

УДК 621.391.96
DOI 10.52575/2687-0932-2026-53-2-400-407
EDN OOQLYB

Оценка границ устойчивости фильтра второго порядка с эффективной конечной памятью и неполной компенсацией скоростной ошибки

¹Мурзова М.А., ¹Фарбер В.Е., ²Головко М.В.

¹ ПАО «Радиофизика»,

Россия, 125363, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10

²Белгородский государственный национальный исследовательский университет,

Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

mariya.trofimenko@phystech.edu, vladeffar@mail.ru, golovko_m@bsuedu.ru

Аннотация. В работе представлен фильтр второго порядка с постоянными весовыми коэффициентами и неполной компенсацией скоростной ошибки, аппроксимирующий фильтр с конечной памятью. Способ неполной компенсации скоростной ошибки состоит в устранении скоростной ошибки из измерений дальности. Скоростная ошибка возникает из-за использования сигналов с линейной частотной модуляцией. В связи с использованием неоптимального способа учета скоростной ошибки в уравнениях фильтрации оценены границы устойчивости фильтра второго порядка с постоянными весовыми коэффициентами и неполной компенсацией скоростной ошибки, аппроксимирующего в установившемся режиме фильтр с конечной памятью. Сформулировано условие расходимости фильтра с неполной компенсацией скоростной ошибки. Получены выражения для определения границ устойчивости фильтра второго порядка с эффективной конечной памятью и неполной компенсацией скоростной ошибки в случае описания модели движения. Получено выражение, описывающее закон изменения дальности движущегося равноускоренно радиолокационного объекта.

Ключевые слова: компенсация, скоростная ошибка, фильтр с постоянными весовыми коэффициентами, фильтрация, установившийся режим

Для цитирования: Мурзова М.А., Фарбер В.Е., Головко М.В. 2026. Оценка границ устойчивости фильтра второго порядка с эффективной конечной памятью и неполной компенсацией скоростной ошибки. *Экономика. Информатика*, 53(2): 400–407. DOI 10.52575/2687-0932-2026-53-2-400-407. EDN OOQLYB

Estimation of Stability Bounds of the Second-Order Filter with Effective Finite Memory and Incomplete Range-Doppler Error Compensation

¹Mariia A. Murzova, ¹Vladimir E. Farber, ¹Marina V. Golovko

¹JSC “Radiofizika”, 10 Geroev Panfilovtsev St., Moscow 125363, Russia

²Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia

mariya.trofimenko@phystech.edu, vladeffar@mail.ru, golovko_m@bsuedu.ru

Abstract. This paper describes a second-order filter with constant weight coefficients and incomplete range-Doppler error compensation that approximates a finite-memory filter. The method of incomplete range-Doppler error compensation consists in correcting the range measurements for the range-Doppler error. The range-Doppler error arises from the use of linear frequency-modulated signals. Using a suboptimal method of range-Doppler error compensation in the filter equations leads to a stability filter problem. The study estimates the stability bounds of the second-order filter with constant weight coefficients and incomplete

© Мурзова М.А., Фарбер В.Е., Головко М.В., 2026

range-Doppler error compensation, which approximates the finite-memory filter. We have identified the condition of divergence of the filter with incomplete compensation of the speed error and obtained expressions for determining the stability boundaries of a second-order filter with effective finite memory and incomplete compensation of the speed error, in the case of describing the motion model. An expression has been found that describes the law of change in the range of a radar object moving with constant acceleration.

Keywords: compensation, speed error, filter with constant weight coefficients, filtering, steady state

For citation: Murzova M.A., Farber V.E., Golovko M.V. 2026. Estimation of Stability Bounds of the Second-Order Filter with Effective Finite Memory and Incomplete Range-Doppler Error Compensation. *Economics. Information technologies*, 53(2): 400–407 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2026-53-2-400-407. EDN OOQLYB

