учтена не только скорость, но и ускорение.

Динамические модели, позволяют корректировать параметры заложенного в модель кинематического уравнения, однако, если движение наблюдаемого объекта не укладывается в заданную модель (например, объект активно маневрирует), происходит существенное снижение достоверности моделирования.

Среди преимуществ динамических моделей, часто упоминают возможность их работы в реальном времени. Действительно, объем вычислений, осуществляемых итерационным фильтром на каждом шаге, может быть существенно меньше, чем в алгоритмах, построенных на базе геометрических методов. Тем ни менее, в задачах определение КПДО, где цикл решения достигает порой нескольких минут выигрыш во времени вычислений, не является существенным преимуществом.

Нужно заметить, что для оценки параметров с помощью динамической модели требуется задать начальное приближение искомых параметров, от точности которого будут зависеть результаты моделирования.

Кроме того, в основе данных методов лежит принцип построения динамической системы эволюционирующей во времени [2, 5], при этом полагается, что будущее системы не зависит от её прошлого. Большинство методов моделирования динамических систем создавались как средство моделирования линейных либо стохастических систем, в то время как система пассивного сопровождения по пеленгу не относится ни к тому, ни к другому классу. В системе сопровождения движение цели, как правило, осуществляется в соответствии с некой неслучайной и нелинейной стратегией.

Следует отметить, что в задаче определения КПДО УИ важно не предсказание выхода системы на любой упреждающий момент времени, а значение её текущего состояния.

Проанализировав основные сложности, характерные для приведенных в табл. 1 методов решения задачи, можно выделить следующие проблемообразующие факторы:

Недостаток информации получаемой при одномоментном наблюдении для решения задачи.

1. Рассмотрение задачи во времени.
2. Нелинейность движения наблюдаемого объекта.
3. Зависимость точности решения от взаимного расположения наблюдателя и объекта наблюдения.
4. Зависимость точности решения от уровня шума в данных наблюдений.

Классическая постановка задачи сопровождения подвижного объекта, привела к тому, что в математических моделях рассматриваемых задач в качестве искомых величин выступают непосредственно сами параметры движения объектов, такие как координаты, курс, модуль скорости, и вектор ускорения наблюдаемого объекта. Следует заметить, что данные величины коррелируют между собой, что вносит существенные погрешности в решения, при условии зашумленности входных данных.

Оценка параметров движения

Одним из наиболее проблемных факторов в задачи определения КПДО УИ является нелинейность движения наблюдаемого объекта.

Рассмотрим классификацию моделей по типу движения объекта:

1. Модель с постоянной скоростью
2. Модель с постоянным ускорением
3. Модель со стохастическим ускорением

В математическом аппарате большинства рассматриваемых методов, изначально заложен тип моделируемой «нелинейности», что приводит к ориентации каждого из этих методов на конкретный тип движения объекта.

Очевидно, что в реальных условиях, наблюдаемый объект может многократно менять тип своего движения (двигаясь равномерно, прямолинейно, равноускоренно, по параболе, окружности и т.д.)

Единственный подход позволяющий оценивать несколько типов движения, реализован лишь в методе множественных моделей, в основу которого положен одновременный расчет сразу по нескольким моделям с выбором наиболее подходящей по получаемым оценкам. Стоит отметить, что в качестве моделей движения, использующиеся в методе множественных моделей, используются все те же методы, что были описаны в первой главе, со всеми присущими им достоинствами и недостатками.

Вторым, значимым фактом, является то, что в качестве искомым параметров движения объекта, во всех приведенных методах, помимо координат, выступают такие параметры движения как скорость и ускорение. Дело в том, что с практической точки зрения, такие параметры, как скорость и ускорение наблюдаемого объекта представляют действительный интерес, и нахождение их непосредственной оценки стало своего рода стандартом де-факто в данной области. Такое положение дел, приводит к неоправданному росту ошибок моделирования.

Таблица 2. Ключевые недостатки существующих методов и способы их устранения

Недостатки	Способы их устранения
<ul style="list-style-type: none"> • Использование мат. аппарата вычисляющего значения вторичных, а не первичных параметров системы • Линеаризация системы за счет линеаризации уравнений движения цели 	<ul style="list-style-type: none"> • Поиск параметров движения цели как функции пространственных координат цели от времени • Аппроксимация нелинейной траектории полиномом N-го порядка и линеаризация его коэффициентов

Очевидно, что задача анализа параметров движения наблюдаемого объекта, является вторичной по отношению к задаче оценки траектории.

Произведя оценку траектории, можно найти, любой интересующий параметр движения объекта.

Задача анализа траектории представляет собой задачу построения функции аппроксимирующей результаты наблюдений.

Применение методов системного анализа позволило нам, сформулировать новую постановку задачи определения КПДО для нелинейно движущихся объектов, позволяющую снять большую часть приведенных ограничений.

В основу постановки задачи, положено нахождение функции координат объекта от времени. Это позволяет перейти от сложившейся практики непосредственного определения параметров движения к нахождению функции траектории произвольного вида оптимально аппроксимирующей результаты дискретных наблюдений.

Постановка задачи

Условия задачи подразумевают, что объект наблюдения (ОН) движется в двумерном пространстве по гладкой траектории. Траектория движения объекта представляет собой функцию вектора координат от времени, и включает в себе всю полноту информации о положении, параметрах и характере движения наблюдаемого объекта.

Наблюдатель, осуществляющий слежение за объектом, движется по гладкой траектории, так же, представляющей собой функцию вектора координат от времени. Данную функцию будем полагать известной и адекватной реальным положению и параметрам движения наблюдателя.

