



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-1-22-30>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.96

СГЛАЖИВАЮЩИЙ ФИЛЬТР С ВАРИАЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ МАНЕВРИРУЮЩЕЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЦЕЛИ

В.А. АПОРОВИЧ

*ОАО «АГАТ – системы управления» – управляющая компания холдинга
«Геоинформационные системы управления» (г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 5 июля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В статье предложен новый фильтр сопровождения маневрирующей аэродинамической цели. При синтезе фильтра учитывались три главных требования: фильтр должен обеспечивать минимальную ошибку сглаживания на участках без маневра; фильтр должен обеспечивать минимально возможные ошибки и выбросы ошибки сглаживания во время маневра; фильтр не должен содержать дополнительные константы, учитывающие внешние параметры, например, величину входных ошибок, параметры маневра цели, период обновления информации и т. п. Для выполнения данных требований использована двукратная корректировка (вариация) коэффициентов сглаживания в соответствии с величиной отклонения координаты вновь измеренного положения цели (отметки) от экстраполированного положения. Вариация производится в соответствии с выбранной функцией, при этом шаг сглаживания далее приобретает некоторое условное значение. Проведено моделирование предложенного фильтра. Полученные при моделировании значения ошибок сглаживания сравнивались с ошибками сглаживания других фильтров, описанных в научной литературе. Результаты сравнения показывают существенное снижение среднеквадратических ошибок сглаживания координаты и скорости у предложенного фильтра по сравнению с другими образцами; в соответствии с главными требованиями никаких дополнительных констант в предложенном фильтре не использовалось.

Ключевые слова: обработка радиолокационной информации, маневр, аэродинамическая цель, сглаживание координат, вариация коэффициентов.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Апорович В.А. Сглаживающий фильтр с вариацией коэффициентов для сопровождения маневрирующей аэродинамической цели. Доклады БГУИР. 2022; 20(1): 22-30.

SMOOTHING FILTER WITH A VARIATION OF COEFFICIENTS FOR TRACKING A MANEUVERING AERODYNAMIC TARGET

ULADZIMIR A. APAROVICH

OJSC "AGAT – Control Systems – Managing Company of Geoinformation Control Systems Holding"
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 5 July 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The article offers a new filter for tracking a maneuvering aerodynamic target. During the process of the filter synthesis, three main requirements were considered: the filter must provide a minimum smoothing error in the areas without maneuver; the filter should ensure the minimum possible errors and emissions of smoothing error during the maneuver; filter must not contain additional constants, which take into account, for example, the value of input errors, parameters of target maneuver, period of information modification and so on. In order to meet these requirements a two-fold adjustment (variation) of the coefficients smoothing was used in accordance with the deviation of the coordinate of the newly measured position of the target (mark) from the extrapolated position. The variation is performed in accordance with the selected function, while the smoothing step acquires a certain conditional value. The proposed filter modelling has been performed. Received by modelling values of smoothing errors were compared with smoothing errors of other filters, described in scientific literature. The comparison results demonstrate a significant decrease in smoothing of the root mean square errors of coordinates and velocity in the proposed filter in comparison with other samples; with according to main requirements, any “tunes” in proposed filter were not used.

Keywords: radar information processing, maneuver, aerodynamic target, smoothing of coordinates, variation of coefficients.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Aparovich U.A. Smoothing Filter With a Variation of Coefficients for Tracking a Maneuvering Aerodynamic Target. Doklady BGUIR. 2022; 20(1): 22-30.

Введение

В настоящее время разработано большое количество фильтров для сопровождения маневрирующей аэродинамической цели, применяемых в системах обработки радиолокационной информации [1–8]. В соответствии с [1] такие фильтры подразделяются на четыре типа:

- без обнаружения маневра (Тип 1);
- с обнаружением маневра (Тип 2);
- многоальтернативные (ИММ-фильтры) (Тип 3);
- фильтры частиц и другие им подобные.

Вместе с тем задача обеспечения эффективного сглаживания координатной информации остается актуальной, и все типы фильтров имеют свои недостатки.