Введение

В задачах оценки параметров движения радиолокационных объектов (РО) основное место отводится фильтру Калмана, оценивающему координаты РО и их изменения по критерию минимума дисперсии ошибки оценки. В радиолокационных задачах полиномиальная модель движения РО хорошо себя зарекомендовала. В зависимости от типа движения РО выбирают порядок фильтра. Порядок фильтра соответствует степени полинома движения РО, характеризующего закон изменения фильтруемого параметра. В данной работе уделяется внимание фильтрам второго порядка, оценивающим координату, скорость ее изменения и ускорение. Наряду с этим уравнения изменения координаты, например, дальности, можно описать следующими соотношениями:

$$R(t_n) = R(t_{n-1}) + \dot{R}(t_{n-1})T + \frac{\ddot{R}(t_{n-1})T^2}{2}, \quad (1)$$

$$R(t_n) = R(t_{n-1}) + \dot{R}(t_{n-1})T + \ddot{R}^*(t_{n-1})T^2, \quad (2)$$

где $\ddot{R}^*(t_{n-1})$ и $\ddot{R}(t_{n-1})$ – второй коэффициент полинома (половина ускорения) и ускорение движения РО, соответственно.

Многие радиолокационные измерительные системы (РИС) зондируют пространство широкополосными сигналами, например, сигналом с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) несущей частоты. Особенностью применения ЛЧМ-сигнала является наличие скоростной ошибки в получаемых РИС измерениях дальности. Получаемое РИС измерение дальности $\tilde{r}(t_n)$ смещено на скоростную ошибку (СО) $\Delta R(t_n)$ относительно истинной дальности $R(t_n)$ и определяется как

$$\tilde{r}(t_n) = R(t_n) - \Delta R(t_n) + \eta(t_n) = r(t_n) + \eta(t_n),$$

где $\eta(t_n)$ – шум измерений дальности с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma^2(t_n) = \sigma_n^2$.

Скоростная ошибка или скоростное смещение $\Delta R(t_n)$ в момент времени t_n определяется коэффициентом скоростного смещения k_v и радиальной скоростью движения РО $\dot{R}(t_n)$ [Fitzgerald, 1974; Brookner 1998] следующим образом:

$$\Delta R(t_n) = k_v \dot{R}(t_n), \quad k_v = \tau_{zc} F / \Delta F, \quad \Delta F = F_H - F_K. \quad (3)$$

Коэффициент скоростного смещения k_v определяется следующими параметрами ЛЧМ-сигнала: начальной F_H и F_K конечной частотой излучения, несущей частотой F и длительностью τ_{zc} .

Для устранения скоростной ошибки (3) в алгоритмах оценки параметров движения РО, основанных на полиномиальных фильтрах, используют следующие способы компенсации СО:

полную, последующую и неполную [Трофименко, Фарбер, 2016; Мурзова, Фарбер, 2023; Мурзова, Фарбер, 2024; Murzova, Farber 2024]. Указанные способы компенсации СО отличаются различной степенью учета скоростной ошибки в уравнениях фильтрации. Способ полной компенсации заключается в синтезе полиномиальных фильтров с учетом наличия СО в измерениях дальности. При синтезе такого фильтра скоростная ошибка полностью учитывается в уравнениях фильтрации: на этапах экстраполяции и коррекции [Jain, Blair 2009; Blair, 2019; Мурзова, Фарбер, 2024]. Способ последующей компенсации заключается в оценке параметров движения РО по смещенным измерениям дальности с последующим устранением СО в оценке смещенной дальности. Способ неполной компенсации устраняет скоростную ошибку только в измерениях дальности путем коррекции измерений дальности на величину оценки СО. Такой упрощенный подход приводит к неустойчивости полиномиальных фильтров [Мурзова, Фарбер, 2019; Мурзова, Фарбер, 2020]. Отсутствие обратной связи по коэффициенту скоростного смещения в вычислениях весовых коэффициентов полиномиальных фильтров может приводить к их расходимости. Вследствие возможности расходимости полиномиальных фильтров с неполной компенсацией СО необходимо определить их границы устойчивости. Границы устойчивости определяют допустимую область значений коэффициента скоростного смещения k_v , при которых полиномиальный фильтр с неполной компенсацией скоростной ошибки сходится.

Исследованию характеристик фильтров второго порядка посвящены работы [Blair 2020; Murzova, Farber 2024]. В [Мурзова, Фарбер, 2023; Murzova, Farber, 2024] получены свойства фильтров второго порядка (диффузионный фильтр и фильтр с растущей памятью) с учетом обратной связи по коэффициенту скоростного смещения в вычислениях весовых коэффициентов. В предположении описания движения РО согласно (2) для фильтров второго порядка с неполной компенсацией СО определены границы устойчивости: соотношение между коэффициентом скоростного смещения и памятью фильтра [Трофименко, Фарбер, 2016]. В данной работе проводится исследование границ устойчивости для фильтра второго порядка с эффективной конечной памятью (ЭКП) с неполной компенсацией СО с учетом описания движения РО согласно (1).

