

УДК 621.396.9.001.61

А.И. КРАВЧЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОЦЕНКА ТЕКУЩИХ КООРДИНАТ СОПРОВОЖДАЕМЫХ ТРАЕКТОРИЙ ПРОВОДКИ СУДОВ В ПРИБРЕЖНЫХ МОРСКИХ РЕГИОНАХ

Рассмотрена и проанализирована возможность использования упрощенного динамического фильтра – $\alpha\beta$ -фильтра для оценки координат траекторной проводки морских судов. Аргументирована целесообразность использования данной модификации динамического фильтра, учитывающая особенности траектории движения судна в виде отрезков прямых линий, малые скоростные параметры движения и другие особенности. Определены параметры эффективной длины импульсной характеристики фильтра. Получены формулы для вычисления интегральных погрешностей оценок координат радиолокационных отметок.

Ключевые слова: обработка, координаты, отметки, суда, фильтрация, характеристика, радиолокационные сигналы, модель.

Введение

Основными исходными данными для вторичной обработки радиолокационных сигналов, при траекторной проводке морских судов в прибрежных морских регионах, являются радиолокационные отметки, вектор параметров которых включает координаты, оценки которых получены при первичной обработке.

Мгновенные оценки координат характеризуются определенными точностями (погрешностями) в каждом такте первичной обработки. Поскольку вторичная (траекторная обработка) оперирует с временными последовательностями радиолокационных отметок, то очевидно, что это расширяет информационную базу об объекте наблюдения. Тем самым, формируются объективные условия, обеспечивающие потенциальную возможность для более точного определения координат движущегося объекта.

Технически такую потенциальную возможность реализуют методами динамической фильтрации, которые позволяют осуществлять последовательное получение оценок текущих координат траекторий и их производных во времени после каждого обзора рабочей зоны автоматизированной радиотехнической системы [АРТС] [1].

В качестве динамических фильтров траектории движения объекта используются фильтры Калмана [2 – 4], реализованные в различных модификациях [5 – 7]. При выборе модификации фильтра Калмана следует учитывать специфические особенности траектории и параметров движения морских судов, а именно: траектории движения представляют собой отрезки прямых линий образующих плоскую лома-

ную линию, определяющую требуемые условия безопасности проводки в конкретном морском регионе; морские суда не являются объектами наблюдения с высокоскоростными маневровыми параметрами, погрешности оценок координат радиолокационных отметок одного и того же судна в тракте первичной обработки изменяются достаточно медленно; фильтра Калмана в их классическом исполнении достаточно сложны для технической реализации.

Цель выполненных в работе исследований

Целью исследований является оценка возможности траекторной обработки (ТО) упрощенной модификацией этих фильтров с учетом специфических особенностей траектории движения судов их слабую маневренность при невысоких скоростях движения и медленность изменения погрешностей, оценок координат радиолокационных отметок одного и того же судна в тракте первичной обработки.

Основные результаты исследования

При сформулированной цели исследований в рассматриваемой ТО целесообразно ограничиться упрощенной модификацией динамических фильтров [2, 6], которая носит название последовательных $\alpha\beta$ -фильтров. Приемы динамической фильтрации координат радиолокационных отметок неразрывно связаны с представлениями о принятой модели движения объекта наблюдения. Выше было показано, что для судов, как объектов наблюдения АРТС, целесообразно ограничиться линейной моделью движения.

В текущем обзоре новой порцией информации для динамического фильтра координат каждой сопровождаемой траекторий являются полярные координаты дальности J_v^* и B_v^* азимута одной или пары радиолокационных отметок.

Но даже для линейной модели, алгоритм динамической фильтрации полярных координат отметок выглядит [2, 4] довольно сложно. Поэтому полученные полярные координаты отметок целесообразно перед использованием привести к прямоугольной системе координат.

