

УДК 692.7.016

Идентификация параметров движения летательных аппаратов на активном участке траектории с использованием дискретного вейвлет-преобразования*

В.И. Гончаренко, А.А. Кобзарь, Д.С. Кучерявенко

Аннотация

Задача идентификации параметров движения летательных аппаратов на активном участке траектории характеризуется рядом особенностей, связанных с наличием ограниченного объема траекторной информации для отдельных участков полёта. Для фильтрации исследуемого массива телеметрической информации, содержащей дискретные значения кажущейся скорости, разработан алгоритм фильтрации на основе дискретного вейвлет-преобразования. Предложена методика идентификации параметров движения ЛА по результатам телеметрических измерений в условиях отсутствия априорных данных о статистических характеристиках погрешностей измерений и оцениваемых параметров.

Ключевые слова:

телеметрические измерения; идентификация параметров движения; математическая модель движения; аппарат вейвлет-преобразования; алгоритм фильтрации; методика; точность фильтрации измерений.

Задача идентификации параметров движения летательных аппаратов (ЛА) на активном участке траектории (АУТ) решается, как в интересах модернизации отечественных ЛА, так и для оценки возможностей зарубежных ЛА. Такая задача возникает, когда требуется оценить адекватность расчетных математических моделей показателей целевого применения ЛА реальным условиям и всестороннее исследовать характеристики состояния

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-08-00750-а.

ЛА с учетом внешних условий полета, и на этой основе определить летно-технические характеристики (ЛТХ) по результатам летных испытаний (ЛИ) или на основе имеющейся телеметрии.

В общем случае особенностью решения такой задачи является совместная обработка данных телеметрических и траекторных измерений с целью идентификации параметров движения ЛА на всем протяжении АУТ.

Однако, наличие ограниченного объема траекторной информации для отдельных участков АУТ при проведении ЛИ отечественных ЛА (связано с техническими характеристиками траекторных измерительных средств) и отсутствие траекторных измерений для зарубежных ЛА приводит к постановке задачи идентификации параметров движения ЛА на основе только телеметрических измерений. В связи с чем, необходимо разработать методику идентификации параметров движения ЛА по результатам телеметрических измерений в условиях отсутствия априорных данных о статистических характеристиках погрешностей измерений и оцениваемых параметров и минимальной априорной информации об особенностях процесса измерений.

Основными элементами задачи идентификации параметров движения ЛА являются математическая модель движения, уравнения измерений, критерий оптимальности оценок [1].

При решении задачи идентификации параметров движения ЛА используются следующие исходные данные:

- 1) данные телеметрических измерений вектора кажущейся скорости ЛА в начальной стартовой системе координат;
- 2) исходная геодезическая информация – географические координаты точки старта ЛА и азимут прицеливания;
- 3) модель фигуры Земли и используемого гравитационного поля.

Система дифференциальных уравнений движения центра масс ЛА в начальной стартовой системе координат в конечном счете представляется в матричной форме записи второго закона И.Ньютона и дополняющего его матричного уравнения кинематических связей между параметрами движения:

$$\begin{cases} \vec{V}(t) = \vec{V}_0 + \vec{W}(t) + \int_{t_0}^t \vec{g}(r) dt \\ \vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{V}_0 t + \int_{t_0}^t \vec{W}(t) dt + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t \vec{g}(r) dt^2 \end{cases}, \quad (1)$$

где: $\vec{W}(t)$ - вектор кажущейся скорости движения ЛА в начальной стартовой системе координат, $\vec{g}(r)$ - ускорение силы притяжения, $\vec{V}(t)$ - вектор действительной скорости движения, $\vec{r}(t)$ - вектор действительных координат движения, \vec{V}_0, \vec{r}_0 - начальные условия движения.

Исходные координаты точки старта (B_0, L_0, H_0) определяются в привязке к референц-эллипсоиду (эллипсоиду Красовского), а при задании начальных условий (\vec{r}_0, \vec{V}_0) пересчитываются на общий земной эллипсоид.

При математическом описании движения ЛА в качестве основных геофизических условий полета будем рассматривать атмосферу, гравитационное поле Земли (ГПЗ) и силы тяги двигательной установки. При этом суммарное влияние активных сил учитывается в форме кажущегося ускорения, определяемого телеметрической информацией. Другими факторами (притяжение Луны и планет, солнечное давление, магнитное поле и др.) при решении поставленной задачи можно пренебречь ввиду их исключительно малого воздействия на полет ЛА.