Первые два типа характеризуются малыми ошибками сглаживания на тех участках траектории цели, где нет маневра, и большими ошибками на участках маневра. Как правило, имеют место большие «выбросы» ошибки во время маневра.

Третий тип за счет своих внутренних настроек позволяет в широких пределах менять соотношение ошибок на участках маневра и при его отсутствии. Судя по литературным источникам [1–8], здесь чаще всего используются варианты, где обеспечиваются сравнительно небольшие ошибки на участках маневра и большие ошибки при его отсутствии.

В фильтрах частиц специально генерируются случайные отклонения входных отметок («частицы»), т. е. искусственно вносится элемент случайности в процесс сглаживания. Результаты работы фильтров частиц сходны с результатами работы фильтров Типа 1 и 2,

т. е. повышения эффективности фильтрации по сравнению с другими типами фильтров не наблюдается.

Кроме того, многие варианты фильтров всех типов априорно «настраиваются» на определенные значения интенсивности маневра или другие внешние параметры. Это приводит к тому, что ошибки сглаживания при отклонениях значений входных параметров от настроек существенно возрастают.

Формулировка задачи

При синтезе фильтра, описанного в данной статье, поставлена задача создать фильтр, удовлетворяющий следующим требованиям:

- фильтр должен обеспечить минимальную ошибку сглаживания на участках без маневра;
- фильтр должен обеспечить минимально возможные ошибки и выбросы ошибки сглаживания во время маневра;
- в фильтре не должно быть использовано никаких априорных констант («настроек»), учитывающих внешние параметры, например, величину входных ошибок, параметры маневра цели, период обновления информации и т. п.

Предлагаемый способ решения задачи

В отличие от фильтров частиц, в новом фильтре предлагается не генерировать случайные частицы, а использовать уже имеющийся случайный параметр – отклонение координаты вновь измеренного положения цели (отметки) от ее экстраполированного положения. Это отклонение использовано для многократной корректировки-варьирования коэффициентов сглаживания с целью последовательного отслеживания потенциального начала маневра.

Далее новый фильтр будем называть фильтром с вариацией коэффициентов сглаживания (ФВК).

В качестве исходного варианта-аналога используем равноточный, равнодискретный фильтр из [9], который является вариантом фильтра Калмана для линейно изменяющейся координаты. Основные соотношения для этого фильтра:

$$X_{p_i} = X_{s_{i-1}} + V_{Xs_{i-1}} \cdot T, \quad (1)$$

$$A_i = \frac{2(2 \cdot i - 1)}{i(i+1)}, \quad (2)$$

$$B_i = \frac{6}{i(i+1)}, \quad (3)$$

$$\Delta X_i = X_i - X_{p_i}, \quad (4)$$

$$X_{s_i} = X_{p_{i-1}} + A_i \cdot \Delta X_i, \quad (5)$$

$$V_{Xs_i} = V_{Xs_{i-1}} + B_i \cdot \frac{\Delta X_i}{T}, \quad (6)$$

где X_{p_i} – экстраполированное значение координаты X на i -й момент (период) фильтрации; $X_{s_{i-1}}$, $V_{Xs_{i-1}}$ – сглаженные значения координаты X и скорости ее изменения на $(i-1)$ -й момент соответственно; A_i , B_i – коэффициенты сглаживания на i -й момент для координаты и скорости соответственно; ΔX_i – разница измеренного значения координаты X на i -й момент X_i и экстраполированного значения X_{p_i} ; X_{s_i} , V_{Xs_i} – сглаженные значения координаты и скорости на i -й момент времени; T – период поступления отметок (период обзора).

В данном фильтре-аналоге значения коэффициентов сглаживания A_i и B_i зависят только от шага i . С увеличением i значения A_i и B_i монотонно уменьшаются. Это означает, что мы все больше и больше «верим» своим сглаженным (экстраполированным) значениям и все меньше и меньше «верим» вновь поступающей информации (отметкам). Известно, что подобный фильтр при маневрах цели (отклонении от прямолинейного равномерного движения) при достаточно больших i будет давать большое значение ошибок сглаживания.