С учетом вышеизложенного, траекторный фильтр для оценки прямоугольных координат судов x_{pot} , y_{pot} и их первых производных во времени u_x , u_y может [4] выглядеть так

$$\begin{aligned} x_{pot} &= x_{extr} + \alpha \cdot dx; & y_{pot} &= y_{extr} + \alpha \cdot dy; \\ u_x &= u_x + \beta \cdot dx; & u_y &= u_y + \beta \cdot dy, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} dx &= J_v^* \cdot \cos(B_v^*) - x_{extr}; \\ dy &= J_v^* \cdot \sin(B_v^*) - y_{extr}; \end{aligned}$$

α, β - коэффициенты используемой модификации траекторного фильтра, которые при указанных выше условиях применения, зависят только от количества τ последних обзоров, информация которых используется.

Коэффициенты определяются по формулам

$$\begin{aligned} \alpha &= [2(2\tau - 1)] / [\tau(\tau + 1)]; \\ \beta &= 6 / [\tau(\tau + 1)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Параметр τ по физическому смыслу является динамической, т.е. изменяемой по определенным правилам во времени, эффективной длиной импульсной характеристики траекторного фильтра.

Рассматриваемые АРТС имеют несколько характерных реализационных методологических особенностей в части определения коэффициентов (2).

Одной из таких особенностей является необходимость в принудительном ограничении постоянной времени τ как сверху, так и снизу. При этом путем натуральных наблюдений, установлено, что границы таких ограничений практически не зависят от типа, размеров или других конструктивных особенностей судов, как объектов радиолокационного наблюдения, а также - от характера маршрута их движения, ракурса наблюдения и т.п.

Путем выполненных автором натуральных экспериментов определено, что ограничение τ сверху должно соответствовать количеству круговых обзоров АРТС, которые она осуществляет в течение приблизительно 6÷8 минут. Большее значение τ в

реальных условиях функционирования ТО, как правило, не достигается из-за интегрального воздействия ошибок первоначальных оценок координат отметок, экстраполяции и фильтрации координат траектории. Поэтому дополнительные затраты вычислительного ресурса, связанные с дальнейшим увеличением τ неэффективны.

Также экспериментально определено, что ограничение τ снизу должно соответствовать количеству обзоров АРТС, которые она осуществляет в течение приблизительно 30÷35 секунд. Ограничение снизу, как правило, применяется на участках интенсивного маневра судов. При этом установлено, что при меньших значениях τ фильтр автосопровождения траектории любого судна часто теряет устойчивость, что выражается в неконтролируемых выбросах оценок производных от координат (курс, скорость) траекторных параметров на выходе ТО. Затягивание во времени этого процесса на 2÷4 обзора по большей части заканчивается срывом автосопровождения траектории судна.

Другой реализационной методологической особенностью определения коэффициентов фильтрации является то, что в каждом очередном обзоре АРТС применению формулы (2) предшествует принудительное увеличение на единицу текущего значения τ в границах заявленных ограничений. При этом если траектория пребывает в статусе интенсивного маневра судна или находится в зоне поворота (пересечения) фарватера, указанное увеличение τ выполняется лишь в четных обзорах, т.е. реализуется так называемый принцип "мягкой" задержки постоянной времени динамического фильтра.

Еще одна методологическая реализационная особенность фильтрации координат в ТО обусловлена условиями применения АРТС информационной поддержки служб регулирования движения судов (СРДС). Так известно, что в прибрежной зоне суда обычно двигаются относительно узкими фарватерами и морскими каналами. При этом во время встречных расхождений и обгонов суда проходят настолько близко один от другого, что пересекаются не только их стобы автосопровождения, но и их радиолокационные изображения (РЛИ). Это приводит к временным (на время расхождения) неопределенностям относительно истинных координат отметок судов, а также - к взаимному ухудшению качества сопровождения траекторий за счет поочередного отбора ними общих отметок для собственного продолжения. В случае непринятия специальных мер, отрицательными последствиями этого являются срывы сопровождения траекторий или их перепутывание.

Для уменьшения отрицательных последствий предложен и реализован такой методический прием,

как принудительное прекращение фильтрации траекторных параметров на время непосредственного расхождения судов. При этом экстраполированные координаты судна одновременно считаются и оценками их текущих координат. В реальных условиях, процесс такого сближения судов, по наблюдениям автора, может длиться от 20÷30 секунд до 2,5÷5,0 минут. Поэтому предложенный метод приводит к определенным временным потерям в точности сопровождения судов, однако этот ущерб вполне оправдан, поскольку позволяет практически до нуля уменьшить вероятность срыва автосопровождения или перепутывания траекторий при взаимных и плотных расхождениях судов.

