

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

## DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 621.396.6(075.8):528.024  
doi:10.21685/2307-4205-2022-4-7

### КОМПЕНСАЦИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ РАДИОВЫСОТОМЕРА НА ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НОСИТЕЛЕ

**М. Ю. Нестеров**

Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь», Каменск-Уральский, Свердловская обл., Россия  
mn@list.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Одним из основных источников ошибок оценивания высоты в радиовысотомере с непрерывным зондирующим сигналом является доплеровское смещение, обусловленное вертикальной скоростью носителя. При размещении на высокодинамичных объектах эта составляющая ошибки радиовысотомера может быть доминирующей. Традиционный метод компенсации доплеровского смещения при помощи динамического запаздывания в выходном сглаживающем фильтре в этих условиях приводит к неприемлемой величине постоянной времени фильтра. Целью работы является усовершенствование алгоритма фильтрации показаний радиовысотомера. *Материалы и методы.* В алгоритм фильтрации показаний высотомера вводится процедура оценивания вертикальной скорости и использования оценки скорости для коррекции данных о текущей высоте полета. Уравнения фильтрации, полученные в работе, представляют собой вариант нелинейного сигма-точечного фильтра Калмана, где наблюдаемыми величинами являются периоды модуляции радиовысотомера. *Результаты.* Синтезированный алгоритм фильтрации верифицирован при помощи компьютерной модели радиовысотомера, включающей в себя стохастическое дифференциальное уравнение кольца слежения в динамическом режиме и корректно учитывающей основные источники ошибок измерений. *Выводы.* Синтезированный алгоритм фильтрации позволяет корректно парировать доплеровское смещение показаний радиовысотомера, являющееся основным источником ошибок в условиях размещения на высокодинамичном носителе.

**Ключевые слова:** радиовысотомер, доплеровское смещение частоты, высокодинамический объект, моделирование, алгоритм фильтрации

**Для цитирования:** Нестеров М. Ю. Компенсация доплеровского смещения радиовысотомера на высокоскоростном носителе // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 67–75. doi:10.21685/2307-4205-2022-4-7

### COMPENSATION OF THE DOPPLER SHIFT OF THE RADIO ALTIMETER ON A HIGH-SPEED CARRIER

**M.Yu. Nesterov**

Ural Design Bureau "Detal", Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk region, Russia  
mn@list.ru

**Abstract.** *Background.* One of the main error sources of a continuous-wave radar altimeter is the Doppler shift due to high vertical velocity. This kind of error dominates when altimeter is placed on a high-speed vehicle. The

© Нестеров М. Ю., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

common way which compensate Doppler shift with the dynamic delay in output averaging filter results with inappropriate value of the filter time constant. So this paper aims in improvement of the height filtering algorithm. *Matherials and methods.* Height filtering algorithm is expanded with the procedure of vertical velocity estimation. Velocity estimates are used for current height data correction. Derived filtering equations are variant of nonlinear sigma-point Kalman filter where observed values are time periods of altimeter modulation. *Results.* Obtained filtering algorithm was verified with altimeter simulation model included stochastic differential equation of the dynamic tracking loop. The simulation model accounts for main sources of altimeter errors. *Conclusions.* Obtained filtering algorithm correctly eliminates Doppler shift of a continuous-wave radar altimeter readings which is one of the main error sources in high vertical velocity scenarios.

**Keywords:** radio altimeter, doppler frequency shift, highly dynamic object, simulation, filtering algorithm

**For citation:** Nesterov M.Yu. Compensation of the doppler shift of the radio altimeter on a high-speed carrier. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(4):67–75. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-4-7

## Введение

Радиовысотомер с непрерывным частотно-модулированным сигналом является надежным и точным устройством измерения высоты полета. Благодаря достаточно малой постоянной времени следящего контура в кольце слежения высотомера параметры модуляции практически мгновенно подстраиваются под изменяющиеся условия полета. Одним из источников ошибок оценивания высоты в радиовысотомере с непрерывным зондирующим сигналом является доплеровское смещение, обусловленное вертикальной скоростью носителя. При размещении на высокодинамичных объектах эта составляющая ошибки радиовысотомера может быть доминирующей. Традиционным способом компенсации доплеровского смещения оценок высоты является использование динамического запаздывания. В случае линейно нарастающей пилообразной модуляции при движении с вертикальной скоростью  $V_y$  частота биений складывается из дальномерной и доплеровской составляющих:

$$f_b = \frac{2\Delta f}{cT_m} h - \frac{2V_y}{\lambda},$$

где  $\Delta f$  – полоса модуляции;  $c$  – скорость распространения радиоволн;  $T$  – период модуляции;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $f_b, h$  – частота биений и высота в текущий момент времени  $t$ .

