

УДК 681.518

В.В. Альчаков

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: alchakov@sevinter.net

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Исследованы алгоритмы оценивания траекторных параметров ракетно-космического комплекса (РКК), стартующего с морской платформы. Вычисленные оценки получены в результате нелинейной фильтрации данных, поступающих от наблюдательной системы, формирующей измерения дальностей от группы дрейфующих буев до наблюдаемого РКК.

Системы внешнетраекторных измерений (ВТИ) играют важную роль при осуществлении запусков ракетно-космических комплексов (РКК) с морских стартовых платформ. Независимые от бортовых систем навигации они являются единственными источниками данных о параметрах движения РКК в аварийных ситуациях. Системы ВТИ могут строиться на основе радиолокационных или радиотехнических (радиодальномерных) средств. Существующие системы ВТИ, используемые для запусков РКК, требуют размещения радиолокационного оборудования на судах, эксплуатация которых, как известно, подразумевает большие затраты. Известный подход [1], основанный на применении информационных дрейфтерных технологий, позволяет радиотехническими средствами выполнять измерения дальностей от небольших дрейфующих морских буев (дрейфтеров) до центра масс РКК, стартующего с морской платформы. Данные таких измерений могут быть использованы для восстановления вектора траекторных параметров РКК путем соответствующей обработки.

Для построения модели системы ВТИ использованы уравнения движения центра масс РКК, уравнения измерений дальностей и уравнения, формирующие оценки траекторных параметров.

Уравнения движения центра масс РКК определены в геоцентрической системе координат OXYZ с учетом относительного перемещения дрейфтеров, размещенных на водной поверхности Земли, и выводимого на орбиту РКК. В рассматриваемом случае движение РКК по траектории описывается следующей системой дифференциальных уравнений [2]

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= V_x \\ \dot{V}_x &= -g_0 \frac{R^2}{r^3} x + \frac{PV_x}{mV} - \frac{\rho V^2 SC_R V_x}{2mV} + \Omega^2 x + 2\Omega V_z + \frac{\rho S'}{2m} C_R u_x \\ \dot{y} &= V_y \\ \dot{V}_y &= -g_0 \frac{R^2}{r^3} y + \frac{PV_y}{mV} - \frac{\rho V^2 SC_R V_y}{2mV} + \frac{\rho S'}{2m} C_R u_y \\ \dot{z} &= V_z \\ \dot{V}_z &= -g_0 \frac{R^2}{r^3} z - \frac{PV_z}{mV} + \frac{\rho V^2 SC_R V_z}{2mV} + \Omega^2 z + 2\Omega V_x + \frac{\rho S'}{2m} C_R u_z \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где x, y, z – координаты центра масс РКК в выбранной системе отсчета; V_x, V_y, V_z – проекции вектора скорости РКК на координатные оси; P – сила тяги; ρ – плотность набегающего воздушного поток; m – масса РКК; S – характерная площадь РКК; C_R – безразмерный аэродинамический коэффициент; g_0 – ускорение силы тяжести в экваториальной зоне Земли; R – радиус Земли; r – радиус-вектор, определяющий положение РКК в пространстве; Ω – угловая скорость вращения Земли; u_x, u_y, u_z – случайные составляющие вектора скорости.

Исходя из концепции построения системы оценивания траекторных параметров [1], процесс измерения представляет собой последовательность операций определения в дискретные моменты времени дальностей от дрейфтеров до центра масс РКК. Уравнения, устанавливающие связь измеряемых дальностей с координатами дрейфтеров и координатами местоположения РКК, могут быть представлены в виде

$$d_i(t_k) = \sqrt{(x(t_k) - x_i(t_k))^2 + (y(t_k) - y_i(t_k))^2 + (z(t_k) - z_i(t_k))^2} + v_i(t_k), \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3$ – для случая использования трех дрейфтеров;

$x_i(t_k), y_i(t_k), z_i(t_k)$ – координаты i -го дрейфтера в принятой системе отсчета;

$x(t_k), y(t_k), z(t_k)$ – текущие координаты центра масс РКК, соответствующие дискретным моментам времени;

$v_i(t_k)$ – ошибка i -го измерения.