Соотношения фильтра второго порядка с ЭКП и неполной компенсацией СО

Фильтры с эффективной конечной памятью являются фильтрами с постоянными весовыми коэффициентами и описываются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\bar{R}(t_n) &= R^0(t_n) + w_{0R}\kappa_n, \\ \dot{\bar{R}}(t_n) &= \dot{R}^0(t_n) + w_{1R}T^{-1}\kappa_n, \\ \ddot{\bar{R}}(t_n) &= \ddot{R}^0(t_n) + w_{2R}T^{-2}\kappa_n, \\ R^0(t_n) &= \bar{R}(t_{n-1}) + \dot{\bar{R}}(t_{n-1})T + \frac{\ddot{\bar{R}}(t_{n-1})T^2}{2}, \\ \dot{R}^0(t_n) &= \dot{\bar{R}}(t_{n-1}) + \ddot{\bar{R}}(t_{n-1})T, \quad \ddot{R}^0(t_n) = \ddot{\bar{R}}(t_{n-1}), \\ \kappa_n &= \tilde{r}(t_n) - R^0(t_n) + k_v\dot{R}^0(t_n).\end{aligned}\tag{4}$$

Передаточные функции фильтра по оценкам дальности, радиальной скорости и радиальному ускорению [Трофименко, Фарбер, 2016] определим, применив Z-преобразование к выражениям (4) [Poularikas, 2020], как

$$K_{\bar{R}}(z) = \frac{Z\{\bar{R}(t_n)\}}{Z\{\tilde{r}(t_n)\}} = \frac{\bar{R}(z)}{\tilde{r}(z)} = \left[w_{0R}z^3 + (-2w_{0R} + w_{1R} + \frac{w_{2R}}{2})z^2 + (w_{0R} - w_{1R} + \frac{w_{2R}}{2})z \right] G^{-1},$$

$$K_{\bar{R}}(z) = \frac{Z \left\{ \bar{R}(t_n) \right\}}{Z \left\{ \tilde{r}(t_n) \right\}} = \frac{\bar{R}(z)}{\tilde{r}(z)} = T^{-1} \left[w_{1R} z^3 + (w_{2R} - 2w_{1R}) z^2 + (w_{1R} - w_{2R}) z \right] G^{-1}, \quad (5)$$

$$K_{\bar{R}}(z) = \frac{Z \left\{ \bar{R}(t_n) \right\}}{Z \left\{ \tilde{r}(t_n) \right\}} = \frac{\bar{R}(z)}{\tilde{r}(z)} = z w_{2R} (z-1)^2 T^{-2} G^{-1}, \quad k_T = k_v T^{-1},$$

$$G = z^3 + \left[-(w_{1R} + w_{2R}) k_T + w_{0R} + w_{1R} + \frac{w_{2R}}{2} - 3 \right] z^2 + \\ + \left[(2w_{1R} + w_{2R}) k_T - 2w_{0R} - w_{1R} + \frac{w_{2R}}{2} + 3 \right] z - k_T w_{1R} + w_{0R} - 1.$$

Точностные характеристики S^R на выходе фильтра [Murzova, Farber 2024] в установившемся режиме, такие как дисперсии $\sigma^2(R)$, $\sigma^2(\bar{R})$, $\sigma^2(\ddot{R})$ ошибок оценок дальности $\bar{R}$, скорости $\dot{\bar{R}}$, ускорения $\ddot{\bar{R}}$ и ковариации ошибок оценок, определяются как

$$S_{RR} = \sigma^2(\bar{R}) = \frac{F(k_T) + 0.5w_{0R}w_{2R}(2w_{0R} + w_{1R} - 4) + w_{1R}(2w_{0R}^2 - 3w_{0R}w_{1R} + 2w_{1R})}{B(k_T)} \sigma^2,$$

$$S_{\dot{R}\dot{R}} = \sigma^2(\dot{\bar{R}}) = \frac{w_{1R}w_{2R}(3w_{2R} - 2w_{1R})k_T + 2w_{1R}^2(w_{1R} - w_{2R}) + (2 - w_{0R})w_{2R}^2}{B(k_T)T^2} \sigma^2,$$