При синтезе ФВК выполним следующие условия:

1) коэффициенты сглаживания должны увеличиваться с увеличением отклонения Δx_i и уменьшаться с уменьшением Δx_i . Чем меньше отклонение, тем меньше мы ему «верим», а чем больше – тем больше мы ему «верим». Это позволяет быстрее отследить начало маневра по последовательному увеличению Δx_i . Необходимо отметить, что коэффициенты сглаживания становятся как бы «случайными»;

2) среднее значение коэффициентов сглаживания не должно отличаться от значений, подсчитанных по формулам (2) и (3), чтобы обеспечить эффективное сглаживание при отсутствии маневра. То есть не хуже, чем у фильтра-аналога.

Для выполнения условий 1) и 2) выберем функцию для корректировки коэффициентов. Вид предлагаемой функции для коэффициента A приведен на рис. 1, где An_i – результирующее значение коэффициента для использования в формуле (5) вместо A_i .

Величина An_i должна быть такой, чтобы среднее значение An_i для всех Δx_i было близко или равно A_i для выполнения условия 2). При увеличении значения Δx_i (возможный маневр) значение An_i должно увеличиваться.

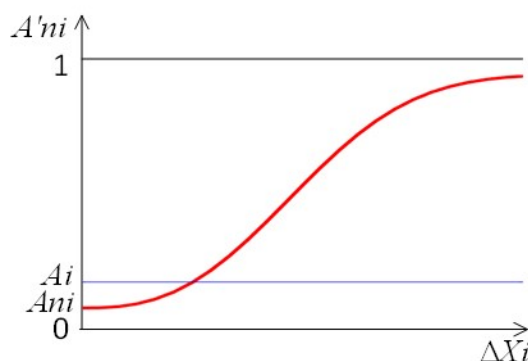


Рис. 1. Вид функции для корректировки коэффициента A
Fig. 1. Function type for adjustment of coefficient A

Алгоритм работы ФВК

Начальные значения для фильтра ФВК:

- для $i = 1$ и 2 A_i и B_i равны 1, $X_{s_i} = X_i$;
- $V_{xs_2} = \frac{X_2 - X_1}{T}$.

Вводим также новый параметр «условный шаг» (УШ) in_i для i -го шага. Начальное значение УШ равно 3. Считаем, что нам известна среднеквадратическая ошибка (СКО) измерения координаты σ_x .

Последовательность действий алгоритма при $i > 2$.

1. Начало. Получение нового значения X_i .
2. Экстраполяция координаты X по формуле (1).
3. Расчет размера строба сопровождения по координате X :

$$\Delta c x_i = \sigma_x \cdot K_g \cdot K_{c_i},$$

где K_g – доверительный коэффициент (обычно 3); K_{c_i} – коэффициент строга, учитывающий СКО экстраполяции и измерения [10]:

$$K_{c_i} = \sqrt{\frac{2(2 \cdot i n_i - 1)}{(i n_i - 1)(i n_i - 1)}} + 1.$$

4. Первая корректировка УШ. Мы «увеличиваем» УШ, чтобы потом получилось значение $A n_i$, меньшее, чем значение A_i по формуле (2), в соответствии с рис. 1:

$$i' n_i = K \cdot (i n_i - 1) + 1,$$

где K – некоторый коэффициент увеличения значения шага. Следует отметить, что УШ перестает быть целым [10].

5. Расчет коэффициента сглаживания для УШ в соответствии с формулой (2):

$$A n_i = \frac{2(2 \cdot i' n_i - 1)}{i' n_i (i' n_i + 1)}.$$

6. Расчет отклонения по формуле (4).

7. Расчет относительного отклонения:

$$\delta_{x_i} = \left| \frac{\Delta x_i}{\Delta c x_i} \right|.$$

8. Корректировка коэффициента сглаживания $A n_i$ в соответствии с δ_{x_i} .
Корректировка реализует функцию, приведенную на рис. 1, только вместо Δx_i берется δ_{x_i} .

$$A' n_i = 1 - (1 - A n_i) \cdot Kor,$$

где $Kor = \exp\left(-\frac{\delta_{x_i} S}{S_s}\right)$; $S = \log\left(\frac{A_m}{A n_i}\right) + 2$; $S_s = 2 \cdot \frac{A_m}{A n_i}$, – нормирующее значение A .

Предложенные формулы для расчета $A' n_i$ отражают:

– нормальность случайных процессов;

– необходимость обеспечения вида функции для $A' n_i$, как на показано рис. 1.

9. Расчет нового значения УШ. Выражение для УШ получено из (2) решением квадратного уравнения, где $A_i(A' n_i)$ – аргумент, $i(i' n_i)$ – искомая величина:

$$i' n_i = \frac{4 - A' n_i + \sqrt{(A' n_i - 4)^2 - 8A' n_i}}{2A' n_i + 1}.$$

10. Рассчитываем коэффициент сглаживания по скорости по формуле (3):

$$B' n_i = \frac{6}{i' n_i (i' n_i + 1)}.$$

11. Расчет сглаженных значений по (5) и (6):

$$X_{s_i} = X_{p_{i-1}} + A' n_i \cdot \Delta x_i; V_{Xs_i} = V_{Xs_{i-1}} + B' n_i \cdot \frac{\Delta x_i}{T}.$$

12. Модификация УШ на следующий шаг i . Значение i модифицируется на единицу. Здесь мы вводим ограничение УШ $i n m$ [4]:

$$i n_i = \begin{cases} i' n_i + 1, & \text{если } i' n_i + 1 \leq i n m; \\ i n m, & \text{если } i' n_i + 1 > i n m. \end{cases}$$

Далее, при получении нового значения X_i , действия 1) ... 12) повторяются.

Рекомендуемые значения параметров для ФВК: $K = 1,3$ для $i n_i < 50$, $K = 1,05$ для $i n_i \geq 50$; $A_m = 0,2$; $i n m = 20$. Очевидно, ФВК относится к Типу 1.

Результаты моделирования

Эффективность ФВК была оценена с помощью имитационного моделирования.

Для сравнения выбраны результаты моделирования из таких литературных источников, где эксперимент описан достаточно подробно, чтобы его можно было воспроизвести для ФВК, а также однозначно интерпретировать результаты. Это позволяет взять для сравнения уже имеющиеся там результаты.

Условия экспериментов описаны в табл. 1.

Таблица 1. Условия экспериментов
Table 1. Conditions of experiments

Характеристика (characteristic)	Литературный источник (literary source)	
	[6]	[3]
Начальная скорость	$V_X = 10$ м/с	$V_X = 300$ м/с
Период T , с	1	2
Период маневра, с	50–70	22–46
Ускорение на маневре	$a_X = 5$ м/с ²	Центростремительное $a = 4g$ (g – ускорение свободного падения)
Конец эксперимента	120 с и 240 с	80 с
СКО	$\sigma_X = 5$ м	$\sigma_X = 250$ м
Исследуемые фильтры и их типы	«VSD» – Тип 2 «AI» – Тип 3 «VPN» – Тип 3	«Method 1a» – Тип 1 «Method 4a» – Тип 2 «Method 5a» – Тип 3
Имеющиеся результаты	Зависимость сглаженной СКО σ_{SX} от времени t . Зависимость СКО сглаженной скорости σ_{SIX} от времени t . Таблица значений СКО для координаты X	Зависимость сглаженной СКО σ_{SX} от времени t

Сглаживание осуществляется независимо по одной из координат (X). Результаты моделирования для различных фильтров из [6] и [3] и ФВК приведены на рис. 2–4 и в табл. 2. На рис. 2, 3 показаны зависимости сглаженной СКО σ_{SX} по координате X от времени t (графики построены по характерным точкам). На рис. 2 приведены зависимости для [6], на рис. 3 – для [3]. На рис. 4 приведены зависимости СКО сглаженной скорости σ_{SIX} по координате X для фильтров из [6] и ФВК.

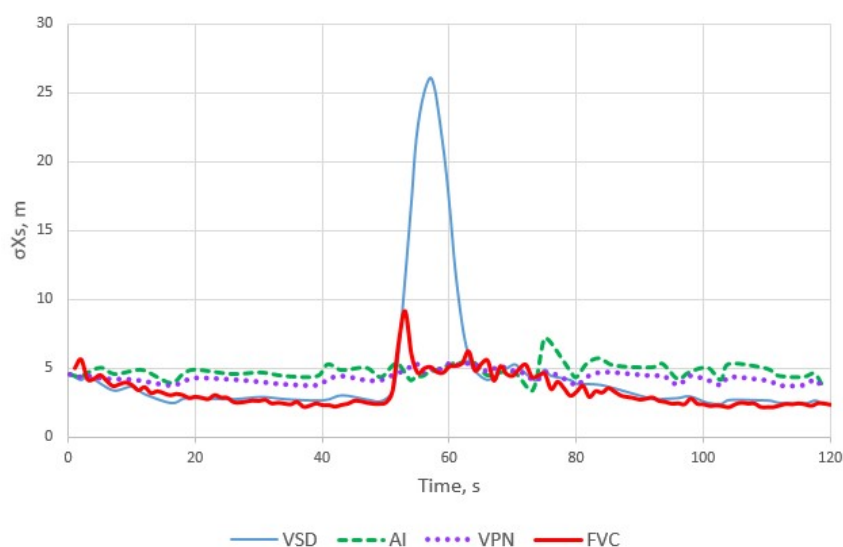


Рис. 2. Зависимость сглаженной СКО σ_{SX} от времени t для фильтров из [6] и ФВК (FVC)

Fig. 2. Dependence of smoothed RMSE σ_{SX} on Time t for filters of [6] and FVC

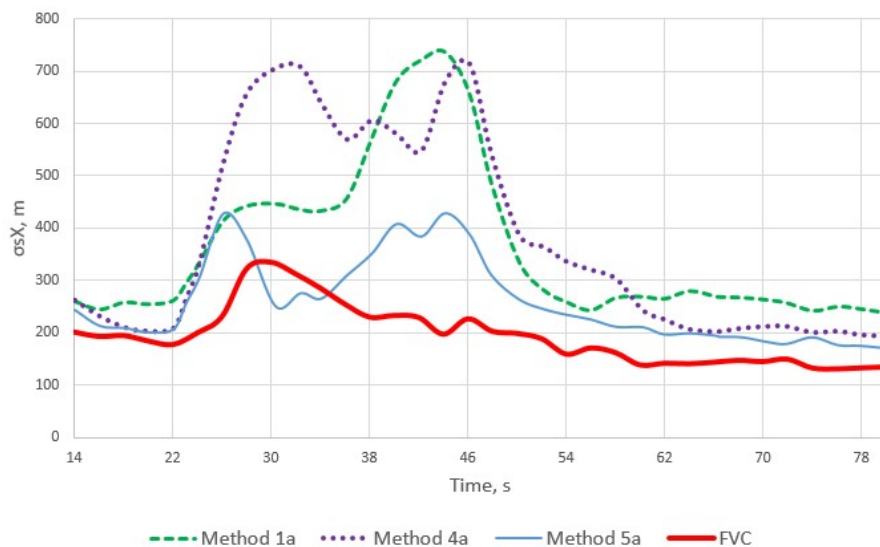


Рис. 3. Зависимость сглаженной СКО σ_{sx} от времени t для фильтров из [3] и ФВК (FVC)
Fig. 3. Dependence of smoothed RMSE σ_{sx} on Time t for filters of [3] and FVC

В табл. 2 приведены значения общей СКО для всех фильтров для экспериментов из [6]. Под общей СКО здесь понимается среднее значение ошибки на всем временном промежутке.

Таблица 2. Значения общей СКО для фильтров из [6] и ФВК
Table 2. Values of general RMSE for filters of [6] and FVC

Фильтр (filter)	Длительность эксперимента (duration of the experiment)			
	240 с		120 с	
	σ_{sx} , м	$\sigma_{v_{sx}}$, м/с	σ_{sx} , м	$\sigma_{v_{sx}}$, м/с
VPN	4,12	3,51	4,35	4,30
VSD	4,92	2,92	7,88	5,17
AI	4,64	4,21	4,72	4,30
ФВК	2,98	2,40	3,54	3,40

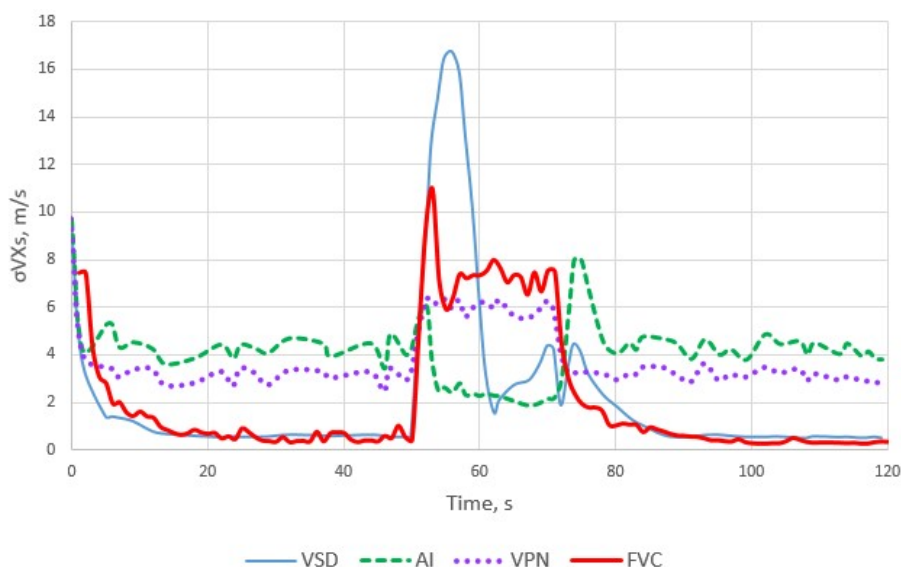


Рис. 4. Зависимость СКО сглаженной скорости $\sigma_{v_{sx}}$ от времени t для фильтров из [6] и ФВК (FVC)
Fig. 4. Dependence of RMSE smoothed speed $\sigma_{v_{sx}}$ on Time t for filters of [6] and FVC

Анализ результатов

Анализ результатов моделирования показывает, что в целом ФВК обеспечивает более высокое качество сглаживания (меньшую СКО сглаженного параметра и скорости его изменения) по сравнению с другими фильтрами (см., например, табл. 2). По сравнению с фильтрами Типа 1 и 2 (VSD, Method 1a, Method 4a) ФВК обеспечивает меньшее значение «выброса» ошибки на участке маневра. При этом эффективность сглаживания при отсутствии маневра не снижается, как у фильтров Типа 3 (AI, VPN, Method 5a; рис. 2 – 4). Эффективность ФВК не снижается при изменении входного значения ошибки, периода обзора, интенсивности и длительности маневра.

Заключение

Анализ результатов моделирования показывает, что ФВК для сопровождения маневрирующей аэродинамической цели в целом обеспечивает более высокую эффективность (меньшее значение сглаженной СКО) по сравнению с различными другими типами и вариантами фильтров. В частности, ФВК обеспечивает меньшее значение «выброса» на участке маневра и малую ошибку при отсутствии маневра. Это достигнуто введением нового механизма корректировки коэффициентов сглаживания при учете отклонения координат отметки от экстраполированного положения цели.

В предложенном фильтре отсутствуют какие-либо настройки на входные ошибки, параметры маневра цели, период обзора и т. п. факторы.

Список литературы

1. Коновалов А.А. *Основы траекторной обработки радиолокационной информации*: в 2 ч. Ч. 2. С.-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; 2014.
2. He Yon, Xin Jianjuan, Guan Xin. *Radar Data Processing with Applications*. Publishing house of Electronic Industry. Singapore; 2016.
3. Blackman S., Popoli R. *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*. Artech House. Boston – London; 1999.
4. Кузьмин С.З. *Цифровая радиолокация*. Киев: КВИЦ; 2000.
5. Bar-Shalom Y., Rong Li X., Thiagalingam Kirubarajan. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. John Wiley & Sons, Inc.; 2001.
6. Yang Chun, Blasch Eric. Characteristic Errors of the IMM Algorithm under Three Maneuver Models for an Accelerating Target. *11th International conference of Information Fusion*. IEEE, Cologne, Germany; 2008.
7. Бакулев П.А., Сычёв М.И., Нгуен Чонг Лыу. Многомодельный алгоритм сопровождения траектории маневрирующей цели по данным обзорной РЛС. *Радиотехника*. 2004;1:26-32.
8. Хмарский П.А., Солонар А.С. Особенности реализации адаптивных дискретных фильтров Калмана при косвенных измерениях. *Доклады БГУИР*. 2012;8(70):57-63.
9. Кузьмин С.З. *Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации*. Москва: Советское радио; 1974.
10. Апорович В.А. Неравноточный и неравнодискретный фильтр табличного сглаживания координат. *Радиотехника*. 1997;3:43-45.

References

1. Konovalov A.A. [*Bases of the trajectory processing of radar information*: in 2 Parts. 2-nd Part]. St.-Petersburg: SPbGATU “LATI”; 2014. (In Russ.)
2. He Yon, Xin Jianjuan, Guan Xin. *Radar Data Processing with Applications*. Publishing house of Electronic Industry. Singapore; 2016.
3. Blackman S., Popoli R. *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*. Artech House. Boston – London; 1999.
4. Kuzmin S.Z. [*Digital Radiolocation*]. Kiev: KVIC; 2000. (In Russ.)
5. Bar-Shalom Y., Rong Li X., Thiagalingam Kirubarajan. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. John Wiley & Sons, Inc.; 2001.

6. Yang Chun, Blasch Eric. Characteristic Errors of the IMM Algorithm under Three Maneuver Models for an Accelerating Target. *11th International conference of Information Fusion*. IEEE, Cologne, Germany; 2008.
7. Baculev P.A., Sichiou M.I., Nguen Chong Liu. [Multi-model algorithm of maneuvering target tracking by information of surveying radar]. *Radiotekhnika*. 2004;1:26-32. (In Russ.)
8. Khmarski P.A., Solonar A.S. [Features of adaptive extended Kalman filter implementations]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2012;8(70):57-63. (In Russ.)
9. Kuzmin S.Z. [*Bases of theory of radar information digital processing*]. Moscow: Sovetskoe radio; 1974. (In Russ.)
10. Aparovich V.A. [Un-precise and un-discrete filter of table smoothing of coordinates]. *Radiotekhnika*. 1997;3:43-45. (In Russ.)

Сведения об авторах

Апорович В.А., к.т.н., начальник сектора ОАО «АГАТ-системы управления» – управляющая компания холдинга «Геоинформационные системы управления».

Information about the authors

Aparovich U.A., Cand. of Sci., Section Chief of Open Joint-Stock Company “AGAT – Control Systems” – Managing Company of “Geoinformation Control Systems Holding”.

Адрес для корреспонденции

220114, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 117,
Открытое акционерное общество
«АГАТ – системы управления» – управляющая
компания холдинга «Геоинформационные
системы управления»;
тел. +375-29-569-41-49;
e-mail: aporovich@agat.by
Апорович Владимир Андреевич

Address for correspondence

220114, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave, 117,
Open Joint-Stock Company
“AGAT – Control Systems – Managing
Company of “Geoinformation Control
Systems Holding”;
tel. +375-29-569-41-49;
e-mail: aporovich@agat.by
Aparovich Uladzimir Andreevich