

УДК 629.78.05

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОГО ВЕЙВЛЕТ ФИЛЬТРА И ФИЛЬТРА КАЛМАНА

© 2012 Е.К. Яковлев¹, И.А. Блатов²

¹ ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», Самара

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара

Поступила в редакцию 21.11.2012

В данной статье рассмотрен комбинированный фильтр, базирующийся на фильтре Калмана и вейвлет-фильтрации. Приведены графики базисных вейвлет, результаты обработки моделируемых параметров движения центра масс космического аппарата комбинированным фильтром и фильтром Калмана.

Ключевые слова: фильтр Калмана, комбинированный фильтр, сплайновые вейвлеты, алгоритмы, оценка точностных характеристик, параметры движения центра масс.

Для управления полетом космического аппарата (КА) с целью практической реализации заданных в соответствии с программой полета функций необходимо располагать информацией о параметрах движения центра масс (ПДЦМ) КА и параметрах движения относительно центра масс. Задача, которая заключается в определении ПДЦМ КА в установленной момент времени, получила название задачи навигации КА [1].

Задача космической навигации имеет свои характерные особенности. Во-первых, она является многомерной задачей, поскольку определению подлежат, в общем случае, шесть параметров движения КА, например, три координаты положения и три составляющие вектора скорости КА, т.е. шестимерный вектор

$$q(t) = [x(t), y(t), z(t), V_x(t), V_y(t), V_z(t)]^T.$$

Во-вторых, искомые параметры не поддаются прямым измерениям. В связи с этим находят применение косвенные методы измерений, т.е. измеряются такие параметры, которые функционально связаны с ПДЦМ КА.

В-третьих, навигационные измерения имеют стохастический характер. При этом даже незначительные погрешности измерений вносят существенный вклад в ошибки навигации. С целью борьбы с неизбежными случайными погрешностями измерений применяются методы статистической обработки измерительной информации.

Способы обработки навигационных сигналов, которые существуют на данный момент [1], работают, когда навигационный сигнал содержит только случайные ошибки, распределенные по нормальному закону («белый шум»), но с силь-

Яковлев Евгений Кириллович, инженер-конструктор.

E-mail: EvgenKirYakovlev@mail.ru

Блатов Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики. E-mail: blatow@mail.ru

нокоррелированными ошибками работают неэффективно. Для их обработки используются громоздкие фильтры, неустойчивые в работе [2].

Случайные ошибки устраняются тем лучше, чем большее количество информации обрабатывается на более длительном интервале времени. Но если обрабатывать измерения с малой дискретностью (часто), то между погрешностями измерения возникнет корреляция. В связи с этим выбирается такой интервал снятия информации, чтобы между погрешностями соседних измерений корреляции не было. При этом будет снижаться и объем выборки. Однако, чем реже получаем информацию для обработки, тем в большей зависимости мы оказываемся от степени точности модели движения и наличия в «прореженных» результатах измерений, взятых в обработку, аномальных измерений.

В сложившихся условиях возникает задача построения оптимального фильтра, который будет устойчивым и позволит избавиться от аномальных измерений.

Логическим решением поставленной задачи является предварительная фильтрация, сведение информации к параметрам, эквивалентным навигационным, которые будут обрабатываться известными методами [1].

Из известных фильтров, которые используются в настоящее время, мы применяем фильтр Калмана в форме динамической фильтрации. Он апробирован и отработан на ряде космических аппаратов, и устойчив в работе.

В последнее время появляются публикации [3] об использовании комбинированных фильтров, базирующихся на фильтре Калмана и вейвлет-фильтрации, которая основана на вейвлетах Добеши. Однако программная реализация классических систем вейвлет ([4], [5]) требует значительных вычислительных ресурсов, что в связи с жесткими

требованиями к надежности бортовой аппаратуры требует разработки систем вейвлет, допускающих более экономичную численную реализацию.