Для операторов постов СРДС координатная информация ТО представляется в виде локальных полярных координат судов, которые учитывают поправки, обусловленные кривизной земной поверхности, пригодные к использованию в пределах рабочей зоны АРТС. Такие координаты определяются как

$$\begin{aligned} j_{\text{pot}}^{\text{heo}} &= \sqrt{x_{\text{pot}}^2 + y_{\text{pot}}^2} / (1 + \Delta_j^{\text{heo}}); \\ \beta_{\text{pot}}^{\text{heo}} &= \left[\arctg(y_{\text{pot}}/x_{\text{pot}}) \right] + \Delta_{\beta}^{\text{heo}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta_j^{\text{heo}} = \left[\left(X_{\text{Post}}^{\text{heo}} + x_{\text{pot}}/2 \right)^2 \right] / \left\{ 2 \cdot [R(\text{LAT}_{\text{Post}})]^2 \right\}$ – поправка дальности [8];

$R(\text{LAT}_{\text{Post}})$ – радиус кривизны земной поверхности на широте АРТС;

$\Delta_{\beta}^{\text{heo}} = (\text{LON}_0 - \text{LON}_{\text{middle}}) \cdot \sin(\text{LAT}_0)$ – поправка азимута [8];

$\text{LAT}_0, \text{LON}_0$ – средние значения широты и долготы рабочей зоны АРТС;

$\text{LON}_{\text{middle}}$ – опорный меридиан, настроечный параметр ТО, который, согласно методике [8, 9], используется при преобразовании географических координат в геодезические прямоугольные и наоборот.

Для операторов СРДС важна также информация о погрешностях выполняемых радиолокационных измерений, поскольку для них это служит своеобразным показателем достоверности получаемых траекторных данных.

В представляемой автором ТО интегральные погрешности оценок координат определяются путем прямых измерений в реальном времени по типовому алгоритму, который имеет вид

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{k_{\text{potTO}}(\tau) \cdot \left[\tau_{\text{disp}} / (\tau_{\text{disp}} - 1) \right] \cdot D_{\text{pot}}(\lambda)}, \quad (4)$$

где $D_{\text{pot}}(\lambda) = D_{\text{pot}}(\lambda) + \rho_{\text{disp}} \cdot \left[\delta_{\lambda}^2 - D_{\text{pot}}(\lambda) \right]$ – первичная дисперсия расхождений δ_{λ} между мгновен-

ными и отфильтрованными текущими оценками полярных координат, которая определяется лишь при отсутствии пропуска отметок автосопровождения траекторий;

$\lambda \in j_{\text{pot}}^{\text{heo}}, \beta_{\text{pot}}^{\text{heo}}$ – координаты дальности и азимута судна согласно (3);

$$\delta_{\lambda} \in \left[\left(J_v^* - j_{\text{pot}}^{\text{heo}} \right), \left(B_v^* - \beta_{\text{pot}}^{\text{heo}} \right) \right] \text{ – указанные выше}$$

соответствующие расхождения траекторных параметров;

J_v^*, B_v^* – мгновенные оценки координат дальности и азимута

$$J_v^* = \sqrt{J_v^2 - h_a^2} + \Delta_j^{\text{yust}}, \quad B_v^* = B_v + \Delta_{\beta}^{\text{yust}};$$

h_a – высота подвеса антенны АРТС относительно уровня моря;

$\Delta_j^{\text{yust}}, \Delta_{\beta}^{\text{yust}}$ – поправки, компенсирующие инструментальные погрешности первичной обработки АРТС при оценке дальности и азимута соответственно;

$k_{\text{potTO}}(\tau)$ – коэффициент уменьшения дисперсии оценок координат судна за счет траекторной фильтрации, который для применяемой $\alpha\beta$ -модификации фильтра Калмана, согласно [2, 4], определяется как $k_{\text{potTO}}(\tau) = \alpha$;

$\rho_{\text{disp}} = 2 / (\tau_{\text{disp}} + 1)$ – коэффициент экспоненциального сглаживания;

τ_{disp} – постоянная фильтра экспоненциального сглаживания.