При построении соответствующих математических моделей ГПЗ считают, что притягиваемые тела (ЛА и отделяемые элементы) являются материальными точками, а притягивающее тело (Земля) - абсолютно твердым недеформируемым телом с неравномерным распределением масс. Тогда сила притяжения \vec{G} ЛА Землей определяется как векторная сумма сил притяжения ЛА материальными частицами, из которых состоит Земля.

В качестве более гибкого и имеющего простую формульную схему расчета гравитационного ускорения используем метод моделирования ГПЗ системой точечных масс [2]. На 4 Государственном центральном межвидовом полигоне (ГЦМП) Министерства обороны Российской Федерации в результате многочисленных пусков были с большой достоверностью проверены математические модели гравитационного поля Земли для

системы из 44, 60 и 320 точечных масс. В разработанной методике для расчёта гравитационного ускорения используется система из 320 точечных масс.

Таким образом, идентификация параметров движения ЛА на основе решения системы дифференциальных уравнений (1), описывающих движение ЛА, может быть достаточно точно проведена при наличии измерительной информации о кажущейся скорости.

Особенностью телеметрических измерений кажущейся скорости является то, что измерения производятся обычно с частотой, на порядок и более превышающей частоту изменения характеристик объекта испытаний. При полёте ЛА это дает избыточность получаемой информации. Такая избыточность обуславливается возможностью аномальных режимов работы ЛА при испытаниях и наличием погрешностей измерений. Появление погрешностей измерений обусловлено машинными сбоями при предварительной математической обработке измерений, сбоями при передаче данных по линиям связи и сбоями работы самого измерительного средства.

Практика показывает, что наличие погрешностей измерений при проведении идентификации параметров движения объекта испытаний на АУТ может внести существенные погрешности в оценки параметров. Поэтому для получения оптимальных оценок необходимо провести предварительную обработку результатов измерений. Эта задача решается путем проведения фильтрации измерений.

Наиболее известными применяемыми методами фильтрации являются:

- 1) преобразование Фурье;
- 2) полиномиальное сглаживание;
- 3) субполосная фильтрация;
- 4) статистические методы обработки измерительной информации.

В настоящее время все более широкое применение находит аппарат вейвлет-преобразования в связи с хорошей локализацией, как по частоте, так и по времени.

Для фильтрации исследуемого массива телеметрической информации, содержащей дискретные значения кажущейся скорости, в данной работе разработан алгоритм на основе дискретного вейвлет-преобразования, блок схема которого приведена на рис. 1.

Существует большое количество вейвлетов, однако для решения задачи фильтрации измерений необходимо, чтобы они обладали такими свойствами как симметрия и возможность точного восстановления сигнала. Данными свойствами применительно к рассматриваемой информации обладают вейвлеты Добеши, Симлета, Койфлета, а также биортогональные парные вейвлеты с компактным носителем. Эти вейвлеты позволяют аппроксимировать рассматриваемый сигнал, выявляя все его локальные особенности.