Будем полагать, что тем или иным способом создается задержка  $T_d$ . Тогда частота биений в момент выдачи определяется высотой, которая имела место  $T_d$  времени тому назад, следовательно, с использованием задержки имеем

$$f_{bd} = \frac{2\Delta f}{cT_m} (h + V_y T_d) - \frac{2V_y}{\lambda}.$$

Отсюда условие полной компенсации доплеровской составляющей

$$T_d = \frac{f}{\Delta f} T,$$

где  $f$  – несущая частота радиоизлучения.

Таким образом, вводя скользящее усреднение оценок высоты на выходе следящего кольца с тактом периода модуляции и с шириной окна усреднения  $\lfloor f/\Delta f \rfloor$  периодов модуляции ( $\lfloor \dots \rfloor$  – целая часть), можно устранить доплеровское смещение оценки высоты с помощью динамического запаздывания. Однако постоянная времени, присущая операции усреднения, на больших высотах и при значительной вертикальной скорости может оказаться неприемлемо большой и привести к существенному динамическому запаздыванию показаний радиовысотомера на начальном участке его работы. Уменьшить постоянную времени фильтра высоты можно, вводя оценивание вертикальной скорости в алгоритм фильтрации показаний высотомера и используя оценку скорости для коррекции данных о текущей высоте полета. В следующем разделе получены уравнения состояния алгоритма фильтрации для оценок высоты и вертикальной скорости.

При анализе алгоритма фильтрации оценок высоты потребовалась разработка имитационной компьютерной модели радиовысотомера, включающей в себя кольцо слежения и корректно учитыва-

ющей как динамические свойства носителя, так и источники ошибок измерений без значительной вычислительной нагрузки. Синтез модели следящего кольца радиовысотомера приводится в разделе 3.

### Алгоритм фильтрации показаний радиовысотомера

В следящем режиме высотомера с помощью регулирования крутизны перестройки частоты средняя частота сигнала биений поддерживается постоянной и равной центральной частоте дискриминатора  $f_0$ :

$$S\tau = f_0,$$

где  $S$  – крутизна перестройки размерности [Гц/м], а  $\tau$  – задержка отраженного сигнала относительно излученного.

В статическом режиме и при горизонтальном полете над зеркальной поверхностью задержка постоянна и равна

$$\tau = \frac{2h}{c},$$

где  $h$  – текущая высота.

Поскольку высота в статическом режиме не меняется, то не меняется и крутизна перестройки

$$S = \frac{\Delta f}{T},$$

где  $\Delta f$  – диапазон линейной перестройки частоты, а  $T$  – период модуляции сигнала.

При этом мерой текущей высоты будет являться период модуляции, линейно связанный с высотой:

$$T = k_m h,$$

причем коэффициент  $k_m = 2\Delta f / cf_0$ .

В динамическом режиме задержка меняется на протяжении периода модуляции сигнала:

$$\tau = \frac{2(h_0 + V_y t)}{c},$$

где  $V_y$  – вертикальная скорость;  $h_0$  – высота на начало периода,  $t = 0 \dots T$ .