Заклучение

Для оценки текущих значений координат сопровождаемых траекторий проводки морских судов в прибрежных морских регионах использование традиционных методов динамической фильтрации, основанных на уравнениях Калмана практически нецелесообразно. С целью упрощения траекторий обработки, предложена и проанализирована более простая в практической реализации динамического фильтра, модифицированный фильтр в виде набора $\alpha\beta$ -фильтров.

Аргументирована целесообразность использования данной модификации, учитывающая особенности траектории движения судна, малой изменчивости погрешности определения координат при первичной обработке. Путем натурных наблюдений определены параметры эффективной длины импульсной характеристики этих фильтров. Получены формулы для вычисления интегральных погрешностей оценок координат радиолокационных отметок.

Литература

1. Петров, А.В. Анализ и синтез радиотехнических комплексов [Текст] / А.В. Петров, А.А. Яковлев; под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
2. Кузьмин, С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации [Текст] / С.З. Кузьмин. – М.: Сов. радио, 1967. – 399 с.
3. Кузьмин, С.З. Основы цифровой обработки радиолокационной информации [Текст] / С.З. Кузьмин. – М.: Сов. радио, 1974. – 432 с.
4. Кузьмин, С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации [Текст] / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
5. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники [Текст] / Б.Р. Левин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
6. Фалькович, С.Е. Статистическая теория радиотехнических систем [Текст] / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.
7. Теория обнаружения [Текст] / П.С. Акимов, П.Д. Бакут, В.А. Богданов [и др.]; под ред. П.Д. Бакута. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
8. Закатов, П.С. Курс высшей геодезии [Текст] / П.С. Закатов. – М.: Недра, 1976. – 504 с.
9. Справочник геодезиста. В двух книгах. Кн. 1 [Текст] / под ред. В.Д. Большакова, Г.П. Левчука. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 455 с.

Поступила в редакцию 20.04.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры проектирование радиоэлектронных устройств, систем и комплексов летательных аппаратов В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

ОЦІНКА ПОТОЧНИХ КООРДИНАТ СУПРОВОДЖУВАНИХ ТРАЄКТОРІЙ ПРОВІДКИ СУДІВ В ПРИБЕРЕЖНИХ МОРСЬКИХ РЕГІОНАХ

О.І. Кравченко

Розглянута і проаналізована можливість використання спрощеного динамічного фільтру - $\alpha\beta$ -фільтра для оцінки координат траєкторної провідки морських суден. Аргументована доцільність використання цієї модифікації динамічного фільтру, що враховує особливості траєкторії руху судна у вигляді відрізків прямих ліній, малі швидкісні параметри руху і інші особливості. Визначені параметри ефективно довжини імпульсної характеристики фільтру. Отримані формули для обчислення інтегральних погрішностей оцінок координат відміток радіолокацій.

Ключові слова: обробка, координати, відмітки, судна, фільтрація, характеристика сигнали радіолокацій, модель.

ESTIMATION OF CURRENT COORDINATES OF ACCOMPANIED PATHS OF PILOTAGE IN COASTAL SEA REGIONS

A.I. Kravchenko

Possibility of usage of the simplified dynamic filter – the $\alpha\beta$ -filter for an estimation of coordinates of the trajectory conductings of sea-crafts is considered and analyzed. The expediency of usage of the given modification of the dynamic filter, considering singularities of a path of driving of a vessel in the form of segments of direct lines, small high-speed parameters of driving and other singularities is argued. Parameters of effectively length of a pulse response of the filter are defined. Formulas for calculation of integral errors of estimations of coordinates of radar-tracking marks are received.

Key words: handling, coordinates, marks, vessels, filtration, characteristic, radar-tracking signals, model.

Кравченко Александр Иванович – канд. техн. наук, докторант кафедры радиоэлектронных устройств, систем и комплексов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.