Система нелинейных уравнений (2) определяет компоненты вектора измерений

$$Y(t_k) = h(X(t_k)) + V(t_k) = \begin{bmatrix} d_1(t_k) \\ d_2(t_k) \\ d_3(t_k) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $h(X(t_k))$ – функция определения дальностей в соответствии с формулой (2).

Поскольку процесс измерения дальностей выполняется в дискретные моменты времени, систему дифференциальных уравнений (1) удобно преобразовать к системе разностных уравнений

$$X(t_{k+1}) = A_d(t_k)X(t_k) + \Delta t_k B_d(t_k)U(t_k), \quad (4)$$

где $X(t_k)$ – n -мерный вектор параметров траектории; $A_d(t_k) = [I + \Delta t_k A(t_k)]$ – матрица размерности $(n \times n)$; $B(t_k)$ – матрица коэффициентов при возмущении размерности $(n \times m)$; $U(t_k)$ – m -мерный случайный вектор возмущений; $T = \Delta t_k$ – период дискретизации модели.

В качестве параметров траектории рассматриваются координаты центра масс $x(t_k)$, $y(t_k)$, $z(t_k)$ РКК в принятой геоцентрической системе координат, а также его скорости $V_x(t_k)$, $V_y(t_k)$, $V_z(t_k)$.

Структура матриц, использующихся при вычислении (4), имеет вид:

$$A(t_k) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -g_0 \frac{R^2}{r(t_k)^3} + \Omega^2 & \frac{2P - \rho V(t_k)^2 SC_R}{m(t_k)V(t_k)} & 0 & 0 & 0 & 2\Omega \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g_0 \frac{R^2}{r(t_k)^3} & \frac{2P - \rho V(t_k)^2 SC_R}{m(t_k)V(t_k)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2\Omega & 0 & 0 & -g_0 \frac{R^2}{r(t_k)^3} + \Omega^2 & -\frac{2P - \rho V(t_k)^2 SC_R}{m(t_k)V(t_k)} \end{pmatrix};$$

$$X(t_k) = [x(t_k) \ V_x(t_k) \ y(t_k) \ V_y(t_k) \ z(t_k) \ V_z(t_k)]^T;$$

$$B(t_k) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{\rho S' C_R}{2m(t_k)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\rho S' C_R}{2m(t_k)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\rho S' C_R}{2m(t_k)} \end{pmatrix}; \quad U(t_k) = [u_x(t_k) \ u_y(t_k) \ u_z(t_k)]^T.$$

Поскольку уравнения (3) и (4) нелинейные, то задача оценивания искоемых траекторных параметров может быть сведена к задаче нелинейной фильтрации. Для построения рабочих алгоритмов вычисления оценок траекторных параметров были использованы два подхода, основанные на применении рекуррентных процедур линеаризованного и расширенного фильтров Калмана [3].

В случае использования линеаризованного алгоритма фильтра полагаем, что известна некоторая заданная программная траектория РКК, принимаемая за номинальное движение, относительно которой производится ли-

неаризация нелинейных соотношений, описывающих движение РКК. Процедура фильтрации с помощью линейризованного фильтра включает в себя следующие этапы:

- 1) вычисление экстраполированной оценки вектора состояния, полученной на основе данных прошлых измерений;
- 2) вычисление матрицы линейризованных относительно номинального движения коэффициентов при переменных состояния и при переменных измерениях;
- 3) вычисление априорной ковариационной матрицы;
- 4) уточнение экстраполированной оценки вектора состояния с учетом поступивших измерений;
- 5) вычисление апостериорной ковариационной матрицы.

Схема алгоритма изображена на рисунке 1.

Для работы алгоритма линейризованного фильтра необходимо сформировать начальные значения ковариационной матрицы, вектор состояния, соответствующий начальному состоянию РКК, и обеспечить поступление на вход фильтра данных измерений в соответствующие дискретные моменты времени. Выход фильтра представляет собой оценку вектора состояния РКК.