В дискретные моменты времени t_i , выбранные на равномерной сетке с началом координат t_0 и шагом Δt , наблюдатель осуществляет измерение угла пеленга на объект наблюдения $P(t)$. Под углом пеленга понимается угол между направлением на север и направлением на объект наблюдения.

Наблюдение угла пеленга производится с некоторой ошибкой – называемой ошибкой измерений и считающейся распределенной по нормальному закону распределения [2].

Необходимо по данным наблюдения восстановить траекторию движения цели с заданной точностью.

Анализ постановки задачи

Будем рассматривать координаты объекта наблюдения и поступающие в систему данные о результатах измерений пеленгов и координатах наблюдателя во времени.

Объект наблюдения движется непрерывно, в то время как наблюдения осуществляются дискретно. Тогда, задача построения траектории объекта наблюдения представляет собой задачу построения функции аппроксимирующей некие дискретные значения, полученные в результате обработки наблюдений.

Следует заметить, что мы не имеем возможности наблюдать координаты движущегося объекта непосредственно, а регистрируем лишь углы пеленга, являющиеся функцией одновременно от координат наблюдателя и наблюдаемого объекта.

В математическом смысле данная задача представляет собой задачу восстановления функции по ограниченному числу данных наблюдения.

Для решения этой задачи требуется ввести функцию реализующую связь данных наблюдения с оцениваемыми параметрами.

В большинстве существующих методов, в качестве математической модели, определяющей данную связь, используются уравнения кинематики, а рассматриваемые в них кинематические параметры существенно ограничивают множество моделей движения наблюдаемого объекта [1, 3, 4].

При рассмотрении процесса движения как функции траектории, кинематические параметры движения (выступающие в качестве производных), исключаются из процесса решения, и не оказывают влияние на решение задачи.

В этой ситуации, связь между данными наблюдения и состоянием наблюдаемой системы осуществляется посредством задания уравнения прямой, про-

ходящей через позиции наблюдателя и ОН и являющейся линией пеленга (рис.1).

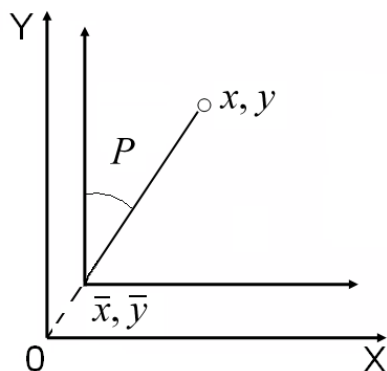


Рис. 1. Определение линии пеленга на ОН.

\bar{x}, \bar{y} – координаты наблюдателя, x, y – координаты ОН, P – угол пеленга на ОН

Уравнение прямой, в данном случае, имеет вид:

$$y_i - \bar{y}_i = k_i(x_i - \bar{x}_i), \quad (1)$$

где k_i – линейный угловой коэффициент.

Уравнение (1) является уравнением прямой, в практическом смысле представляющее собой уравнение линии пеленга на наблюдаемый объект.

Данное уравнение лежит в основе математической модели предложенного далее метода нахождения траектории объекта наблюдения.

Следующим шагом в построении математической модели будет выбор вида функции максимально приближенно описывающей оцениваемые параметры.

Следует отметить, что функция траектории, в силу физической природы описываемого объекта, является гладкой и непрерывной. Для описания подобных функций, в научной практике широко используются методы аппроксимации искомой функции полиномами.

Среди широкого семейства аппроксимирующих полиномов, мы выбрали семейство ортогональных многочленов Чебышева, обладающие рядом важных для рассматриваемой задачи свойств.

Рассмотрение альтернативных систем ортогональных полиномов показало, отсутствие существенного с точки зрения оценки точности различия в реализации предложенного метода на их основе [6, 7].

Выводы

В данной работе автором предложен метод решения задачи определения КПДО УИ, позволяющая повысить точность определения параметров нелинейно движущихся объектов.

Предложенный метод относится к классу геометрических методов и обладает значительной вычислительной простотой по сравнению с методами другой природы. Метод разработан с учетом основных факторов препятствующих решению задачи и ориентирован на учет нелинейного движения наблюдаемого объекта.

Литература

1. Anderson R. Spline estimation of paths using bearings-only tracking data. /R. Anderson-Sprecher and R.V. Lenth /Journal of the American Statistical Association, – 91(433), 1996. – Pp. 276 – 283.

2. Benlian Xu. An adaptive tracking algorithm for bearings-only maneuvering target /Benlian Xu, Zhiquan Wang //IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, 2007. – January. Vol. 7, no. 1. – Pp. 304 – 312.

3. Landelle B. Robustness considerations for bearings-only tracking /B. Landelle /Information Fusion 11th International Conference on – France: Thales Optronique, Universite Paris-Sud, – 2008. – P. 8.

4. Li. R. Survey of maneuvering target tracking. part I. dynamic models /R. Li and V.P. Jilkov/Aerospace and Electronic Systems,– IEEE Transactions on 39 (4), 2004. – Pp. 1333 – 1364.

5. Middlebrook D.L. Bearings-only tracking automation for a single unmanned underwater vehicle: Thesis (S.M.) Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering, 2007.

6. Первухин, Д.А. Применение ортогональных полиномов Чебышева для аппроксимации траектории движения морского объекта с использованием уг-

ломерной информации /Д.А. Первухин, С.А. Пюнинен /Труды XI Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления». – СПб.:СЗТУ, 2010. – Ч. II. – С. 349 – 354.

7. Пюнинен, С.А. Полиномиальная аппроксимация траектории нелинейно движущегося морского объекта с использованием только угломерной информации /С.А. Пюнинен /Наука в современном мире //Материалы I Международной научно-практической конференции. – М.: Компания Спутник +, 2010, – С. 294 – 297.

Рецензент проф. Злотников К.А.