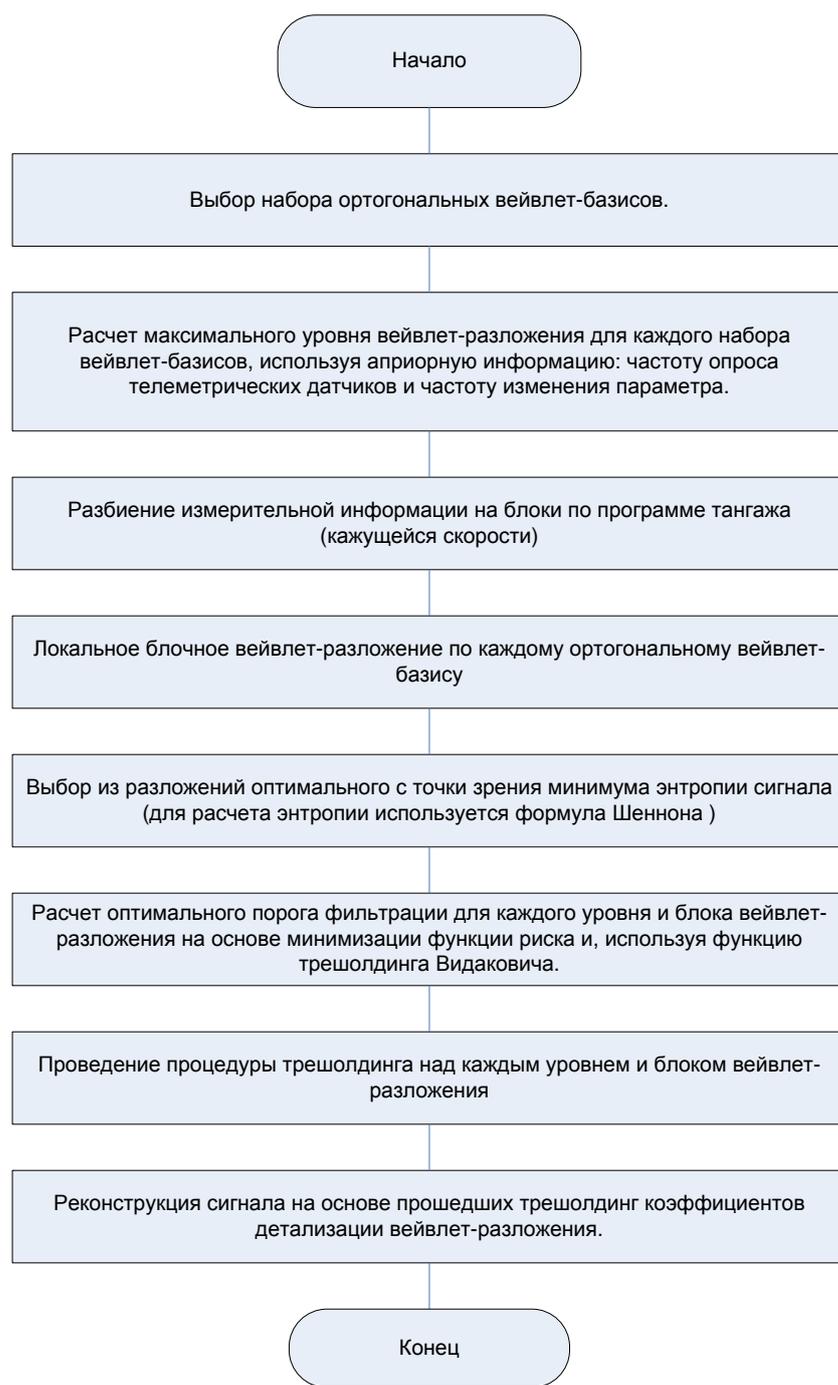


Рис. 1. Блок-схема алгоритма фильтрации измерений на основе дискретного вейвлет-преобразования

Выбор анализирующего вейвлета не определен заранее. Простота оперирования с вейвлетом в ходе численных расчетов и представления результатов (минимизация используемых параметров) играет важную роль. Неудачный выбор конкретной формы вейвлета может привести к невозможности решения задачи.

В качестве критерия выбора оптимального вейвлет-базиса примем критерий энтропии Шеннона, который количественно характеризует достоверность передаваемого сигнала и используется для расчета количества информации. Энтропия, определенная по формуле Шеннона (2), дает критерий того, сколько эффективных компонент необходимо, чтобы представить сигнал в определенном базисе

$$El = \exp\left(-\sum_{j=1}^{j_{\max}} \sum_{k=1}^{L_j} |d_{j,k}|^2 \log_2 |d_{j,k}|^2\right), \quad (2)$$

где $d_{j,k}$ - k -й коэффициент вейвлет-разложения уровня j , j_{\max} - максимальный уровень разложения, L_j - количество коэффициентов разложения на j -м уровне.

Выбор глубины разложения j_{\max} [5] на практике зависит от двух факторов: количества коэффициентов разложения, ограниченного временем преобразования, и частотных свойств сигнала. Последний фактор фиксирует величину глубины разложения на уровне, ниже которого коэффициенты разложения будут неинформативными.

При вычислениях вейвлет-образов сигнала масштабы целесообразно выбирать таким образом, чтобы в полученном спектре присутствовали отклики той компоненты сигнала, которая необходима для дальнейшей обработки.