$$S_{\ddot{R}\ddot{R}} = \sigma^2(\ddot{\bar{R}}) = \frac{2w_{2R}^2(w_{1R} - k_T w_{2R})}{B(k_T)T^4} \sigma^2, \quad S_{\ddot{R}\dot{R}} = -\frac{w_{2R}(k_T w_{2R} - w_{1R})(2w_{1R} - w_{2R})}{B(k_T)T^3} \sigma^2,$$

$$S_{\dot{R}\ddot{R}} = -\frac{-4w_{0R}w_{1R}^2 + 2w_{0R}w_{1R}w_{2R} + 2w_{1R}^3 - w_{1R}^2w_{2R}}{2B(k_T)T} \sigma^2 -$$

$$-\frac{(4w_{0R}w_{1R}w_{2R} - 2w_{0R}w_{2R}^2 - 2w_{1R}^2w_{2R} + w_{1R}w_{2R}^2)k_T}{2B(k_T)T} \sigma^2,$$

$$S_{R\ddot{R}} = -\frac{w_{2R}^2(4w_{0R} + w_{2R})k_T + w_{2R}(-4w_{0R}w_{1R} - 2w_{0R}w_{2R} + 2w_{1R}^2 - w_{1R}w_{2R} + 4w_{2R})}{2B(k_T)T^2} \sigma^2,$$

$$F(k_T) = -0.5w_{1R}w_{2R}(2w_{1R} + w_{2R})k_T^2 +$$

$$+ (-2w_{0R}^2w_{2R} + 2w_{0R}w_{1R}w_{2R} - 0.5w_{0R}w_{2R}^2 + w_{1R}^3 + 0.5w_{1R}^2w_{2R} - 2w_{1R}w_{2R})k_T,$$

$$B(k_T) = [k_T(2w_{1R} + w_{2R}) - 2w_{0R} - w_{1R} + 4] \times$$

$$\times \left[k_T^2 w_{1R} w_{2R} + \left(-w_{0R} w_{2R} - w_{1R}^2 - \frac{w_{1R} w_{2R}}{2} \right) k_T + w_{1R} w_{0R} + \frac{w_{0R} w_{2R}}{2} - w_{2R} \right].$$

При постоянных весовых коэффициентах

$$w_{0R} = 12(N^2 + 1)G^{-1}, \quad w_{1R} = 60NG^{-1}, \quad w_{2R} = 120G^{-1}, \quad (6) \\ G = (N + 1)(N + 2)(N + 3)$$

и равном нулю коэффициенте скоростного смещения $k_v = 0$ фильтр с ЭКП аппроксимирует фильтр с конечной памятью по точным характеристикам [Трофименко, Фарбер, 2016].

Исходя из выражений (5) для определения передаточных функций, нетрудно получить согласно критерию Рауса – Гурвица [Newton et al., 1957], что необходимые и достаточные условия устойчивости такого фильтра описываются соотношениями

$$\begin{aligned} w_{2R} > 0, \quad (2w_{1R} + w_{2R})k_T - 2w_{0R} - w_{1R} + 4 > 0, \\ -4k_T w_{1R} + 4w_{0R} - w_{2R} > 0, \quad w_{1R} - k_T w_{2R} > 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$$k_T^2 w_{1R} w_{2R} - (w_{0R} w_{2R} + w_{1R}^2 + \frac{w_{2R}}{2} w_{1R})k_T + w_{0R} w_{1R} + \frac{w_{0R} w_{2R}}{2} - w_{2R} > 0.$$

Границы устойчивости фильтра с ЭКП и неполной компенсацией скоростной ошибки вычисляются подстановкой весовых коэффициентов (6) в (7) и определяются как

$$-\frac{1}{30} \frac{N(N^2 - 4)}{N + 1} < k_T < \frac{1}{60} \frac{21N^2 + 15N + 6 - G(N)}{N} \quad \text{при } N \geq 3, \quad (8)$$

$$G(N) = \sqrt{141N^4 + 630N^3 + 777N^2 + 180N + 36}.$$

Полученные границы устойчивости определяют допустимую область нормированного коэффициента скоростного смещения k_T в зависимости от памяти фильтра N .

