

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-2-13-21>

УДК 621.396.96

Д. С. Боровицкий¹, А. Е. Жестерев¹, В. П. Ипатов², Р. М. Мамчур²✉

¹АО "Российский институт радионавигации и времени"
пр. Обуховской Обороны, д. 120, лит. ЕЦ, Санкт-Петербург, 192012, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

ФИЛЬТРАЦИЯ И СГЛАЖИВАНИЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ВЫСОТОМЕРА ПРИ НАЗЕМНОЙ ДООБРАБОТКЕ

Аннотация

Введение. Спутниковый радиовысотомер является основным элементом космических аппаратов, функционирующих в составе комплексов дистанционного мониторинга поверхности Земли. Бортовая петля слежения за запаздыванием в спутниковом высотомере, согласно утвердившимся воззрениям, функционально служит лишь инструментом надежного удержания принимаемого эхосигнала в следящем окне, тогда как "чистовое" измерение альтиметрических параметров (высоты орбиты носителя, значимой высоты волны, отражающей способности зондируемой поверхности и др.) возлагается на наземную дообработку данных. В ходе указанной процедуры данные с высотомера подвергаются, в частности, фильтрации и сглаживанию.

Цель работы. Исследование алгоритмов дообработки данных, транслируемых с высотомера, в наземном измерительном сегменте.

Методы и материалы. Известно, что фильтрация данных выполняется уже на борту космического аппарата и реализована в контуре автосопровождения эхосигнала по времени на базе α - β -фильтра. Тем не менее, на этапе наземной дообработки более целесообразным представляется применение фильтра Калмана, обладающего рядом теоретически оптимальных свойств и эффективно использующего доступный вычислительный ресурс.

Результаты и заключение. В статье описана реализация упомянутых операций фильтрации и сглаживания на базе алгоритма Калмана применительно к выработанным ранее оценкам запаздывания эхосигнала. По результатам проведенного компьютерного моделирования констатируется, что калмановские фильтрация и сглаживание повышают точность оценки запаздывания в режиме дообработки в два раза и более в зависимости от значимой высоты волны.

Ключевые слова: спутниковый высотомер, дообработка, фильтр Калмана, сглаживание

Для цитирования: Фильтрация и сглаживание данных спутникового высотомера при наземной дообработке / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 2. С. 13–21. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-2-13-21

Источник финансирования. Инициативная работа.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.12.2018; статья принята к публикации 18.03.2019; опубликована онлайн 24.04.2019



Dmitry S. Borovitsky¹, Alexander E. Zhesterev¹, Valery P. Ipatov², Ruslan M. Mamchur^{2✉}

¹JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time"
120, Lt. EC5, Obukhovskoy Oborony pr., 192012, St. Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

SATELLITE ALTIMETER DATA FILTERING AND SMOOTHING IN THE COURSE OF GROUND-BASED RETRACKING

Abstract

Introduction. Satellite radar altimeter is an essential part of the Earth remote sensing space missions. Satellite altimeter on-board delay-lock loop, by a widely shared concept, is operationally just a tool of a reliable retaining of received echo-signal within the tracking window, while "fine" altimetric parameter (orbit height, significant wave height, scattering cross section per unit of a probed surface, etc.) measuring is committed to the ground-based retracking of data. In particular, in the course of retracking altimeter data are being filtered and/or smoothed.

Objective. The paper subject is study of retracking algorithms of altimeter data transmitted from the space vehicle to the ground segment.

Methods and materials. It is known that data filtering already presents on-board the space vehicle and is implemented in delay-lock loop based on the α - β -filter. However, at the stage of ground-based retracking it seems more appropriate to use the Kalman filter, which possesses a number of theoretical optimal features and is efficient as for utilization of the available computational resource.

Results and conclusions. In the paper implementation of filtering and smoothing via Kalman algorithm is described. On the ground of computer simulation data it is stated that Kalman filtering and smoothing make estimate accuracy two and more times higher depending on significant wave height.

Key words: satellite altimeter, retracking, Kalman filter, smoothing

For citation: Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. Satellite Altimeter Data Filtering and Smoothing in the Course of Ground-Based Retracking. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 2, pp. 13–21. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-2-13-21 (In Russ.)

Source of financing. Initiative work.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Received 05.12.2018; accepted 18.03.2019; published online 24.04.2019

Введение. Спутниковый высотомер является неотъемлемой частью космических миссий дистанционного зондирования Земли. Обработка данных высотомера может быть условно разбита на три этапа [1], [2]:

– первичная обработка на борту космического аппарата (КА), информационное ядро которой составляют процедуры слежения за запаздыванием и за уровнем принимаемого эхосигнала;

– дообработка, в процессе которой предварительные оценки альтиметрических параметров, переданные с борта КА, максимально уточняются с использованием процедур фильтрации/сглаживания;

– постобработка, в задачи которой входит учет разнообразных физических факторов, потенциально снижающих достоверность полученных результатов.

В настоящей статье рассмотрена дообработка данных высотомера, поступающих на наземный комплекс с борта КА по телеметрической линии. В [3], [4] внимание фокусировалось на индивидуальной обработке каждого из накопленных за N зондирований эхосигналов. Дальнейший ресурс снижения погрешностей полученных оценок альтиметрических параметров состоит в их фильтрации и сглаживании. В публикациях по спутниковым альтиметрам серии TOPEX/Poseidon, Jason и им подобным в качестве эталона для сопоставлений принят односекундный интервал фильтрации/сглаживания, охватывающий от десятка до нескольких десятков (в зависимости от частоты зондирования) усредненных эхосигналов [5]–[7].