Оценить требуемый масштаб по имеющимся данным можно, используя свойство избыточности телеметрической информации. Частота опроса телеметрических датчиков обычно в 2,5-3 раза превышает частоту изменения самого параметра. Используя центр $\langle \omega \rangle$ и радиус частотного окна Δ_{ψ} базового вейвлета, частоту опроса датчиков телеметрической информации f_d , частоту изменения параметра f_p , было получено выражение максимального уровня разложения, который использовался для фильтрации измерений

$$j_{\max} = \text{int} \left(\log_2 \frac{\langle \omega \rangle f_d}{f_p} \right). \quad (3)$$

Типовой способ фильтрации результатов измерений – удаление высокочастотных составляющих из спектра сигнала. Применительно к вейвлетным разложениям это может быть реализовано непосредственно удалением детализирующих коэффициентов высокочастотных уровней.

В разработанном алгоритме используется трешолдинг Видаковича, обеспечивающий наибольшее соотношение сигнал/шум:

$$T = \text{sign}(y_i) \sqrt{y_i^2 - r^2} I(|y_i| \geq r), \quad (4)$$

где r - пороговый уровень, y_i - i -й коэффициент разложения, $I(|y_i| \geq r)$ - условие применения функции.

Суть данного способа заключается в последовательном применении функции трешолдинга $T(\gamma)$ к уровням $j_0, j_0 + 1, \dots, j_{\max}$ разложения высокочастотной составляющей сигнала, а также принятии решения в соответствии с используемой функцией о сохранении коэффициентов рассматриваемого уровня или их возможного пересчета.

Данный алгоритм фильтрации оптимален с точки зрения минимизации функции риска, которую можно определить по критерию Штайна несмещенной оценки риска (от англ. Stein's unbiased risk estimation) [4]:

$$R_j(r_{j,i}) = \sum_{l=1}^{L_j} (\mathfrak{E}_{j,l} - g_{g,l})^2, \quad (5)$$

где $\{\hat{g}_{j,l} | l = \overline{1, L_j}\}$ - истинные коэффициенты детализации, полученные после вейвлет-преобразования кажущейся скорости объекта испытаний, $g_{g,l} = T(\gamma_{j,l})$ - коэффициенты детализации, полученные после фильтрации кажущейся скорости.

Функция риска для трешолдинга Видаковича имеет вид:

$$\bar{r}_j = \arg \min_{r_{j,i} | i = \overline{1, L_j}} \sum_{l=1}^{L_j} \left(\gamma_{j,l}^2 - \bar{r}_{j,i}^2 - 2|\gamma_{j,l}| \sqrt{\gamma_{j,l}^2 - \bar{r}_{j,i}^2} + 2 \frac{\sigma_j^2 |\gamma_{j,l}|}{\sqrt{\gamma_{j,l}^2 - \bar{r}_{j,i}^2}} \right) I(|\gamma_{j,l}| \geq r_{j,i}), \quad (6)$$

где $\gamma_{j,l}$ - i -й коэффициент детализации j -го уровня разложения, σ_j^2 - дисперсия эмпирического шума, $r_{j,i}$ - i -й порог j -го уровня разложения.

Дисперсия σ_j^2 эмпирического шума заменяется оценкой $\hat{\sigma}_j^2$, рассчитанной на основании эмпирических коэффициентов детализации, т.е.

$$\hat{\sigma}_j^2 = \frac{1}{L_j - 1} \sum_{l=1}^{L_j} (\gamma_{j,l} - \langle \gamma_j \rangle)^2, \quad (7)$$

где $\langle \gamma_j \rangle$ - среднее значение коэффициентов детализации уровня j .

Локальный блочный трешолдинг является наиболее предпочтительным для решения задачи фильтрации измерений, так как более адаптивен к исходному сигналу, что в свою очередь ведет к увеличению соотношения сигнал/шум [3].

Целесообразно выделить блоки по основным характерным участкам полета ЛА, например, по обработке программы тангажа.

Преимущества разработанного алгоритма фильтрации по сравнению с существующими алгоритмами заключаются в следующем:

а) позволяет учитывать в постановке задачи отсутствие априорной информации об особенностях измерительной информации;

б) является универсальным и может применяться не только для фильтрации измерений кажущейся скорости, но и для других телеметрических и траекторных измерений;

в) влияние «человеческого фактора» на конечный результат сведено к минимуму вследствие применения полностью замкнутого алгоритма;

г) учитывает при фильтрации локальные особенности измерительной информации за счет хорошей частотно-временной локализации вейвлетов.

Оценку эффективности фильтрации результатов измерений на основе разработанного алгоритма проведем по результатам пуска ракеты-носителя К65М-Р на 4 ГЦМП, который проводился в целях запуска навигационных спутников.