Крутизна перестройки частоты меняется, чтобы сохранить неизменной среднюю частоту биений:

$$S = \frac{cf_0}{2} \frac{1}{h_0 + V_y t}.$$

Интегрируя крутизну на протяжении периода модуляции, получим значение диапазона перестройки частоты:

$$\Delta f = \frac{f_0 c}{2} \int_0^T \frac{dt}{h_0 + V_y t}.$$

После аналитического интегрирования и разложения по Тейлору до второго порядка получим

$$T \approx \frac{k_m h}{1 + k_m V_y / 2}.$$

Таким образом, в динамическом режиме оценка высоты по измерению периода модуляции и при известной вертикальной скорости

$$\hat{h} = \frac{T}{k_m} \left( 1 + \frac{k_m V_y}{2} \right).$$

Представляет интерес выражение для отношения двух последовательных периодов модуляции. Пусть первый из этих периодов рассчитывается по формуле

$$T_1 = \frac{k_m h}{1 + k_m V_y / 2},$$

где  $h$  – высота на конец периода  $T_1$ . Следующий период модуляции равен

$$T_2 = \frac{k_m (h + V_y T_2)}{1 + k_m V_y / 2} = T_1 + \frac{k_m V_y T_2}{1 + k_m V_y / 2}.$$

Отсюда отношение периодов

$$q = \frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + k_m V_y / 2}{1 - k_m V_y / 2}.$$

Следовательно, отношение двух последовательных периодов модуляции не зависит от высоты и определяется только вертикальной скоростью. По измеренному отношению периодов  $q$  можно получить оценку вертикальной скорости:

$$V_y = \frac{2}{k_m} \frac{q - 1}{q + 1}.$$

Вертикальная скорость вызывает доплеровское смещение частоты сигнала биений:

$$f_0 = S\tau + \frac{2V_y}{\lambda}.$$

После введения коэффициента доплеровского смещения  $q_d = 1 - 2V/\lambda f_0$  уравнение следящего контура примет вид

$$f_0 = \frac{S\tau}{q_d}.$$

Изменится и формула для периода модуляции:

$$T = \frac{k_m h / q_d}{1 + k_m V_y / q_d}.$$

Аналогично для отношения соседних периодов

$$q = \frac{1 + k_m V_y / 2 q_d}{1 - k_m V_y / 2 q_d}.$$

Пусть наблюдаемые величины составляют последовательность периодов модуляции  $T_k$ . Отношение двух последовательных периодов остается постоянным при неизменной вертикальной скорости, поэтому система уравнений состояния (без учета шумов)

$$\begin{aligned} T_{k+1} &= q_k T_k; \\ q_{k+1} &= q_k. \end{aligned} \tag{1}$$

Оценка текущей высоты по оценкам переменных состояния:

$$\hat{h}_k = \frac{\hat{T}_k}{k_m} \hat{q}_d \left( 1 + \frac{k_m \hat{V}_k}{2 \hat{q}_d} \right), \tag{2}$$

где  $\hat{V}_k$  – оценка вертикальной скорости по оценке коэффициента  $\hat{q}_k$ :

$$\hat{V}_k = \frac{2f_0\lambda(\hat{q}_k - 1)}{4(\hat{q}_k - 1) + k_m f_0 \lambda (\hat{q}_k + 1)}, \quad (3)$$

а коэффициент  $\hat{q}_k = 1 - 2\hat{V}_k / \lambda f_0$ .

### Дифференциальное уравнение следящего кольца

Радиовысотомер с непрерывным частотно-модулированным сигналом представляет собой измеритель высоты со следящим контуром, замкнутым через пространство распространения сигнала. Упрощенная структурная схема следящего контура показана на рис. 1.