Терминологически фильтрация и сглаживание различаются тем, что первая процедура оценива-

ет значение нужного параметра на текущий момент t на базе данных, поступивших до этого момента включительно, тогда как вторая способна возвращаться от будущего к прошлому, улучшая оценку на момент t за счет использования данных, наблюдаемых после него [2], [8], [9]. Вначале будет рассмотрена процедура фильтрации, поскольку сглаживание может трактоваться как двойная фильтрация – сначала "вперед", т. е. по мере поступления данных, одновременно записываемых в буфер, а затем "назад", т. е. по ходу считывания их из буфера в обратном порядке [9]–[11].

Фильтрация выполняется уже на борту КА: в конуре автосопровождения эхосигнала по времени упомянутых миссий она реализуется, например, на базе α - β -фильтра, эквивалентного замкнутой петле второго порядка астатизма [6], [12], [13]. На этапе наземной дообработки можно было бы пойти по аналогичному пути, фильтруя каждый из оцениваемых параметров в "своем" α - β -фильтре. Однако более целесообразным представляется использование процедуры Калмана, весьма эффективно утилизирующей доступный вычислительный ресурс и обладающей рядом теоретически оптимальных свойств. Если, в частности, априорная динамика измеряемых параметров адекватно описывается марковской моделью, а шум наблюдений аддитивен, то фильтр Калмана минимизирует среднеквадратические ошибки оценок на рассматриваемый момент времени с учетом всей предыстории наблюдений. Если вдобавок флуктуации модели и шум наблюдения считать гауссовскими, фильтр Калмана обретает оптимальность и по критерию максимума апостериорной вероятности оценок [9]–[11].

Фильтр Калмана. Приведем соотношения, описывающие идею дискретной фильтрации Калмана [9]–[11]. В рамках априорной марковской модели изменение вектора состояния \mathbf{x}_k от k -го момента к $(k+1)$ -му описывается уравнением состояния

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi_k \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \quad k=0, 1, \dots, \quad (1)$$

где Φ_k – матрица перехода (переходная матрица) с размерами $n \times n$; \mathbf{w}_k – n -мерный случайный вектор с нулевым средним $\overline{\mathbf{w}_k} = 0$ и корреляционной матрицей $Q_k = \overline{\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T}$. Для того чтобы цепь состояний (1) оказалась марковской, векторы \mathbf{w}_k для разных моментов времени должны быть независимы.

Уравнение наблюдения, связывающее текущий наблюдаемый вектор \mathbf{y}_k размером m с текущим вектором состояния, имеет вид

$$\mathbf{y}_k = H_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad k=0, 1, \dots,$$

где H_k – матрица с размерами $m \times n$; \mathbf{v}_k – m -мерный случайный вектор с нулевым средним $\overline{\mathbf{v}_k} = 0$ и корреляционной матрицей $R_k = \overline{\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T}$. Последовательность векторов \mathbf{v}_k образует шум измерений (наблюдений). Подобно векторам \mathbf{w}_k в уравнении состояния (1) для разных моментов времени шумы измерений независимы. Шумы модели и измерений также взаимно независимы.

Пусть $\hat{\mathbf{x}}_k$ – оценка вектора состояния, выработанная на основании всех наблюдений до k -го включительно; $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ – прогноз этой оценки на основании всех предшествующих наблюдений (т. е. вплоть до $(k-1)$ -го); P_k – корреляционная матрица ошибок измерения вектора состояния на k -м шаге, определенная всеми наблюдениями до k -го включительно:

$$P_k = \overline{(\hat{\mathbf{x}}_k - \mathbf{x}_k)(\hat{\mathbf{x}}_k - \mathbf{x}_k)^T},$$

а P_k^- – экстраполированная по предшествующим наблюдениям версия P_k . Тогда уравнение, описывающее алгоритм Калмана, запишется в виде [9]–[11]

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + K_k (\mathbf{y}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k^-),$$

где матрица K_k с размерами $n \times m$ есть коэффициент усиления фильтра Калмана на k -м шаге.

Коэффициент усиления K_k и корреляционная матрица P_k на выходе фильтра даются соотношениями

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1};$$

$$P_k = (I_n - K_k H_k) P_k^-,$$

где I_n – единичная матрица с размерами $n \times n$, а экстраполированная корреляционная матрица P_k^- определяется равенством

$$P_k^- = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1}, \quad k=1, 2, \dots$$

Сглаживание альтиметрических данных.

Как уже указывалось, при сглаживании для уточнения оценки измеряемого параметра в текущий момент t привлекаются не только наблюдения, поступившие вплоть до этого момента, но и те, которые будут получены впоследствии. Иначе говоря, при сглаживании выдача оценки для момента t откладывается до накопления количества наблюдений, гарантирующего приемлемую достоверность результата. В приложении к спутниковой альтиметрии сглаживание актуально, например, в задачах ассимиляции, т. е. учета больших массивов равноточных данных в многомерных геофизических, океанографических и метеорологических моделях, используемых для прогнозирования климатических изменений, мониторинга океанских течений и циркуляций и т. п. [1], [8], [14]–[16].