В отличие от предыдущей реализации в алгоритме расширенного фильтра полагается, что номинальная траектория движения РКК неизвестна, и линейризация нелинейных соотношений производится относительно экстраполированных значений оценок вектора состояния. В то же время

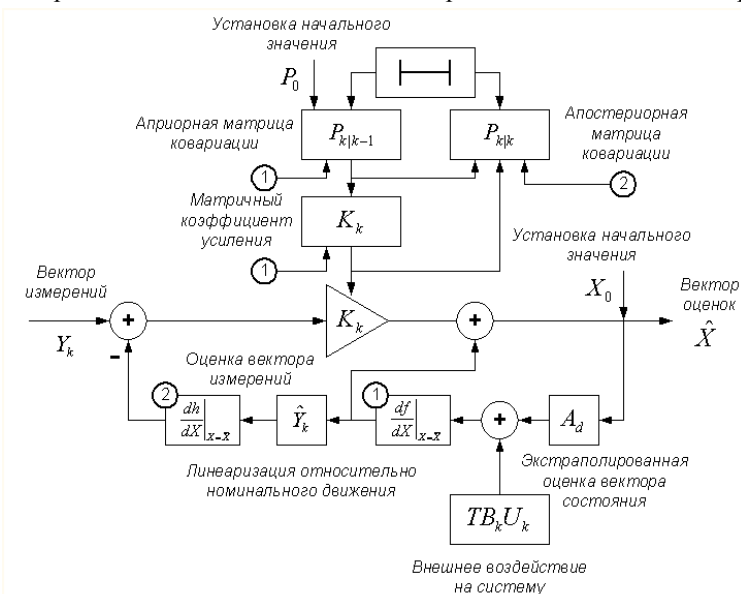


Рисунок 1 – Схема алгоритма линейризованного фильтра Калмана

сам алгоритм расширенного фильтра имеет подобную структуру с линейризованным фильтром:

- 1) вычисление экстраполированной оценки вектора состояния, полученной на основе данных прошлых измерений;
- 2) вычисление матрицы линейризованных относительно экстраполированного значения вектора состояния коэффициентов при переменных состояния и при переменных измерения;
- 3) вычисление априорной ковариационной матрицы;
- 4) уточнение экстраполированной оценки вектора состояния с учетом поступивших измерений;
- 5) вычисление апостериорной ковариационной матрицы.

Схема алгоритма показана на рисунке 2.

Исходными данными для работы алгоритма расширенного фильтра являются начальное значение ковариационной матрицы и начальный вектор состояния РКК. Так же, как и в реализации линейризованного фильтра Калмана, на его вход поступает поток данных от системы измерений, а на выходе формируется оценка вектора состояния для каждого дискретного отсчета времени.

Исследование предложенного алгоритмического обеспечения проводилась методом имитационного моделирования с использованием специализированного программного обеспечения. Разработанная имитационная модель генерирует временной ряд данных, характеризующих движение центра

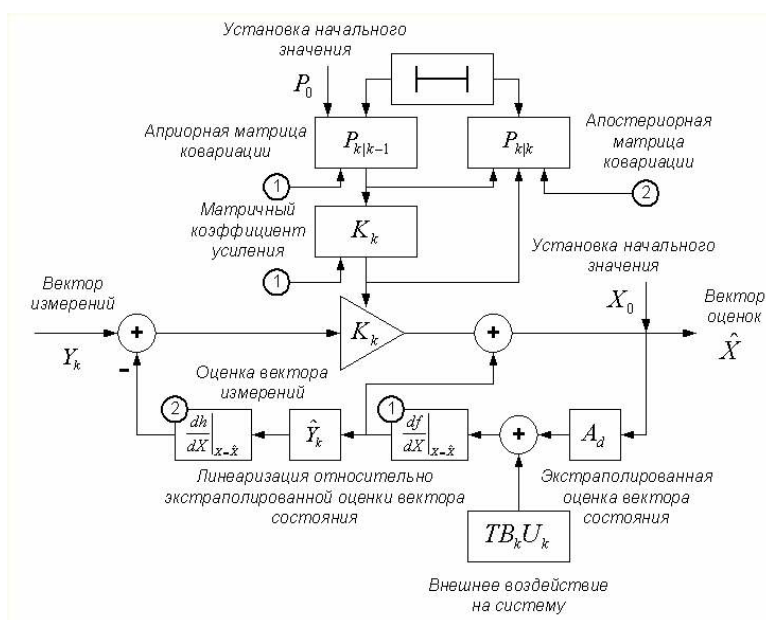


Рисунок 2 – Схема алгоритма расширенного фильтра Калмана

масс РКК при выводе на орбиту полезного груза, который впоследствии используется в качестве фильтруемого процесса при исследовании различных алгоритмов оценивания траекторных параметров. Предложенное программное обеспечение построено по модульному типу. Первый модуль отвечает за реализацию модели движения РКК и модели подсистемы измерений, второй – осуществляет обработку данных, в основе которой лежит один из рекуррентных алгоритмов (линеаризованный и расширенный фильтры Калмана), а последний модуль производит статистическую обработку и визуализацию результатов моделирования. Программное обеспечение создано в среде визуального программирования C++ Builder и предназначено для функционирования под операционной системой Windows 9x/Me/2000/XP. Программа оснащена удобным пользовательским интерфейсом, позволяющим варьировать любые параметры разработанной математической модели. Результаты работы программы представляются в виде графиков и численных рядов данных, которые в случае необходимости могут быть сохранены на внешнем носителе. Расчет и визуализация результатов производится в реальном масштабе времени. По окончании расчета создается отчет с результатами статистической обработки полученных данных. Программа распространяется в виде отдельного исполняемого файла и не требует установки на ЭВМ пользователя.

При численном моделировании движения центра масс РКК использовались реальные технические характеристики и параметры ракетно-космического комплекса морского базирования «Sea Launch». Сопоставление траектории движения РКК, рассчитанной с помощью соотношения (2), и циклограммы полета ракетносителя «Зенит-3SL» [4] позволило сделать заключение о том, что полученная математическая модель с достаточной степенью точности соответствует своему реальному техническому прототипу.

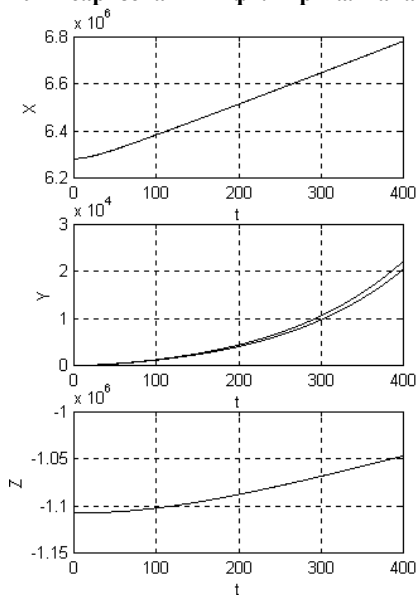
Значения основных исходных данных были приняты следующими:

- 1) период дискретизации модели – 0,01 с;
- 2) время моделирования – 400 с;
- 3) диагональные элементы ковариационной матрицы – $P(1,1)=22500 \text{ м}^2$; $P(2,3)=400 \text{ м}^2/\text{с}^2$; $P(3,3)=22500 \text{ м}^2$; $P(4,4)=1 \text{ м}^2/\text{с}^2$; $P(5,5)=22500 \text{ м}^2$; $P(6,6)=25 \text{ м}^2/\text{с}^2$;
- 4) начальный вектор состояния РКК – $X(1,1)=6,2811\text{e}+006 \text{ м}$; $X(2,1)=200 \text{ м/с}$; $X(3,1)=0 \text{ м}$; $X(4,1)=5 \text{ м/с}$; $X(5,1)=-1,1075\text{e}+006 \text{ м}$; $X(6,1)=0 \text{ м/с}$;
- 5) среднеквадратичное отклонение ошибки радиодальномерной системы дрейфера составляет 150 м.

Ниже представлены графические результаты, полученные при обработке потока данных, поступающего от измерительных систем дрейфтеров

(см. рисунок 3). Результат обработки представляет собой оценки координат центра масс РКК в выбранной системе отсчета.

Линеаризованный фильтр Калмана



Расширенный фильтр Калмана

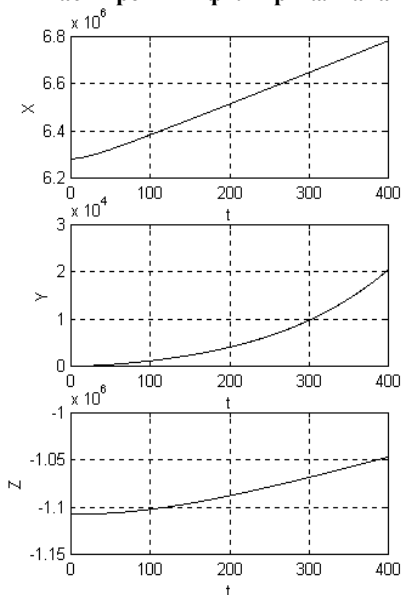


Рисунок 3 – Результаты работы алгоритмов фильтрации

Среднеквадратичное отклонение ошибки определения координат для реализации линеаризованного фильтра Калмана составило 121 м, для алгоритма расширенного фильтра – 37 м.

Полученные результаты статистической обработки данных серии экспериментов свидетельствуют о том, что наибольшей точностью обладает реализация алгоритма, основанного на применении расширенного фильтра Калмана. Это позволяет сделать заключение о возможности построения системы оценивания траекторных параметров с использованием алгоритма расширенного фильтра Калмана и ее реализации в реальном масштабе времени с наименьшими потерями по точности получаемых оценок.

Анализ алгоритмов позволяет сделать следующие заключения:

- 1) преимущество алгоритма линеаризованного фильтра состоит в том, что некоторые коэффициенты и матрицы могут быть вычислены заранее (поскольку известна номинальная траектория), что позволит значительно сократить время на реализацию рекуррентных соотношений фильтра;

- 2) в реальных условиях на борту РКК возможно возникновение внештатных ситуаций, которые могут привести к значительному отклонению от номинальной траектории, что в свою очередь приведет к расхождению алгоритма линеаризованного фильтра (расходимости);
- 3) линеаризация нелинейных соотношений в алгоритме расширенного фильтра производится относительно экстраполированных оценок вырабатываемых самим фильтром с учетом последних данных измерений, следовательно, точность получаемых оценок должна быть больше чем в реализации линеаризованного фильтра Калмана;
- 4) ввиду того, что в реализации расширенного фильтра Калмана производится линеаризация нелинейных соотношений относительно последней оценки, все коэффициенты и матрицы должны быть вычислены в реальном времени.

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанное алгоритмическое обеспечение может быть использовано в реальных технических системах для определения оценок внешнетраекторных параметров подвижных объектов.

Дальнейшие исследования по данной тематике могут быть связаны с совершенствованием разработанных алгоритмов с целью повышения их быстродействия и с возможностью применения более точных средств определения дальности до объекта.

Библиографический список

Краснодубец Л.А. Морские наблюдательные системы с подвижными платформами сбора данных / Л.А. Краснодубец // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. — 2000. — № 6. — С. 30–40.

Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика: Учеб. для студентов втузов / А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лысюченко, С.С. Богодистов. — 3-е изд. перераб. и доп. — М. Машиностроение, 1991. — 640 с.

Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах; Под ред. К.Т. Леондеса. — М.: Мир, 1980. — 410 с.

World Wide Web Site: <http://www.energia.ru>

Поступила в редакцию 15.04.2003 г.