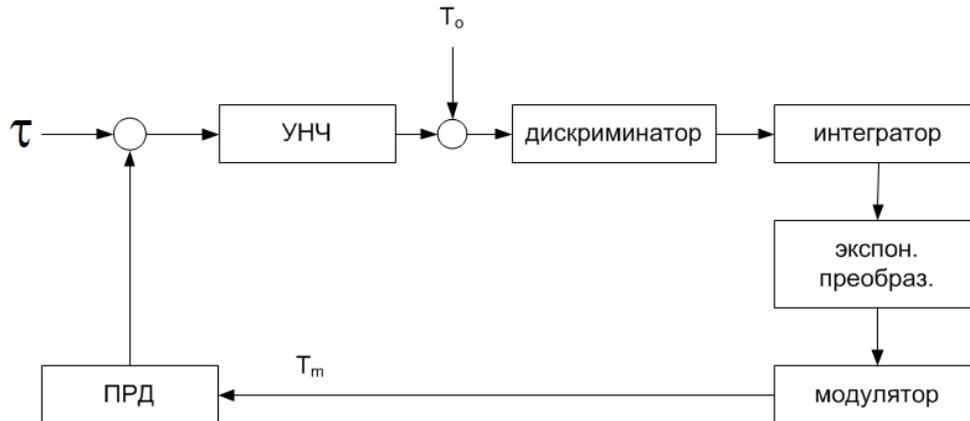


Рис. 1. Схема следящего контура

Следящий контур поддерживает постоянной частоту биений  $f_b$  посредством регулирования параметров модуляции, а именно, крутизны перестройки частоты  $S$ , при изменении задержки  $\tau$  отраженного от подстилающей поверхности сигнала. Входным воздействием на контур является задержка отраженного сигнала  $\tau$ . На выходе смесителя эта задержка формирует частоту биений  $f_b$ :

$$f_b = S\tau.$$

С помощью временного дискриминатора выполняется сравнение текущего периода биений  $T_b$  с эталонным периодом  $T_0 = 1/f_0$  и формируется рассогласование  $\Delta$

$$\Delta = T_b - T_0,$$

которое на выходе дискриминатора производит напряжение, пропорциональное крутизне дискриминационной характеристики  $S_d$

$$u_d = S_d \Delta.$$

С выхода дискриминатора напряжение  $u_d$  поступает на интегратор

$$u_{int} = \frac{u_d}{p\tau_{int}},$$

где  $\tau_{int}$  – постоянная времени интегратора, а  $p$  – оператор Лапласа.

В следящий контур включен экспоненциальный преобразователь, формирующий управляющее напряжение

$$u_{ctrl} = RI_0 \exp(\Lambda u_{int}),$$

где  $I_0$  – обратный ток диода, а  $1/\Lambda$  – температурное напряжение (температурная разность потенциалов).

Управляющее напряжение подается на модулятор, где формируется период модуляции  $T$ , пропорциональный постоянной времени модулятора  $\tau_{mod}$  и отношению амплитуды пилы  $u_{saw}$  к управляющему напряжению  $u_{ctrl}$ :

$$T = \tau_{mod} \frac{u_{saw}}{u_{ctrl}}.$$

Используя полученные соотношения и переходя от операторной формы записи к временной, нетрудно определить уравнение следящего контура в виде

$$S = A \exp \left[ B \int_0^t \left( \frac{1}{S\tau} - T_0 \right) dt \right],$$

где

$$A = \frac{\Delta f R I_0}{\tau_{mod} u_{saw}} e^{BJ_0},$$

$$B = \frac{\Lambda S_d}{\tau_{int}},$$

а  $J_0$  – начальное значение интеграла в показателе экспоненты, определяющее положение рабочей точки экспоненциального преобразователя.

В стационарном режиме при постоянной высоте  $S\tau = 1/T_0$  и  $S = A$ , следовательно,

$$S = \frac{1}{T_0 \tau} e^{B \int_0^t \left( \frac{1}{S\tau} - T_0 \right) dt}. \quad (4)$$

В широком диапазоне задержек уравнение (4) оказывается нелинейным. Однако после линеаризации в небольшой окрестности вокруг фиксированной задержки это уравнение приобретает в операторной форме вид

$$S = \frac{S_0}{1 + p\tau_0},$$

где  $S_0 = f_0 \tau$  есть крутизна на фиксированной задержке  $\tau$ , а постоянная времени следящего контура равна  $\tau_0 = 1/BT_0$  и определяется крутизной дискриминатора и постоянной времени интегратора.

Таким образом, следящий контур радиовысотомера в первом приближении описывается интегрирующим звеном первого порядка. Ради строгости следует заметить, что в состав следящего контура входят и другие инерционные звенья, такие как усилители и дискриминатор, но их постоянные времени, по крайней мере, на порядок меньше, что позволяет пренебречь ими.