Традиционно принято различать три разновидности процедуры сглаживания [9]–[11], [17]:

- на фиксированном интервале, когда все наблюдения, набранные на временном отрезке $[0, T]$, используются для формирования оценки на произвольный момент времени внутри этого отрезка: $t \in [0, T]$;

- для фиксированной точки $t = t_0$ по наблюдениям до произвольного момента $T > t_0$;

- с фиксированной задержкой, т. е. при априори заданном запаздывании формирования оценки относительно момента ее привязки к реальному времени.

Для дообработки альтиметрической информации характерна первая из перечисленных процедур, которая и описана ниже.

Как отмечалось, общепринятая технология сглаживания реализуется по схеме "вперед–назад" (forward–backward). Проход "вперед" есть обычная фильтрация Калмана, усложненная запоминанием результатов всех промежуточных шагов (оценок вектора состояния $\hat{\mathbf{x}}_k$, а также экстраполированной P_k^- и вычисленной P_k корреляционных матриц, $k = 1, 2, \dots$). Указанная дополнительная нагрузка на память, отсутствующая при фильтрации, необходима для выполнения прохода в обратном направлении.

Предположим, что интервал сглаживания охватывает M шагов, и введем добавочные обозначения: $\hat{\mathbf{x}}_{k|M}$ – окончательная (при проходе назад) оценка

вектора состояния на k -м шаге; $P_{k|M}$ – корреляционная матрица, вычисленная на k -м шаге прохода назад; G_k – коэффициент усиления k -го шага фазы "назад". По завершении процедуры фильтрации (фазы "вперед") проход назад стартует со значения $k = M$ при начальных условиях

$$\hat{\mathbf{x}}_{M|M} = \hat{\mathbf{x}}_M; P_{M|M} = P_M$$

и продолжается для $k = M - 1, M - 2, \dots$ вплоть до $k = 1$ согласно уравнениям сглаживания [9]–[11], [17]:

$$G_k = P_k \Phi_k^T (P_{k+1}^-)^{-1};$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|M} = \hat{\mathbf{x}}_k + G_k (\hat{\mathbf{x}}_{(k+1)|M} - \Phi_k \hat{\mathbf{x}}_k);$$

$$P_{k|M} = P_k + G_k (P_{(k+1)|M} - P_{k+1}^-) G_k^T.$$

Моделирование процедур фильтрации и сглаживания при дообработке. Рассмотрим приложение алгоритма Калмана к фильтрации последовательности оценок запаздывания, выдаваемых временным дискриминатором дообработки. Последний формирует оценку для каждого из усредненных за N зондирований эхосигналов. Выберем для описания динамики измеряемого параметра простую модель второго порядка, считая компонентами вектора состояния \mathbf{x}_k искомое запаздывание τ_k усредненного эхосигнала на k -м шаге и его приращение за один шаг $\dot{\tau}_k$:

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \tau_k \\ \dot{\tau}_k \end{bmatrix}.$$

Примем в качестве переходной следующую матрицу, не зависящую от времени:

$$\Phi_k = \Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, k = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

означающую, что без учета шума модели значение τ_k прирастает относительно τ_{k-1} на величину $\dot{\tau}_k$, причем $\dot{\tau}_k$ остается неизменной. Будем также считать шум модели стационарным с корреляционной матрицей

$$Q_k = Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sigma_q^2 \end{bmatrix}, k = 0, 1, \dots, \quad (3)$$

означающей, что модельный шум с дисперсией σ_q^2 непосредственно влияет только на вторую компоненту вектора состояния.

Описанная модель отвечает движению со случайным ускорением, примерный диапазон значений которого при пролете КА над акваторией можно косвенно оценить, опираясь на данные некоторых источников. В частности, в [2], [6] отмечается, что в режиме дообработки целесообразно корректировать фильтруемые данные по ускорению на основании информации, поступающей с борта КА по телеметрической линии.

Кроме того, в [2] приведена оценка некомпенсированных ошибок орбитальных замеров ускорения, не превышающая нескольких сантиметров за секунду в квадрате. Поскольку за одну секунду радиолокационный сигнал проходит в прямом и обратном направлениях $1.5 \cdot 10^8$ м, ошибка в оценке ускорения на $5 \text{ см}/\text{с}^2$ эквивалентна ускорению вариаций запаздывания $0.33 \text{ нс}/\text{с}^2$. Полагая слу-