На рис. 2 приведены измеренные ($W_{x_тми}$) и расчетные (W_x) значения проекции кажущейся скорости ракеты-носителя (РН) на ось x начальной стартовой системы координат на интервале времени с 0 по 91 секунду АУТ. Как видно данные телеметрических измерений значительно зашумлены. Проведем фильтрацию телеметрических измерений проекций кажущейся скорости на ось x начальной стартовой системы координат на основе разработанного алгоритма фильтрации (см. рис.1).

На рис. 3 показаны графики изменения проекции кажущейся скорости на ось x стартовой системы координат для расчетных значений ($W_{x_расчет}$), значений, полученных по телеметрическим измерениям ($W_{x_тми}$), и значений, полученных после проведения фильтрации ($W_{x_фильтр}$).

Аналогично проведем фильтрацию измерений кажущейся скорости РН на оси y, z начальной стартовой системы координат.

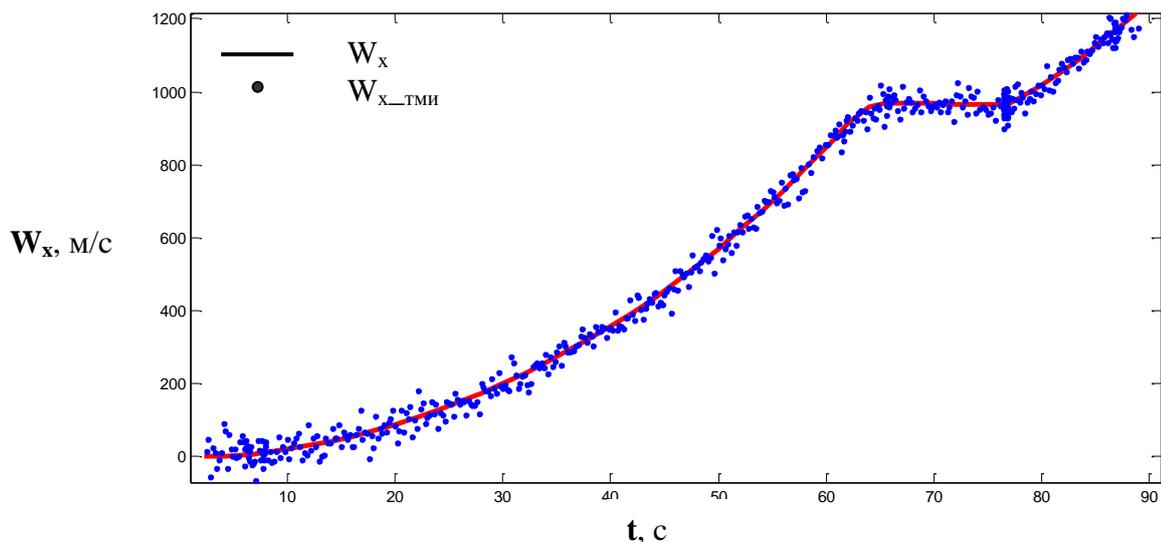


Рис. 2. Графики изменения проекции кажущейся скорости, полученной по телеметрическим измерениям и по расчетным значениям на АУТ