С использованием постоянной времени  $\tau_0$  уравнение (4) приводится к виду

$$S = \frac{f_0}{\tau} e^{\frac{f_0}{\tau_0} \int_0^t \left( \frac{1}{S\tau} - T_0 \right) dt}. \quad (5)$$

Выполняя логарифмирование выражения (5) и последующее дифференцирование по времени с учетом непостоянства высоты, можно получить дифференциальное уравнение, описывающее динамический режим следящего контура:

$$\dot{S} = - \left( \frac{1}{\tau_0} + \frac{V_y}{h(t)} \right) S + \frac{f_0}{\tau_0} \frac{c}{2h(t)}. \quad (6)$$

Уравнение (6) содержит два параметра контура: постоянную времени  $\tau_0$  и частоту дискриминатора  $f_0$ . Режим полета задается вертикальной скоростью  $V_y$  и начальной высотой  $h_0$ , причем  $h(t) = h_0 + V_y t$ . В результате работы следящего контура, или интегрирования уравнения (6), носите-

лями информации о высоте оказываются длительности периодов модуляции, которые измеряются путем заполнения эталонными интервалами. Каждому периоду модуляции соответствует одна оценка высоты, формируемая на конец периода.

Реальные подстилающие поверхности имеют неоднородности электрических свойств и сложную геометрическую структуру, обуславливающую случайный характер отраженного сигнала. При этом сигнал биений для такой поверхности представляет собой суперпозицию множества сигналов от элементарных отражателей. Средняя частота биений на выходе приемника определяется усреднением в пределах облучаемого участка поверхности:

$$\langle f_b \rangle = S \frac{2h(1+\delta)}{c} - \frac{2V_x}{\lambda} q_x + \frac{2V_y}{\lambda} q_y, \quad (7)$$

здесь  $\delta$  – погрешность смещения от типа подстилающей поверхности и тангажа (поправка по высоте);  $V_x$ ,  $V_y$  – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости полета;  $q_x$ ,  $q_y$  – поправочные коэффициенты для доплеровского смещения от горизонтальной и вертикальной составляющих вектора скорости.

Поправки определяются формулами:

$$\delta = \frac{1}{p_o} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\vartheta, \phi) \left( \frac{1}{\cos \vartheta} - 1 \right) d\vartheta d\phi;$$

$$q_x = \frac{1}{p_o} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\vartheta, \phi) \sin \vartheta \cos \phi d\vartheta d\phi;$$

$$q_y = \frac{1}{p_o} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\vartheta, \phi) \cos \vartheta d\vartheta d\phi,$$

где  $p_o = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\vartheta, \phi) d\vartheta d\phi$ ,  $F(\vartheta, \phi) = g_1 g_2 \sigma \sin \vartheta \cos \vartheta$ ;  $g_1$ ,  $g_2$  – диаграммы направленности приемной и передающей антенны;  $\sigma$  – диаграмма обратного рассеяния поверхности.

В полете над рассеивающей поверхностью следящая система поддерживает частоту биений (7) постоянной, соответствующей частоте настройки дискриминатора  $f_0$  за счет регулирования крутизны перестройки частоты. Поэтому для текущей оценки высоты на выходе следящего кольца справедлива формула

$$\hat{h} = \frac{h(1+\delta)}{1 + \frac{2V_x}{\lambda f_0} q_x - \frac{2V_y}{\lambda f_0} q_y}. \quad (8)$$

Дифференциальное уравнение следящего кольца (4) при этом примет вид

$$\dot{S} = - \left( \frac{1}{\tau_0} + \frac{V_y}{h(t)} \right) S + \frac{f_0}{\tau_0 k} \frac{c}{2h(t)}, \quad (9)$$

где коэффициент  $k = (1+\delta) / (1 + 2V_x q_x / \lambda f_0 - 2V_y q_y / \lambda f_0)$ .

Коэффициенты  $\delta$ ,  $q_x$ ,  $q_y$  определяются только заданным типом подстилающей поверхности, диаграммами антенн и ориентацией носителя, поэтому могут быть рассчитаны заранее и использоваться при интегрировании (9) в процессе моделирования в виде готовых массивов данных. При этом будут корректно воспроизводиться расчетные погрешности и доплеровское смещение оценок высоты в показаниях радиовысотомера.