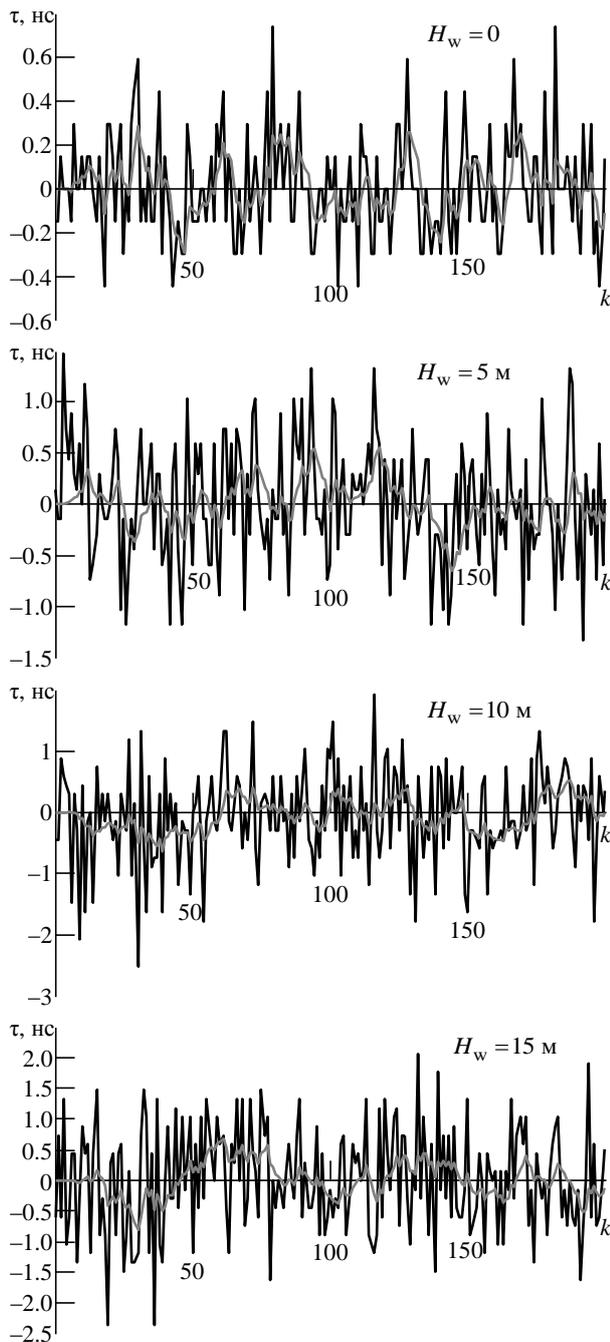


Рис. 1. Потoki наблюдений и отклики фильтра Калмана
 Fig. 1. Observation flows and Kalman filter responses

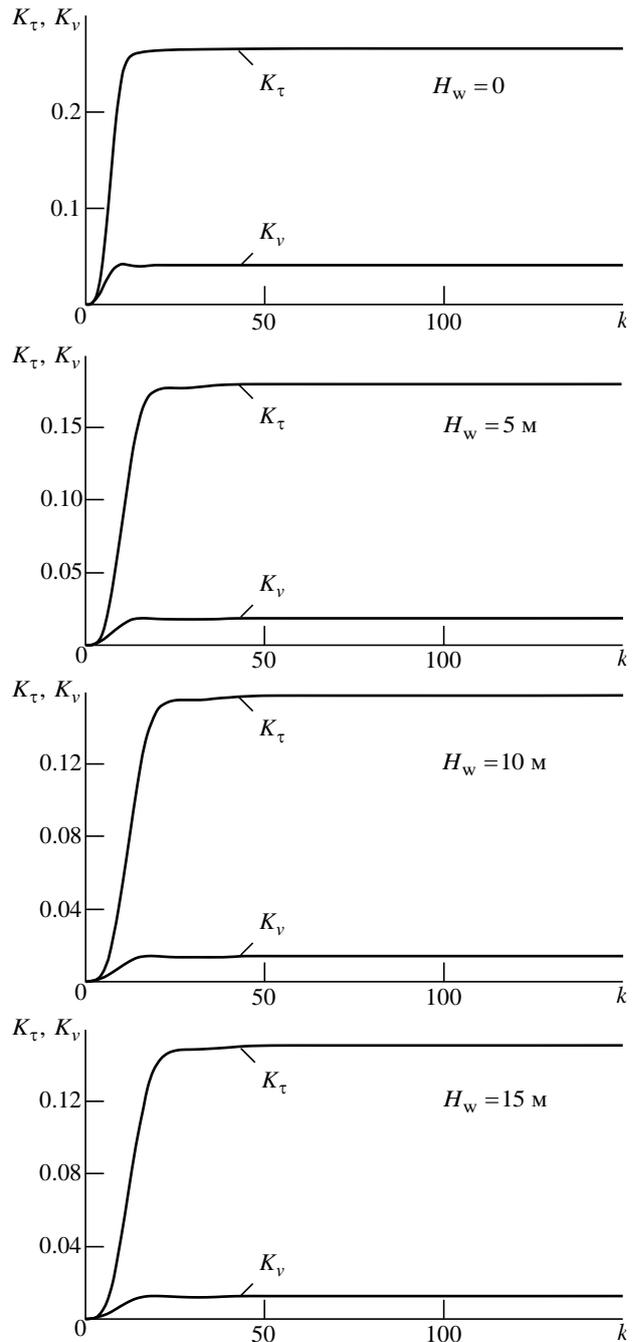


Рис. 2. Установление коэффициента усиления фильтра Калмана по запаздыванию и по скорости его изменения
 Fig. 2. Setting of the Kalman filter TOA gain and TOA change rate gain

чайную некомпенсированную ошибку по ускорению распределенной по гауссовскому закону, по правилу "трех сигм" получим ее стандартное отклонение $0.11 \text{ нс}/\text{с}^2$. Наконец, для современных альтиметров (TOPEX/Poseidon, Jason, AltiKa) типичен интервал повторения усредненных эхосигналов $T_r < 0.1 \text{ с}$ [5]–[7], что означает стандартное отклонение случайных вариаций скорости $\sigma_q < 0.011 \text{ нс}/\text{с}$, т. е. дисперсию модельного шума $\sigma_q^2 < 1.21 \cdot 10^{-22} \text{ с}^2/\text{с}^2$. Именно такие значения σ_q^2 использованы далее в модели фильтра Калмана.

Определим теперь матрицу преобразования состояния в наблюдение H_k и корреляционную матрицу шума наблюдений R_k . Так как в рассматриваемом случае наблюдения образуют скалярный поток оценок запаздывания усредненных эхосигналов, а вектор состояния принят двухкомпонентным, размер первой из названных матриц – 1×2 . Ограничиваясь случаем независимости этой матрицы от времени, имеем

$$H_k = H = [1 \ 0]. \quad (4)$$

Что же касается матрицы R_k , она есть скаляр, при стационарности шума измерений не зависящий от времени:

$$R_k = R = \sigma_v^2, \quad (5)$$

где σ_v^2 – дисперсия фильтруемых оценок запаздывания.

На основе (2)–(5) в среде MATLAB реализована модель фильтра Калмана для $N = 100$ зондирований, высоты орбиты КА $h = 1000 \text{ км}$, отношения сигнал/шум для эхосигнала $q = 10 \text{ дБ}$, ширины луча антенны по уровню половинной мощности $\theta_0 = 0.6^\circ$, полосы сигнала $W = 300 \text{ МГц}$ и четырех значений значимой высоты волны H_w . На рис. 1 показаны потоки наблюдений (черные линии) и отклики на них фильтра Калмана (серые линии).

Рис. 2 иллюстрирует процессы установления коэффициента усиления фильтра Калмана по запаздыванию K_τ и по скорости его изменения K_v . В таблице представлены значения среднеквадратических ошибок измерения запаздывания на входе σ_v и выходе σ_τ фильтра Калмана, выигрыва в точности оценки за счет фильтрации

Результаты моделирования фильтра Калмана
Results of Kalman filter simulation

Параметр Parameter	$H_w, \text{ м}$				
	0	5	10	15	20
$\sigma_v, \text{ нс}$	0.220	0.548	0.722	0.869	0.875
$\sigma_\tau, \text{ нс}$	0.115	0.234	0.289	0.333	0.335
γ	1.91	2.35	2.50	2.61	2.61
Время установления, шаги Transient time, steps	15	20	24	25	26

$\gamma = \sigma_v / \sigma_\tau$, а также времени установления коэффициента усиления в числе шагов. Как показывают графики и данные таблицы, процедура фильтрации повышает точность оценки запаздывания в режиме дообработки вдвое и более в зависимости от значимой высоты волны H_w .

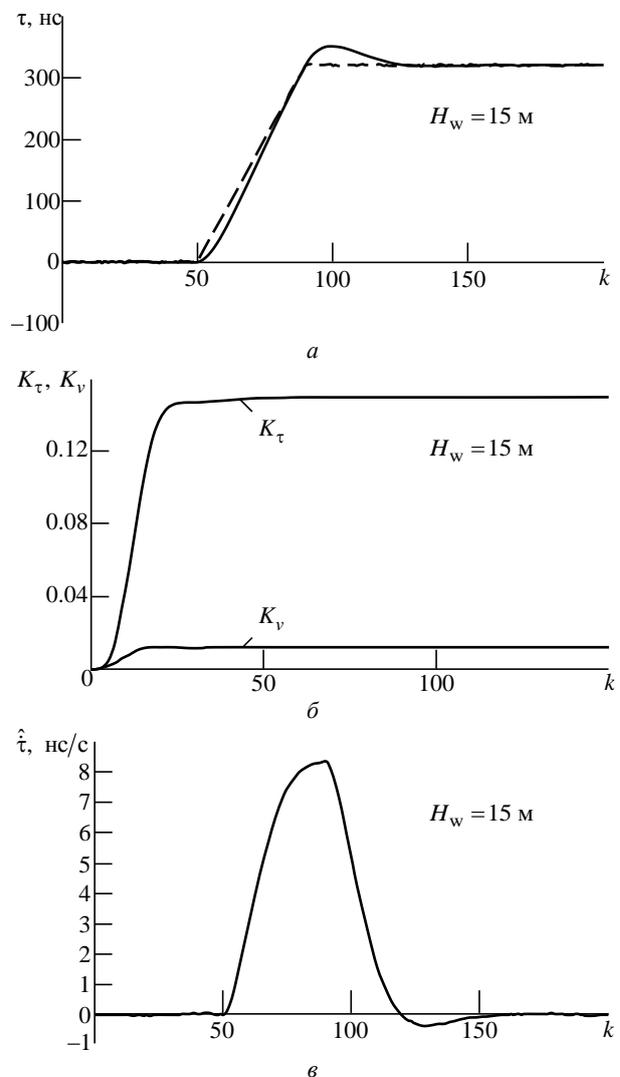


Рис. 3. Эпюры, поясняющие реакцию фильтра Калмана на скоростной скачок
Fig. 3. Curves of the Kalman filter response to velocity hop:
a – filter input and output waveforms; б – gain dynamics;
в – estimation of the TOA rate

В продолжение рассмотренных тестов на фильтр Калмана также подавалась последовательность первичных оценок запаздывания при скоростном скачке от нуля до 50 м/с и обратно продолжительностью 1 с. При частоте зондирования около 4 кГц и числе усредняемых эхосигналов $N=100$ этот временной отрезок соответствует 40 шагам фильтрации. Результаты этого испытания при $H_w = 15$ м и прежних остальных исходных данных иллюстрируются рис. 3: эпюры

на входе (штриховая линия) и выходе (сплошная линия) фильтра (а), динамика коэффициента усиления (б) и зависимость от времени оценки скорости изменения запаздывания (в). Как можно видеть, фильтр без затруднений отрабатывает такой маневр.