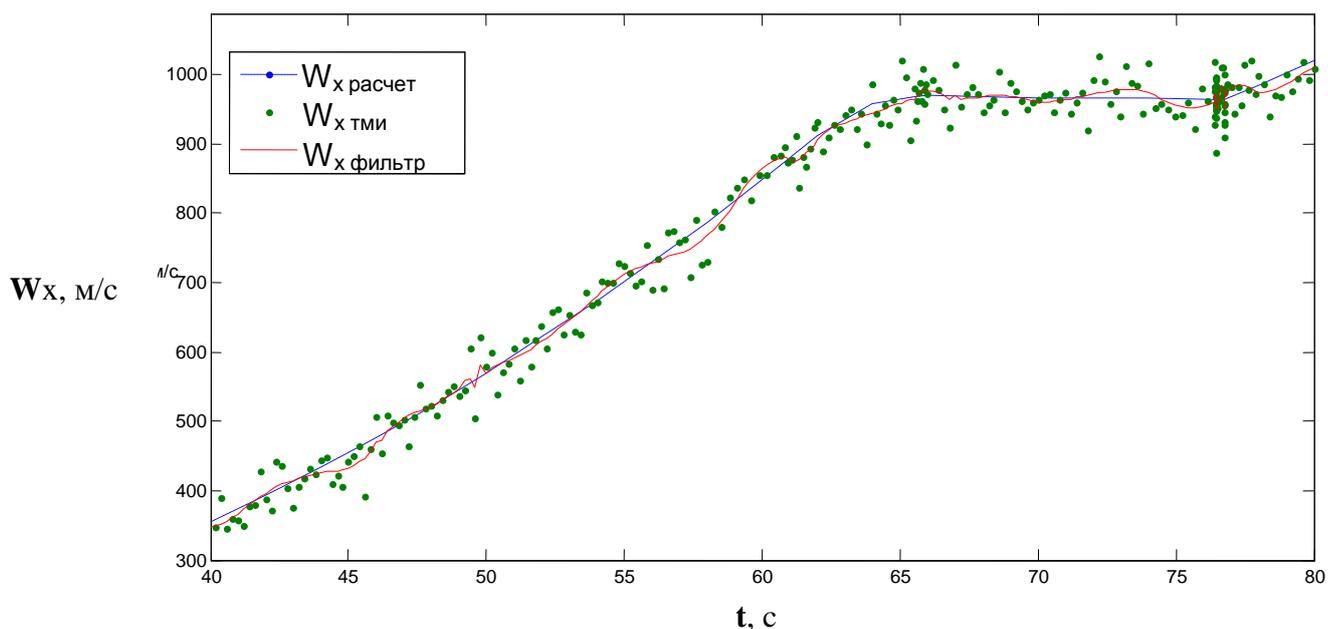


Рис. 3. Графики изменения проекции кажущейся скорости для расчетных значений, значений, полученных по телеметрическим измерениям и после проведения фильтрации.

Проведем сравнительный анализ результатов, полученных при фильтрации измерений с использованием существующих алгоритмов на основе локально-сплайновых моделей 2-ой и 4-ой степени гладкости (ЛСМ-2, ЛСМ-4) [6] и предлагаемого алгоритма фильтрации. В качестве критерия оценки точности фильтрации примем оценки, полученные по остаточным невязкам:

$$\sigma_s^{-2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (8)$$

где y_i - исходная телеметрическая информация, \hat{y}_i - оценка параметра после обработки, n - количество отсчетов сигнала.

Результаты оценивания кажущейся скорости объекта испытаний представлены в табл.1.

Таблица 1.

Оценка точности фильтрации измерений кажущейся скорости различными методами

Метод	$\bar{\sigma}_{w_x}$, м/с	$\bar{\sigma}_{w_y}$, м/с	$\bar{\sigma}_{w_z}$, м/с
ЛСМ-2	7.6985	4.6781	2.7845
ЛСМ-4	7.7265	4.6866	2.8631
Вейвлет	7.0911	4.0022	2.1094

Как видно из табл. 1 применение для фильтрации измерений кажущейся скорости алгоритма на основе дискретного вейвлет-преобразования обеспечивает большую точность и обеспечивает минимальные значения дисперсии остаточных невязок.

Рассчитаем траекторные и динамические характеристики РН на АУТ, используя обработанные измерения кажущейся скорости различными методами фильтрации, и проведем анализ и оценку параметров движения РН на момент прохождения предварительной команды (ПК) и выключения двигательной установки 1-й ступени. Сравнение проведем с расчетными значениями параметров движения (см. табл. 2).

Таблица 2.

Отклонения траекторных и динамических параметров движения РН от расчетных в стартовой системе координат на момент ПК

Метод расчёта кинематических параметров по ТМИ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔV_x	ΔV_y	ΔV_z
Дискретное вейвлет-преобразование	1187	498	1099	9.6	8.1	-10.6
ЛСМ-2	1540	755	890	20.8	38.2	-26.3
ЛСМ-4	1610	805	994	23.8	45.2	-18.3

На рис. 4 приведены графики изменения координаты X в начальной стартовой системе координат для расчётных значений и значений, полученных на основе использования измерений кажущейся скорости, обработанных различными методами фильтрации.

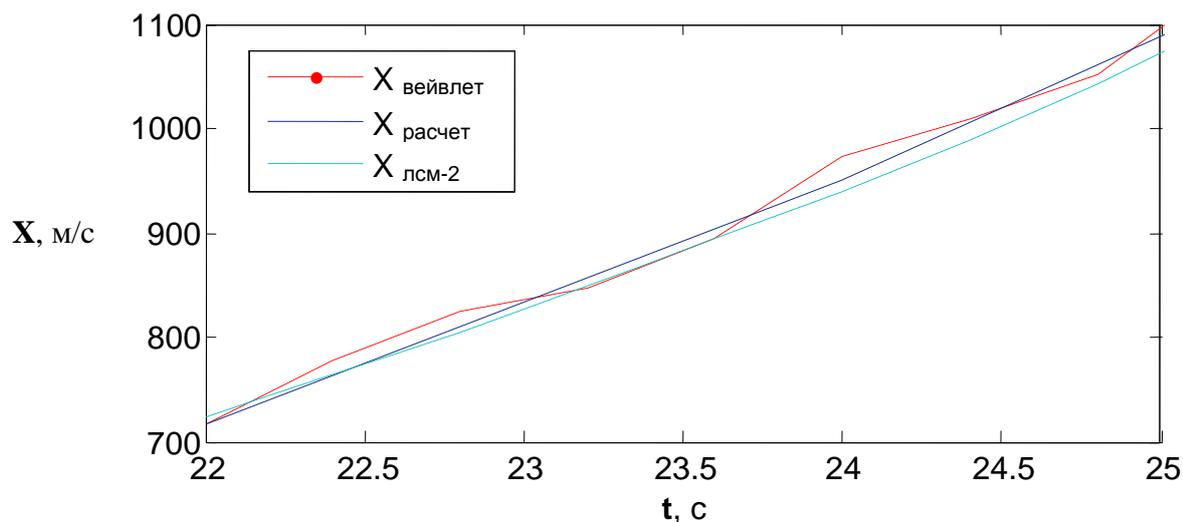


Рис. 4. Графики изменения координаты X , полученные на основе использования различных методов фильтрации.

Как видно из представленных данных, применение для фильтрации измерений разработанного алгоритма на основе дискретного вейвлет-преобразования обеспечивает более точную идентификацию параметров движения ЛА.

Значительное отклонение параметров движения от расчетных при использовании сплайновых моделей обусловлено тем, что они не учитывают локальные особенности телеметрической информации. Кроме этого, наряду с фильтрацией погрешностей измерений ЛСМ сглаживают также полезный сигнал, что в свою очередь вносит искажения при расчете траектории движения ЛА.

Практическая значимость разработанной методики состоит в том, что ее применение на ранних этапах разработки новых образцов ракетно-космической техники за счет повышения адекватности математической модели движения ЛА его реальным характеристикам, может обеспечить сокращение необходимого количества летных испытаний отечественных ЛА, а также повысить точность идентификации параметров движения и оценить возможности зарубежных ЛА.

Библиографический список

1. Воскобойников Ю.Е. Устойчивые методы и алгоритмы параметрической идентификации. - Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2006. – 182 с.
2. Экспериментальная баллистика: Учебник под ред. М.Ф. Белянского / МО СССР, г. Харьков, 1987.
3. Воробьев В.В., Грибунин В.Н. Теория и практика вейвлет-преобразования.– С-Пб.: Издательство ВУС, 1999.
4. Алексеев К.А. Теория и практика шумоподавления в задаче обработки сейсмоакустических сигналов: Электронный ресурс // http://www.nsu.ru/matlab/MatLab_RU/wavelet/.
5. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. Успехи физических наук. – 1996, № 11. – С. 1145.
6. Кобзарь А.А., Корнеев А.А. Проблемы получения достоверных оценок летно-технических характеристик при проведении летных испытаний новых образцов ВВТ и возможные пути их решения / Научно-технический сборник ВА РВСН имени Петра Великого, 2006. Выпуск № 236. – С. 201-203.

Сведения об авторах

Гончаренко Владимир Иванович, доцент, директор Военного института Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н. МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499) 158-17-01; e-mail: vladimirgonch@mail.ru

Кобзарь Александр Антонович, начальник отдела войсковой части 15646, к.т.н.

тел.: (499) 158-17-01; e-mail: kobzar.alexant@yandex.ru.

Кучерявенко Денис Сергеевич, адъютант Военной академии РВСН имени Петра Великого.

ВА РВСН им. Петра Великого, Китайгородский проезд, д. 9/5, Москва, 109074;

тел.: (499) 158-17-01; e-mail: d_kucheryavenko@mail.ru.