Оценка границ устойчивости фильтра второго порядка с ЭКП и неполной компенсацией СО

Границы устойчивости оценивались исходя из переходного процесса фильтра с ЭКП и неполной компенсацией СО. Исследовался переходной процесс при входном воздействии, задаваемом дискретной функцией Хевисайда

$$\begin{cases} \tilde{r}(t_n) = 0, & \text{если } n \leq 3, \\ \tilde{r}(t_n) = 1, & \text{если } n > 3, \end{cases}, \quad t_n = nT \quad (9)$$

при начальных условиях $\bar{R}(t_3) = 0$, $\dot{\bar{R}}(t_3) = 0$, $\ddot{\bar{R}}(t_3) = 0$.

Оценка параметров движения РО вычислялась в соответствии с соотношениями (4) и (6) фильтра с ЭКП. С учетом входных воздействий (9) на выходе фильтра с ЭКП формировалась оценка, равная сумме импульсных переходных функций фильтра $h_R(t_n, t_i)$:

$$\bar{R}(t_n) = \sum_{i=4}^n h_R(t_n, t_i).$$

Условие расходимости фильтра с неполной компенсацией СО [Трофименко, Фарбер, 2016] формулируется следующим образом: превышение оценки дальности $\bar{R}(t_n)$ на выходе фильтра порогового значения Δ_R во время работы фильтра при некотором фиксированном значении коэффициента скоростного смещения k_v , т. е.

$$\bar{R}(t_n) > \Delta_R, \quad 1 < n < K.$$

Минимальное значение по модулю k_v , при котором фиксировалось условие расходимости фильтра, принималось за граничное.

Таблица содержит значения аналитических и численных нормированных границ устойчивости (НГУ) фильтра с ЭКП при входном воздействии, задаваемом функцией Хевисайда. Моделирование фильтра с ЭКП проводилось при следующих параметрах: темп поступления информации $T = \{0.008 \text{ с}, 0.1 \text{ с}, 1 \text{ с}\}$, память фильтра $N = \{5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40\}$, порог $\Delta_R = 100$ и дисперсия ошибок измерения $\sigma^2 = 1 \text{ м}^2$. Нормированный коэффициент скоростного смещения k_T определяется как коэффициент скоростного смещения k_v , приведенный к темпу поступления информации T .

Нормированные границы устойчивости фильтра с ЭКП при входном воздействии, задаваемом функцией Хевисайда

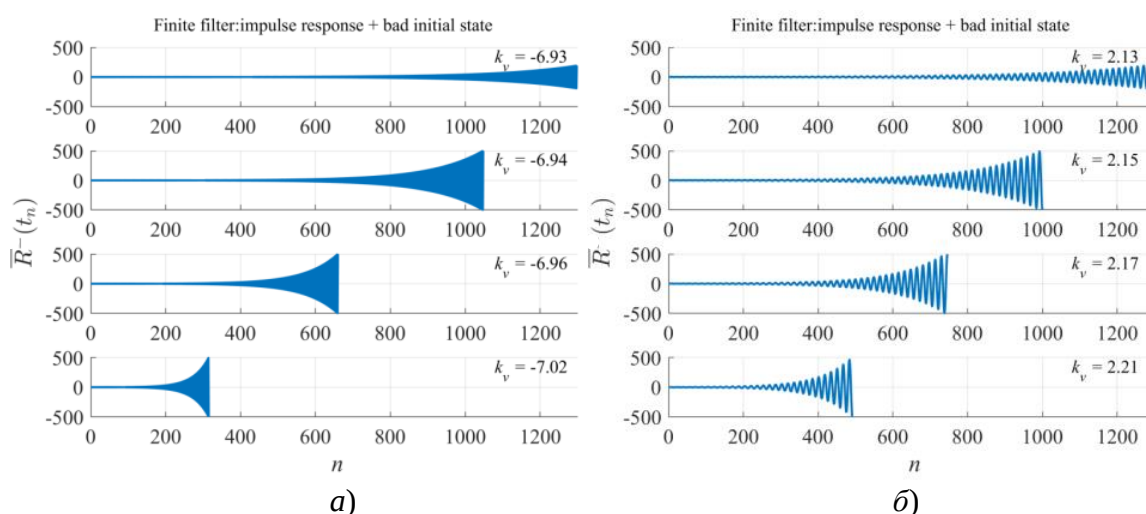
The normalized stability bounds of the second-order filter with effective finite memory under the input of Heaviside function