Результаты компьютерного эксперимента по сглаживанию для прежних исходных данных отражают рис. 4, 5. На рис. 4 приведены эпюры отклика фильтра Калмана (направление "вперед") (черные кривые) в сравнении с окончательными результатами

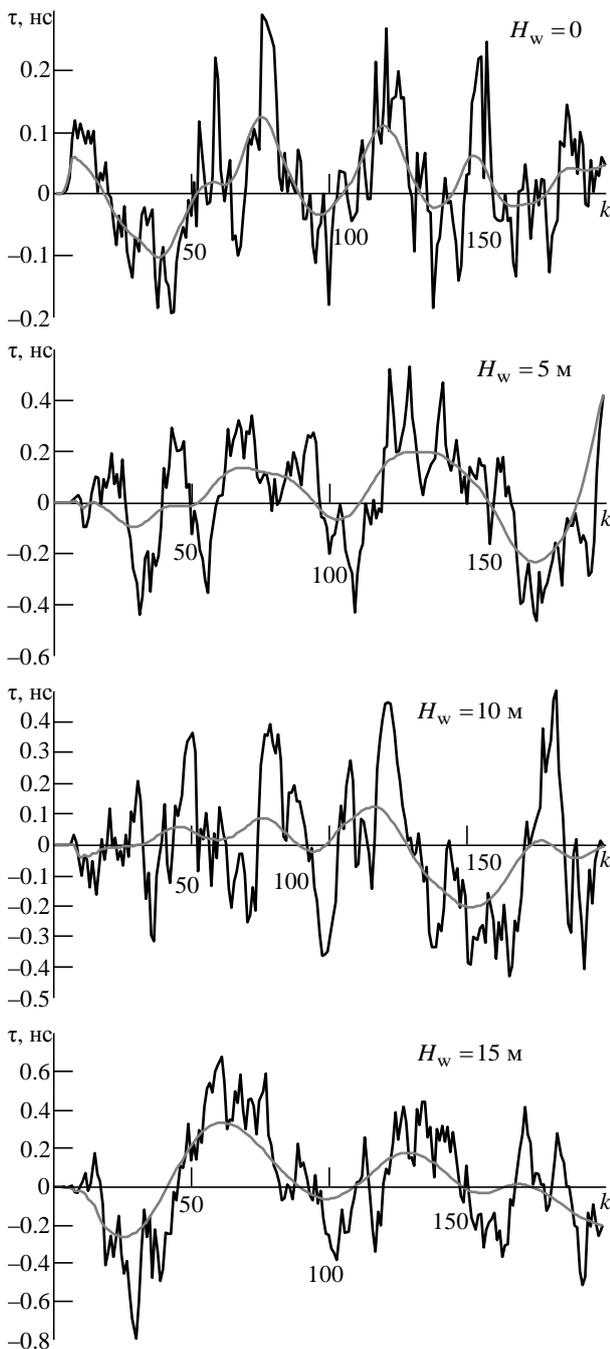


Рис. 4. Эпюры отклика фильтра Калмана
 Fig. 4. Diagram of the Kalman filter response:
 black lines – filtering; gray lines – smoothing

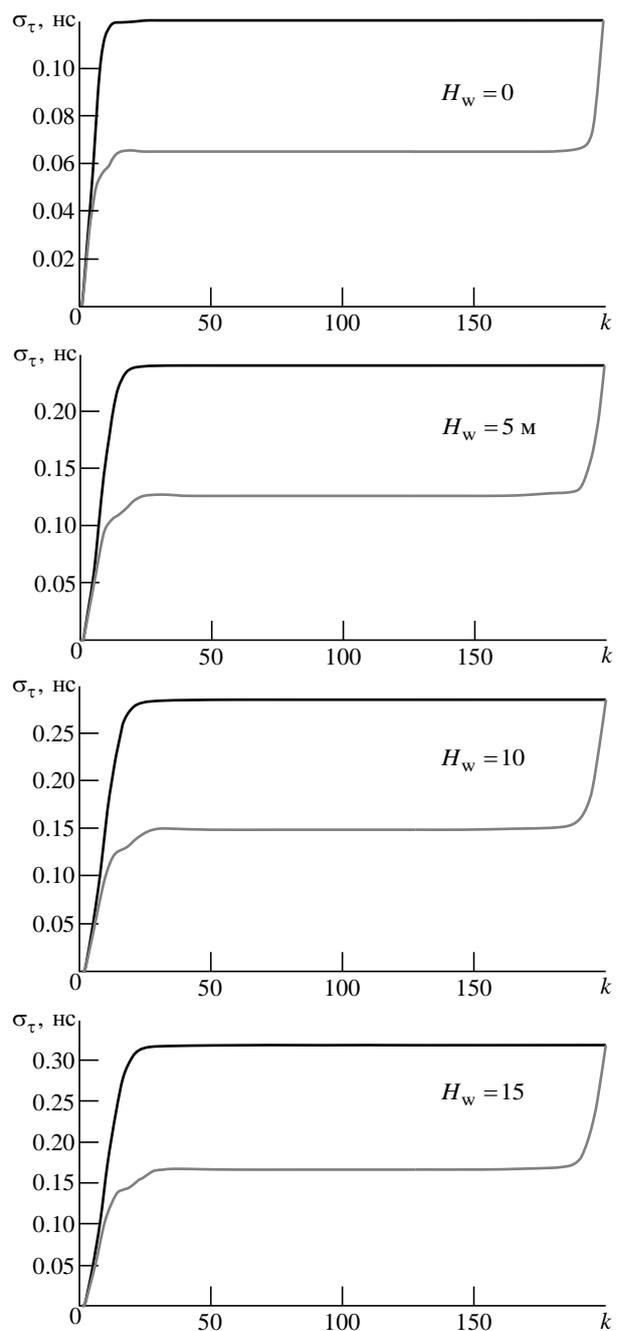


Рис. 5. Среднеквадратическая ошибка оценки запаздывания
 Fig. 5. TOA estimate standard deviation:
 black lines – filtering; gray lines – smoothing