В предлагаемом в данной статье методе обработки навигационных параметров предлагается на первом этапе выполнять покомпонентное прямое быстрое дискретное вейвлет-преобразование шестимерного вектора параметров движения центра масс, далее, на втором этапе, выполнять обратное быстрое дискретное вейвлет-преобразование, и затем проводить обработку полученного вектора ПДЦМ фильтром Калмана. При этом предполагается, что шум не сосредоточен в какой-либо части вейвлет-спектра сигнала, а является «размазанным» по всему спектру. Вейвлет-спектр рассматривается как сигнал, содержащий шум и подлежащий сглаживанию с помощью фильтра Калмана.

Таким образом, предварительная фильтрация (предварительная обработка) сигнала с помощью вейвлет-фильтра на основе кусочно-полиномиальных полуортогональных сплайновых вейвлет позволяет избавиться от сильнокоррелированных и аномальных ошибок, понизить уровень случайных ошибок.

Быстрое дискретное вейвлет-преобразование выполняется следующим образом: в качестве функции f последовательно выбираются составляющие $x(t), y(t), z(t), Vx(t), Vy(t), Vz(t)$ вектора ПДЦМ $q(t)$. Далее, по заданным значениям $f = f_{ij}$ находятся коэффициенты разложения этой функции по базисным сплайнам и вейвлетам:

$$f = \sum_{j=-m+1}^{2^{n_0}-1} d_{0j} \phi_{j,n_0} + \sum_{i=1}^{k-n_0} \sum_{j=-m+1}^{2^{n_0+i-1}-m} c_{ij} \psi_{j,n_0+i}, \quad (1)$$

где ϕ_{j,n_0} и ψ_{j,n_0+i} – базисные сплайны и вейвлеты соответственно;

$\{d_{0j}, -m+1 \leq j \leq 2^{n_0}\} \cup \{c_{ij}, -m+1 \leq j \leq 2^{n_0+i-1}-m\}$ – (2) коэффициенты разложения по базисным сплайнам и вейвлетам соответственно [3].

Здесь n_0 – количество узлов самого крупного разбиения, $m-1$ – степень сплайна.

Затем решается обратная задача: по полученным коэффициентам разложения (2) восстанавливаются значения функций (1).

Существует достаточно широкий набор базисных вейвлет, однако, поскольку предполагается выполнять и обратное вейвлет-преобразование с целью восстановления отфильтрованного сигнала, на выбор базовых вейвлет накладывается ограничение по ортогональности. Таким образом за базовые вейвлеты были приняты вейвлеты, определенные И.А. Блатовым [6], [7].

Далее восстановленные значения вектора

$q(t)$ подвергаются фильтрации методом динамической фильтрации (методом Калмана). Конкретная его реализация в комбинированном фильтре, реализованная в программном комплексе, приводится ниже.

Процесс оценки методом динамической фильтрации представляет собой рекуррентную процедуру, при которой текущая оптимальная оценка суммируется определенным образом со вновь получаемой по измерениям информации для нахождения новой, как правило, улучшенной оценки. Т.е. на основе известной оценки $\Delta q(t_{k-1})$, полученной в ходе предыдущего навигационного сеанса, и результатов измерений первичных навигационных параметров в текущий момент времени t_k формируется оценка $\Delta q(t_k)$, которая характеризует отклонение истинной орбиты КА относительно опорной.

Формулы расчета оценок параметров движения весьма удобны с вычислительной точки зрения.

1. На основании данных о параметрах опорной орбиты КА, соответствующих моменту времени t_{k-1} предыдущего навигационного сеанса измерений, производится прогноз движения КА на заранее выбранный временной интервал Δt и находится вектор $q'(t_k)$, который будет являться априорным вектором на текущем шаге обработки; где $t_k = t_{k-1} + \Delta t$

2. Рассчитывается вектор измерений $q_{изм}(t_k)$ с использованием вейвлет-фильтрации, который соответствует нахождению КА на опорной орбите с параметрами $q(t_k)$;

3. Находится вектор невязок измерений

$$\Delta \theta_j(t_k) = q_{изм,j}(t_k) - q'_j(t_k);$$

4. Рассчитывается фундаментальная матрица $\Phi_{k,k-1} = \Phi(t_k, t_{k-1})$ перехода от параметров $q(t_{k-1})$ к параметрам $q(t_k)$, связывающая эти векторы линейным соотношением:

$$q(t_k) = \Phi(t_{k-1}, t_k) q(t_{k-1}). \quad (3)$$

5. Производится экстраполяция матрицы Kq с предыдущего момента времени t_{k-1} на текущий t_k :

$$Kq'_k = \Phi_{k,k-1} \cdot Kq_{k-1} \cdot \Phi_{k,k-1}^T.$$

6. Рассчитываем весовой вектор \bar{P} (матричный коэффициент усиления):

$$\bar{P}_j = \frac{Kq'_j \cdot \bar{W}}{\bar{W}^T \cdot Kq'_j \cdot \bar{W} + \sigma_j^2}, j = \overline{1,6},$$

где σ_j – среднеквадратическое отклонение погрешностей измерений.

При этом, ввиду идентичности навигационного (изменяемого) параметра и определяемого вектора ПДЦМ, навигационная матрица W будет единичной.

7. Формируется вектор поправок параметров движения центра масс КА

$$\Delta \bar{q} = \bar{P}_j \cdot \Delta \theta_j$$

8. Корректируется априорный вектор \bar{q} :

$$\bar{q}_j = \bar{q}' + \Delta \bar{q}$$

9. Формируется поправка к ковариационной матрице ΔKq :

$$S \Delta Kq_j = \bar{P}_j \cdot W_j \cdot Kq'$$

10. Уточняются компоненты ковариационной матрицы на текущем шаге обработки:

$$Kq_j = Kq' - \Delta Kq.$$

Алгоритм метода динамической фильтрации реализован в скалярной форме, т.е. уточнение вектора ПДЦМ проводится покомпонентно.

Шаги 6-10 выполняются для каждой компоненты вектора ПДЦМ (для x, y, z, Vz, Vy, Vz). То есть в качестве ковариационной матрицы Kq' и вектора \bar{q}' при уточнении компонент вектора ПДЦМ выступает ковариационная матрица и вектор, уточненные на предыдущей итерации.

Уточнение вектора ПДЦМ производится последовательно на выбранном интервале времени с использованием изложенного выше алгоритма. Алгоритм работает циклически с заданным шагом Δt . Оценка вектора \bar{q} , полученная на текущем шаге, обладает достаточной точностью и может быть использована потребителем в бортовом комплексе управления.

Для реализации этого алгоритма необходимы начальные значения матрицы $Kq(t_0)$ и паспортные данные погрешностей измерительного средства ($\sigma_j, j = \overline{1,6}$).

Необходимость модификации динамического фильтра обусловлена следующими причинами. Во-первых, алгоритм динамической фильтрации содержит операцию обращения матрицы. Элементы этой матрицы с течением времени уменьшаются и становятся соизмеримыми с ошибками счета ЦВМ. В предельном случае матрица может стать вырожденной. Во-вторых, в основе построения динамического фильтра положено предположение о том, что уравнения движения и измерений являются линейными. В действительности допущение о линейности уравнений справедливо тогда, когда истинная орбита незначительно отличается от опорной. В силу изложенного выше, возникает ограничение по длительности интервала обработки с использованием метода динамической фильтрации.

Поскольку носители используемых в настоящей работе кусочно-полиномиальных полуортogonalных сплайновых вейвлет содержат конечное число частичных отрезков, то они очень хорошо локализованы во временной области. Т.к. вейвлеты, являются линейными комбинациями фиксированного числа сплайнов, преобразование Фурье которых на бесконечности убывает как $O(\omega^{-m})$, то они хорошо локализованы в частотной области. Поэтому коэффициенты разложения

по ним непериодического сигнала несут как информацию об его поведении на коротком отрезке времени, так и о его «мгновенном спектре».

Далее представлены графики построения прямых базовых вейвлет.

График линейного вейвлета будет иметь вид (рис. 1).

График параболического вейвлета будет иметь вид (рис. 2).

График Кубического вейвлета будет иметь вид (рис. 3).

Для простоты реализации и организации вычислительного процесса обрабатываются и оцениваются координаты вектора ПДЦМ

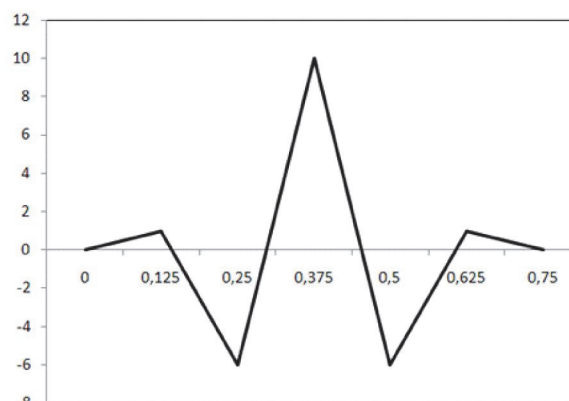


Рис. 1. Линейный вейвлет

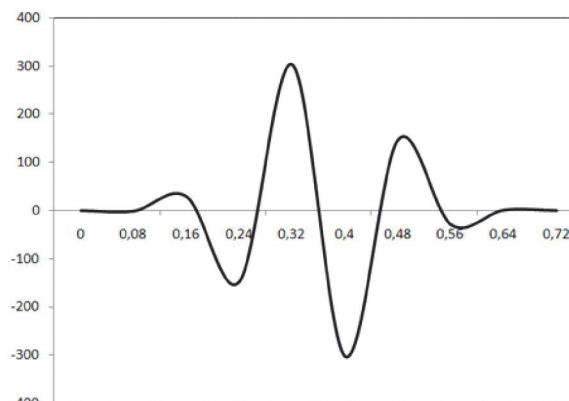


Рис. 2. Параболический вейвлет

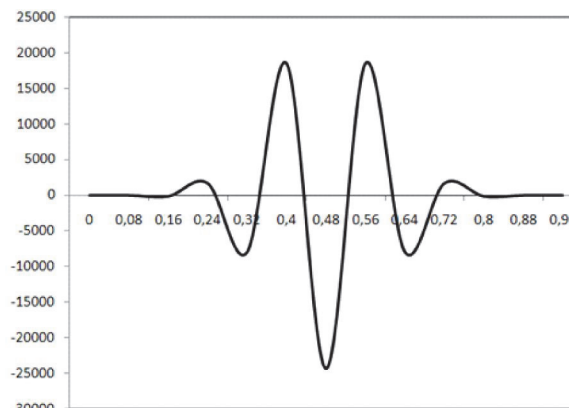


Рис. 3. Кубический вейвлет

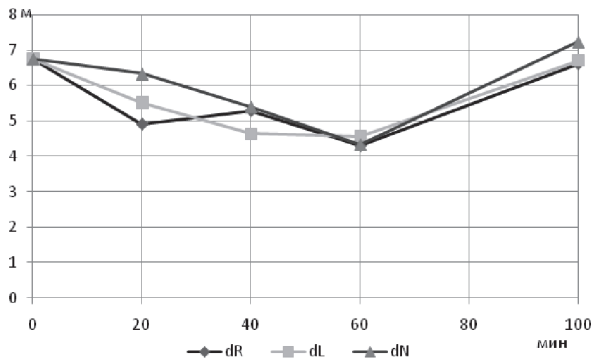


Рис. 4. Зависимость суммарных погрешностей определения координат центра масс КА методом динамической фильтрации от интервала обработки

$q(t) = [x(t), y(t), z(t), Vx(t), Vy(t), Vz(t)]^T$. Однако, результаты удобнее интерпретировать, когда они представлены в орбитальной системе координат $[R, L, N, VR, VL, VN]$, где R, L, N – координаты положения по трем осям: по радиус-вектору КА, вдоль орбиты, по бинормали к плоскости орбиты соответственно. Аналогично, VR, VL, VN – координаты вектора скорости.

Обработка ПДЦМ производилась с дискретностью 600с на интервалах 20 мин, 40 мин, 60 мин, 100 мин.

В качестве вектора σ были взяты следующие значения

$$\sigma = (0,00225, 0,00225, 0,00225, 0,00007, 0,00007, 0,00007).$$

Достоинствами предложенного комбинированного фильтра являются:

- удобство и возможность его практической реализации на ЭВМ;
- возможность получения достаточно точного вектора ПДЦМ в любой момент времени в процессе обработки измерений;
- сглаживание аномальных измерений предфильтрацией с использованием вейвлет;
- оценка параметров движения КА формируется по мере поступления измерительной информации;

SPACECRAFT CENTER OF MASS MOTION EVALUATION WITH COMBINED WAVELET FILTER AND KALMAN FILTERING

© 2012 E.K. Yakovlev¹, I.A. Blatov²

¹ State Research and Production Space-Rocket Center “TsSKB-Progress”, Samara

² Povolzhskiy State University of Telecommunication and Information, Samara

Combined filter which is based on Kalman filtering and wavelet filter is considered in this article. Basic wavelet pictures are given. Processing effect of model-based spacecraft center of mass parameters by combined filter and Kalman filtering are given.

Key words: Kalman filtering, combined filter, spline wavelets, algorithms, motion evaluation accuracy, centroidal motion parameters.

Evgeniy Yakovlev, Design Engineer. E-mail: EvgenKirYakovlev@mail.ru
Igor Blatov, Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor, Head at the Higher Mathematics Department.
E-mail: blatow@mail.ru

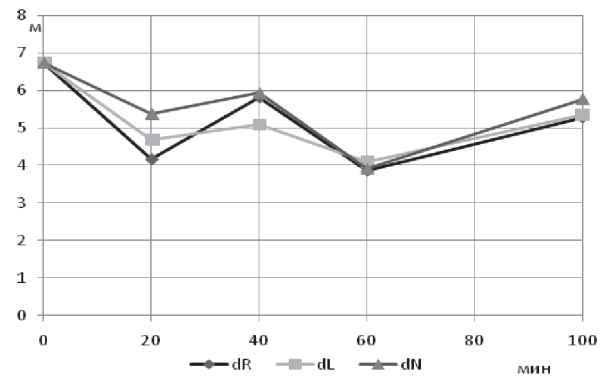


Рис. 5. Зависимость суммарных погрешностей определения координат центра масс КА с использованием комбинированного фильтра от интервала обработки

- точность оценки параметров движения КА комбинированным фильтром выше по сравнению с точностью оценки методом динамической фильтрации (фильтром Калмана);
- достаточная простота его модификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аншаков Г.П., Голяков А.Д., Петрищев В.Ф., Фурсов В.А. Автономная навигация космических аппаратов. Самара, ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2011. 486 с.
2. Порфирьев Л.Ф., Смирнов В.В., Кузнецов В.И. Аналитические оценки точности автономных методов определения орбит. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.
3. Гальченко В.Я., Гринь Н.Ю. Подавление шумов в изображениях с помощью комбинированного вейвлет-фильтра и фильтра Калмана // Информационные технологии. 2005. №6. С. 59-63.
4. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. Пер. с англ. М.: Мир, 2005
5. Чуи Ч. Введение в вейвлеты: Пер. с англ. М.: Мир, 2001. 412 с.
6. Блатов И.А., Бубнова Н.В. Об оценках элементов матриц в методе вейвлет-Галеркина для интегральных сингулярных уравнений // Вестник Самарского государственного университета. Естественная серия. 2004. №3. С. 68-80.
7. Блатов И.А., Бубнова Н.В., Пименов А.С. Псевдоразреженные матрицы и прикладной вейвлет-анализ // Системы управления и информационные технологии. 2006. №1(23). С.68-73.