N	Фильтр с ЭКП			
	Аналитические НГУ		Начальные условия без учета k_v	
	k_T^l	k_T^r	$\hat{k}_T^l$	$\hat{k}_T^r$
5	−0.58	0.58	−0.59	0.59
10	−2.91	1.33	−2.92	1.34
15	−6.91	2.09	−6.93	2.12
20	−12.57	2.85	−12.61	2.89
25	−19.90	3.61	−19.96	3.68
30	−28.90	4.37	−28.97	4.47
35	−39.57	5.13	−39.67	5.27
40	−51.90	5.89	−52.04	6.06

В таблице через $\hat{k}_T^l$, $\hat{k}_T^r$ обозначены полученные в результате моделирования левая и правая оценки нормированных границ устойчивости фильтров, а через k_T^l , k_T^r – аналитические нормированные границы устойчивости, вычисленные из выражения (8).

Согласованность аналитических (8) и численных нормированных границ устойчивости фильтра с ЭКП следует из результатов таблицы.

Реакции фильтра с ЭКП и неполной компенсацией СО на дискретную единичную функцию при отрицательных и положительных коэффициентах скоростного смещения k_v представлены на рисунке. Реакции фильтра изображены от начала работы до момента фиксации расходимости. Расходимость фильтра фиксировалась при пороговом значении $\Delta_R = 500$ м. С увеличением значения коэффициента скоростного смещения по модулю момент расходимости наступает раньше. Параметры моделирования следующие: темп поступления информации $T = 1$ с, память фильтра $N = 15$.



Графики реакции фильтра с ЭКП на дискретную единичную функцию при отрицательных (а) и положительных (б) коэффициентах скоростного смещения k_v

The reaction of the second-order filter with effective finite memory under the input of Heaviside function at negative (a) and positive (b) range-Doppler coefficients k_v

Характер реакции фильтра с ЭКП зависит от знака коэффициента скоростного смещения. При отрицательном коэффициенте скоростного смещения реакция фильтра описывается пилообразным колебанием, а при положительном коэффициенте скоростного смещения – синусоидальным колебанием.

Заключение

В работе получены выражения для определения границ устойчивости (8) фильтра второго порядка с ЭКП и неполной компенсацией СО в случае описания модели движения согласно (1). Выражение (1) описывает закон изменения дальности движущегося равноускорено РО, в котором второй коэффициент полинома равен ускорению движения РО. Выражения границ устойчивости (8) дополняют известные результаты [5], касающиеся описания модели движения (2). Выражение (2) описывает закон изменения дальности движущегося равноускорено РО, в котором второй коэффициент полинома равен половине ускорения движения РО.

Список литературы

- Мурзова М.А., Фарбер В.Е. 2023. Оценка влияния скоростной ошибки на характеристики фильтров 2-го порядка с растущей памятью. *Радиотехника*, 87(9): 5–23. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202309-01>
- Мурзова М.А., Фарбер В.Е. 2024. Оценка влияния скоростной ошибки на характеристики диффузионных фильтров 2-го порядка. [Evaluation of the effect of speed error on the characteristics of second-order diffusion filters]. *Радиотехника*, 88(4): 5–23. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202404-01>
- Мурзова М.А., Фарбер В.Е. 2019. Сравнение способов компенсации скоростной ошибки по дальности в алгоритмах оценки дальности и радиальной скорости. *Радиотехника*, 4: 5–16.
- Мурзова М.А., Фарбер В.Е. 2020. Оценка границ устойчивости квазиоптимальных фильтров первого порядка с учетом скоростной ошибки по дальности. *Радиотехника*, 4: 5–15. DOI: [10.18127/j00338486-202004\(7\)-01](https://doi.org/10.18127/j00338486-202004(7)-01).
- Трофименко М.А., Фарбер В.Е. 2016. Оценка влияния скоростной ошибки на устойчивость фильтров второго порядка. *Радиотехника*, 80 (4): 5–17.
- Blair W. D. 2019. NCV Filter Design for Radar Tracking of Maneuvering Targets with LFM Waveforms. *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*: 1–5.
- Blair W. D. 2020. Design of NCA Filters for Tracking Maneuvering Targets. *2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20)*: 1–6.
- Brookner Eli. 1998. Tracking and Kalman Filtering Made Easy. John Wiley & Sons, Inc.:504.
- Fitzgerald, R.J. 1974. Effect of Range-Doppler Coupling on Chirp Radar Tracking Accuracy. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, V. AES-10, 4: 528–532.
- Jain V., Blair W.D. 2009. Filter Design for Steady-State Tracking of Maneuvering Targets with LFM Waveforms. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 45(2): 765–773.
- Murzova M.A., Farber V.E. 2024. Three-State Kalman Filter for Objects Tracking with LFM Waveforms: $\alpha\beta\gamma$ -Filter and Growing-Memory Filter. *2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC)*: 71–76.
- Newton, George C. et al. 1957. Analytical design of linear feedback controls.
- Poularikas, A.D. 2000. The Z-Transform. The Transforms and Applications Handbook. Second Edition, Boca Raton: CRC Press LLC.:1336.