сглаживания (направление "назад") (серые кривые). Рис. 5 показывает изменения среднеквадратических ошибок фильтрации (черные кривые) и сглаживания (серые кривые) на фиксированном интервале. Для финишной точки интервала сглаживание обеспечивает ту же точность, что и просто фильтрация, однако для большинства внутренних точек ("в прошлом") выигрыш сглаживания в точности достаточно весом (порядка двух раз).

Заключение. В статье проанализированы алгоритмы фильтрации и сглаживания альтиметрических данных на стадии их дообработки. Проведенное компьютерное моделирование процедур Калмана показало, что в зависимости от значимой высоты волны среднеквадратическая ошибка оценки запаздывания эхосигнала может быть снижена по крайней мере вдвое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coastal Altimetry / ed. by S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Berlin: Springer, 2011. 565 p.
2. Satellite Altimetry / D. B. Chelton, J. C. Ries, B. J. Haines et al. // Satellite Altimetry and Earth Sciences: a Handbook of Techniques and Applications; ed. by L.-L. Fu, A. Cazenave. San Diego: Academic Press, 2001. P. 1–132.
3. Исследование характеристик робастных дискриминаторов запаздывания спутникового высотомера / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 4. С. 13–23. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-4-13-23
4. Оценка параметров эхосигнала спутникового высотомера методами статистической подгонки на стадии дообработки / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. № 1. С. 5–16. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-1-5-16.
5. Improving the Jason-1 ground retracking to better account for attitude effects / L. Amarouche, P. Thibaut, O. Z. Zanife, J.-P. Dumont, P. Vincent, N. Steunou // Marine Geodesy. 2004. Vol. 27, № 1–2. P. 171–197. doi: 10.1080/01490410490465210
6. Comparison of the Ku-Band range noise level and the relative sea-state bias of the Jason-1, TOPEX, and Poseidon-1 radar altimeters / O. Z. Zanife, P. Vincent, L. Amarouche, J.-P. Dumont, P. Thibaut, S. Labroue // Marine Geodesy. 2003. Vol. 26, no. 3–4. P. 201–238. (Spec. Iss.: Jason-1 Calibration/Validation). doi: 10.1080/714044519
7. AltiKa altimeter: instrument description and in flight performance / N. Steunou, J. D. Desjonquères, N. Picot, P. Sengenès, J. Noubel, J. C. Poisson // Marine Geodesy. 2015. Vol. 38, № 1. P. 22–42. doi: 10.1080/01490419.2015.1006381
8. Satellite altimetry in geodesy and oceanography / ed. by R. Rummel and F. Sanso. Berlin: Springer, 1993. 479 p.
9. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / пер. с англ. М.: Связь, 1976. 496 с.
10. Brown R. G., Hwang P. Introduction to random signals and applied Kalman filtering. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 2012. 397 p.
11. Grewal M. S., Andrews A. Kalman filtering: theory and practice using MATLAB. 2th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 401 p.
12. Poseidon-3 radar altimeter: new modes and in-flight performances / J. D. Desjonquères, G. Carayon, N. Steunou, J. Lambin // Marine Geodesy. 2010. Vol. 33. P. 53–79. doi: 10.1080/01490419.2010.488970
13. Rodriguez E., Martin J. M. Correlation properties of ocean altimeter returns // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1994. Vol. GRS-32, № 3. P. 553–561. doi: 10.1109/36.297974
14. Webb D. J., Moore A. Assimilation of altimeter data into ocean models // J. of Physical Oceanography. 1986. Vol. 16. P. 1901–1913. doi: 10.1175/1520-0485(1986)016<1901:AOADIO>2.0.CO;2.
15. Marshall J. C. Determining the ocean circulation and improving the geoid from satellite altimetry // J. of Physical Oceanography. 1985. Vol. 15. P. 330–349. doi: 10.1175/1520-0485(1985)015<0330:DTOCAI>2.0.CO;2.
16. Mellor G. L., Ezer T. A Gulf stream model and an altimetry assimilation scheme // J. of Geophysical Research. 1991. Vol. 96. P. 8779–8795. doi: 10.1029/91JC00383.
17. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление / пер. с англ. М.: Энергия, 1973. 440 с.

Боровицкий Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук (2016), ведущий научный сотрудник АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург). Автор 25 научных публикаций. Сфера научных интересов – широкополосные системы радиолокации и радионавигации, теория сигналов. E-mail: dmitry_nepogodin@mail.ru

Жестерев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук (1982), начальник отдела АО "Российский институт радионавигации и времени" (Санкт-Петербург). Автор 35 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация и радионавигация; теория связи. E-mail: zhesterev@mail.ru

Ипатов Валерий Павлович – доктор технических наук (1983), профессор (1985) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Заслуженный деятель науки РФ (2001), почетный радист СССР (1983). Автор более 300 научных работ. Сфера научных интересов – радиоэлектронная системотехника; статистическая теория связи; широкополосные системы радиолокации, радионавигации и передачи данных; теория сигналов. E-mail: ival1941@yandex.ru

Мамчур Руслан Михайлович – магистр техники и технологий по направлению "Радиотехника" (2015), аспирант и ассистент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 15 научных публикаций. Сфера научных интересов – статистическая теория связи; широкополосные системы радиолокации, радионавигации и передачи данных; теория сигналов; техническая электродинамика.
E-mail: ruslan.mamchur@mail.ru

REFERENCES

1. Coastal Altimetry; ed. by S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Berlin: Springer, 2011, 565 p.
2. Chelton D. B., Ries J. C., Haines B. J. et al. Satellite Altimetry. Satellite Altimetry and Earth Sciences: a Handbook of Techniques and Applications; ed. by L.-L. Fu and A. Cazenave. San Diego: Academic Press, 2001, pp. 1–132.
3. Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. Study of Robust TOA Discriminators for Space-Based Radar Altimeter. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 4, pp. 13–23. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-4-13-23 (In Russ.)
4. Borovitsky D. S., Zhesterev A. E., Ipatov V. P., Mamchur R. M. Estimation of Satellite Altimeter Echo-Signal Parameters by Statistical Fitting Methods in the Course of Retracking. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 1, pp. 5–16. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-1-5-16 (In Russ.)
5. Amarouche L., Thibaut P., Zanife O. Z., Dumont J.-P., Vincent P., Steunou N. Improving the Jason-1 Ground Retracking to Better Account for Attitude Effects. Marine Geodesy. 2004, vol. 27, no. 1–2, pp. 171–197. doi: 10.1080/01490410490465210
6. Zanife O. Z., Vincent P., Amarouche L., Dumont J.-P., Thibaut P., Labroue S. Comparison of the Ku-Band Range Noise Level and the Relative Sea-State Bias of the Jason-1, TOPEX, and Poseidon-1 Radar Altimeters. Marine Geodesy. 2003, vol. 26, no. 3–4, pp. 201–238. (Special Issue: Jason-1 Calibration/Validation). doi: 10.1080/714044519
7. Steunou N., Desjonquères J. D., Picot N., Sengenès P., Noubel J., Poisson J. C. AltiKa Altimeter: Instrument Description and in Flight Performance. Marine Geodesy. 2015, vol. 38, no. 1, pp. 22–42. doi: 10.1080/01490419.2015.1006381
8. Satellite Altimetry in Geodesy and Oceanography; ed. by R. Rummel and F. Sanso. Berlin, Springer, 1993, 479 p.
9. Sage A. P., Melsa J. L. Estimation Theory with Application to Communication and Control. New York, McGraw-Hill, 1971, 529 p.
10. Brown R. G., Hwang P. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. 4th ed. New York, John Wiley & Sons, 2012, 397 p.
11. Grewal M. S., Andrews A. Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB. 2th ed. New York, John Wiley & Sons, 2001, 401 p.
12. Desjonquères J. D., Carayon G., Steunou N., Lambin J. Poseidon-3 Radar Altimeter: New Modes and in-Flight Performances. Marine Geodesy. 2010, vol. 33, pp. 53–79. doi: 10.1080/01490419.2010.488970
13. Rodriguez E., Martin J. M. Correlation Properties of Ocean Altimeter Returns. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1994, vol. GRS-32, no. 3, pp. 553–561. doi: 10.1109/36.297974
14. Webb D. J., Moore A. Assimilation of Altimeter Data into Ocean Models. J. of Physical Oceanography. 1986, vol. 16, pp. 1901–1913. doi: 10.1175/1520-0485(1986)016<1901:AOADIO>2.0.CO;2
15. Marshall J. C. Determining the Ocean Circulation and Improving the Geoid from Satellite Altimetry. J. of Physical Oceanography, 1985, vol. 15, pp. 330–349. doi: 10.1175/1520-0485(1985)015<0330:DTOCAI>2.0.CO;2
16. Mellor G. L., Ezer T. A Gulf Stream Model and an Altimetry Assimilation Scheme. J. of Geophysical Research. 1991, vol. 96, pp. 8779–8795. doi: 10.1029/91JC00383
17. Meditch J. S. Stochastic Optimal Linear Estimation and Control. New York, McGraw-Hill, 1969, 394 p.

Dmitry S. Borovitsky – Cand. of Sci. (Engineering) (2016), leading researcher of JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time" (Saint Petersburg). The author of 25 scientific publications. Area of expertise: broadband radiolocation and radio-navigation systems; signal theory.
E-mail: dmitry_nepogodin@mail.ru

Alexander E. Zhesterev – Cand. of Sci. (Engineering) (1982), Chief of the Department of JSC "Russian Institute of Radionavigation and Time" (Saint Petersburg). The author of 35 scientific publications. Area of expertise: radiolocation and radionavigation systems; communication theory.
E-mail: zhesterev@mail.ru

Valery P. Ipatov – Dr. of Sci. (Engineering) (1983), Professor (1985) of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Honored scientist of the RF (2001), honorable radioman of the USSR (1983). The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: radio-electronic system engineering; statistical communication theory; broadband radar, navigation and data systems; signal theory.
E-mail: ival1941@yandex.ru

Ruslan M. Mamchur – Master of Science in Radio Engineering (2015), postgraduate student and assistant of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 15 scientific publications. Area of expertise: statistical communication theory; broadband radar, navigation and data systems; signal theory; technical electro-dynamics.
E-mail: ruslan.mamchur@mail.ru