Кроме того, в уравнение (9) легко можно ввести дополнительные члены, учитывающие флуктуации периодов биений из-за конечной ширины спектра сигнала, обусловленной шероховатостью подстилающей поверхности, а также нелинейность крутизны перестройки частоты и фазовый шум, неизбежный для радиовысотомера с непрерывным сигналом. При этом уравнение становится стохастическим и для его интегрирования необходимо применять специфические методы [2].

При оценивании текущей высоты по средней частоте сигнала биений, в свою очередь определяемой по частоте переходов сигнала биений через ноль при усреднении на одном периоде модуляции, возникает ошибка, вызванная протяженностью спектра сигнала, как по дальномерной, так и по доплеровской частоте. Для консервативной оценки дисперсии состояния, т.е. дисперсии периода модуляции, получено выражение

$$\sigma_T^2 = \frac{T_k}{f_0} \frac{\Delta\theta_{eq}^2}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{4f_x^2}{f_0^2}},$$

где  $f_x = 2V_x/\lambda$ ,  $V_x$  – горизонтальная скорость;  $\Delta\theta_{eq}$  – эквивалентная ширина диаграммы направленности

$$\frac{1}{\Delta\theta_{eq}^2} = \frac{1}{\Delta\theta_{2a}^2} + \frac{1}{\Delta\theta_{bs}^2},$$

причем  $\Delta\theta_{2a}$  – ширина диаграммы направленности антенны при двустороннем распространении сигнала;  $\Delta\theta_{bs}$  – ширина диаграммы обратного рассеяния поверхности.

Согласно полученному выражению, флуктуационная ошибка состояния при оценке высоты (или периода модуляции) растет пропорционально квадратному корню из высоты (периода модуляции), что согласуется как с экспериментальными данными, так и с результатом более строгого расчета.

### Результаты моделирования

Представленная выше модель показаний высотомера была использована при верификации синтезированного алгоритма фильтрации показаний высотомера для высокоскоростного носителя. При формировании последовательности периодов биений в процессе интегрирования (10) учитывались как внутренние шумы приемника, так и флуктуационная составляющая сигнала биений, вызванная протяженностью спектра биений.

Поскольку уравнения состояния (1) нелинейные, для фильтрации показаний радиовысотомера был выбран алгоритм сигма-точечного фильтра Калмана (Unscented Kalman Filtering) [3]. Условия полета: скорость – сверхзвуковая, тангаж – минус 30°, подстилающая поверхность типа – луга. Результат применения фильтра приведен на рис. 2.

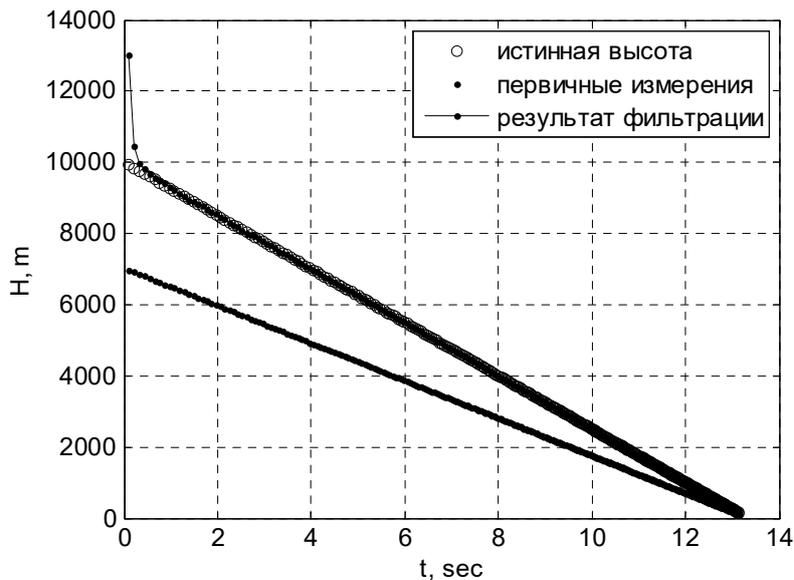


Рис. 2. Результат фильтрации данных

Приведенный график показывает, что синтезированный алгоритм фильтрации позволяет корректно парировать доплеровское смещение показаний радиовысотомера, являющееся основным источником ошибок в условиях размещения на высокодинамичном носителе.

## Список литературы

1. Жуковский А. П., Оноприенко Е. И., Чижов В. И. Теоретические основы радиовысотометрии. М. : Советское радио, 1967.
2. Bayram M., Partal T., Buyukoz G. Numerical methods for simulation of stochastic differential equations // *Advances in Difference Equations*. 2018. Vol. 17. doi:10.1186/s13662-018-1466-5
3. Simon D. *Optimal State Estimation*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2006.
4. Баскаков А. И., Жутяева Т. С., Лукашенко Ю. И. Локационные методы исследования объектов и сред : учебник / под ред. А. И. Баскакова. М. : Академия, 2011. 384 с.
5. Егоров В. В., Мин-Хо Ка. Вопросы точности аэрокосмической альтиметрии // *Исследование Земли из космоса*. 2005. № 5. С. 48–55.
6. Боков А. С., Важенин В. Г., Дядьков Н. А. [и др.]. Оценка качественных характеристик бортовых радиовысотометров // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2010. Т. 1. С. 16–18.
7. Боков А. С., Важенин В. Г. Применение фасетной модели для имитации радиолокационного сигнала, отраженного от подстилающей поверхности // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2012. Т. 7. С. 55–61.
8. Боков А. С., Важенин В. Г., Вершинин А. С., Дядьков Н. А. Формирование входного сигнала радиовысотометра с ЛЧМ, имитирующего отражение от протяженной поверхности // *Радиовысотометрия–2007 : сб. тр. Второй науч.-техн. конф. / отв. ред. А. А. Иофин, Л. И. Пономарев*. Екатеринбург : Третья столица, 2007. С. 342–348.

## References

1. Zhukovskiy A.P., Onoprienko E.I., Chizhov V.I. *Teoreticheskie osnovy radiovysotometrii = Theoretical foundations of radio altimetry*. Moscow: Sovetskoe radio, 1967. (In Russ.)
2. Bayram M., Partal T., Buyukoz G. Numerical methods for simulation of stochastic differential equations. *Advances in Difference Equations*. 2018;17. doi:10.1186/s13662-018-1466-5
3. Simon D. *Optimal State Estimation*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
4. Baskakov A.I., Zhutyayeva T.S., Lukashenko Yu.I. *Lokatsionnye metody issledovaniya ob'ektov i sred: uchebnik = Location methods of objects and environments research : textbook*. Moscow: Akademiya, 2011:384. (In Russ.)
5. Egorov V.V., Min-Kho Ka. Questions of accuracy of aerospace altimetry. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploration of the Earth from space*. 2005;(5):48–55. (In Russ.)
6. Bokov A.S., Vazhenin V.G., Dyad'kov N.A. et al. Evaluation of the qualitative characteristics of on-board radio meters. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2010;(1):16–18. (In Russ.)
7. Bokov A.S., Vazhenin V.G. Application of a facet model to simulate a radar signal reflected from the underlying surface. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika = Proceedings of higher educational institutions of Russia. Radioelectronics.* 2012;7:55–61. (In Russ.)
8. Bokov A.S., Vazhenin V.G., Vershinin A.S., Dyad'kov N.A. Formation of the input signal of a radio altimeter with an LFM simulating reflection from an extended surface. *Radiovysotometriya–2007: sb. tr. Vtoroy nauch.-tekhn. konf. = Radio altimetry–2007 : proceedings of the Second scientific-technical. conf.* Ekaterinburg: Tret'ya stolitsa, 2007:342–348. (In Russ.)

## Информация об авторах / Information about the authors

**Михаил Юрьевич Нестеров**

доктор технических наук, начальник отдела,  
Уральское проектно-конструкторское  
бюро «Деталь»  
(Россия, Свердловская обл., г. Каменск-Уральский,  
ул. Пионерская, 8)  
E-mail: mn@list.ru

**Mikhail Yu. Nesterov**

Doctor of technical sciences, head of the department,  
Ural Design Bureau "Detal"  
(8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky,  
Sverdlovsk region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 15.02.2022**

**Поступила после рецензирования / Revised 11.03.2022**

**Принята к публикации / Accepted 04.04.2022**