References

- Murzova M.A., Farber V.E. 2023. Ocenka vlijanija skorostnoj oshibki na harakteristiki fil'trov 2-go porjadka s rastushhej pamjat'ju [Evaluation of the effect of speed error on the characteristics of 2nd-order filters with growing memory]. *Radiotekhnika*, 87(9): 5–23. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202309-01>.
- Murzova M.A., Farber V.E. 2024. Ocenka vlijanija skorostnoj oshibki na harakteristiki diffuzionnyh fil'trov 2-go porjadka [Evaluation of the effect of speed error on the characteristics of second-order diffusion filters]. *Radiotekhnika*, 88(4): 5–23. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202404-01>.
- Murzova M.A., Farber V.E. 2019. Sravnenie sposobov kompensacii skorostnoj oshibki po dal'nosti v algoritmah ocenki dal'nosti i radial'noj skorosti [Comparison of methods for compensating for speed errors in range estimation algorithms and radial velocity algorithms]. *Radiotekhnika*, 4: 5–16.

- Murzova M.A., Farber V.E. 2020. Ocenka granic ustojchivosti kvazioptimal'nyh fil'trov pervogo porjadka s uchetom skorost-noj oshibki po dal'nosti [Estimation of the stability boundaries of first-order quasi-optimal filters, taking into account the speed error in range]. *Radiotekhnika*, 4: 5–15. DOI: 10.18127/j00338486-202004(7)-01.
- Trofimenko M.A., Farber V.E. 2016. Ocenka vlijanija skorostnoj oshibki na ustojchivost' fil'trov vtorogo porjadka [Estimating the impact of speed error on the stability of second-order filters]. *Radiotekhnika*, 80(4): 5–17.
- Blair W. D. 2019. NCV Filter Design for Radar Tracking of Maneuvering Targets with LFM Waveforms. *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*: 1–5.
- Blair W. D. 2020. Design of NCA Filters for Tracking Maneuvering Targets. *2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20)*: 1–6.
- Brookner Eli. 1998. Tracking and Kalman Filtering Made Easy. John Wiley & Sons, Inc.
- Fitzgerald, R.J. 1974. Effect of Range-Doppler Coupling on Chirp Radar Tracking Accuracy. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, V. AES-10, 4: 528–532.
- Jain V., Blair W.D. 2009. Filter Design for Steady-State Tracking of Maneuvering Targets with LFM Waveforms. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 45(2): 765–773.
- Murzova M.A., Farber V.E. 2024. Three-State Kalman Filter for Objects Tracking with LFM Waveforms: $\alpha\beta\gamma$ -Filter and Growing-Memory Filter. *2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC)*: 71–76.
- Newton, George C. et al. 1957. Analytical design of linear feedback controls.
- Poularikas, A.D. 2000. The Z-Transform. The Transforms and Applications Handbook. Second Edition, Boca Raton: CRC Press LLC.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 20.03.2026

Received March 20, 2026

Поступила после рецензирования 26.05.2026

Revised May 26, 2026

Принята к публикации 29.05.2026

Accepted May 29, 2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мурзова Мария Андреевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ПАО «Радиофизика», г. Москва, Россия, SPIN-код 1374-3290

Mariia A. Murzova, Candidate of Technical Sciences, Senior researcher, JSC “Radiofizika”, Moscow, Russia

Фарбер Владимир Ефимович, доктор технических наук, профессор, начальник отдела, ПАО «Радиофизика», г. Москва, Россия, SPIN-код 2390-0154

Vladimir E. Farber, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, JSC “Radiofizika”, Moscow, Russia

Головко Марина Викторовна, ассистент кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Marina V. Golovko, Assistant of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia