

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА ЭТАПЕ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.В. Зинова

zinova.vasilissa@mail.ru

SPIN-код: 4129-9250

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Выполнен краткий обзор алгоритмов фильтрации, используемых на этапе вторичной обработки радиолокационной информации в радиолокационных системах. Для этого выполняются имитационное моделирование, состоящее из двух этапов. Первый этап — построение математической модели летательного аппарата, второй — проведение эксперимента. В процессе эксперимента синтезированы три алгоритма фильтрации: классический фильтр Калмана, расширенный фильтр Калмана и фильтр «альфа-бета». Установлена взаимосвязь между ними и принципиальных отличий. В конце в виде рекомендаций сделаны выводы о возможности и целесообразности применения перечисленных алгоритмов фильтрации в различных условиях воздушной обстановки.

Ключевые слова

Классический фильтр Калмана, фильтр «альфа-бета», расширенный фильтр Калмана, вторичная обработка, алгоритм фильтрации, траекторная обработка, динамическая система, имитационное моделирование, критерий оптимальности, модель движения

Поступила в редакцию 07.06.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Военные конфликты XX и XXI веков свидетельствуют о решающем значении средств воздушно космического нападения на ход и результаты боя [1]. Способность средств противовоздушной обороны обеспечить уничтожение воздушного противника во многом определяется своевременностью получения радиолокационной информации высокого качества. Качество получаемой информации зависит не только от вида объекта и помеховой обстановки, но и от алгоритма ее обработки [2].

Движение объекта можно рассматривать как некоторый (чаще всего случайный) процесс на конечном промежутке времени. Фильтрация — это непрерывное воспроизведение переменной, являющейся параметром наблюдаемого случайного процесса [3]. Задача методов фильтрации состоит в получении на выходе фильтра информации, наиболее приближенной к реальной. Метод является оптимальным, если любой другой алгоритм, решая данную задачу, работает не лучше данного по какому-либо критерию [4].

В [5] выделяется два основных подхода к решению задач фильтрации случайных процессов: на основе фильтра Винера и фильтра Калмана. Теория калмановской фильтрации была разработана позднее винеровской и является ее существенным развитием.

Критерием оптимальности фильтра Винера служит минимум среднего квадрата ошибки ($\min E(e_i^2)$) [6]. Уравнением наблюдения является аддитивная смесь сигнала $s(t)$ и шума $n(t)$:

$$z(t) = s(t) + n(t).$$

Сигнал считается случайным с заданной корреляционной функцией, причем рассматривается как непрерывная версия уравнения, так и цифровая.

Критерием оптимальности фильтра Калмана так же, как и в случае фильтра Винера, служит минимум среднего квадрата ошибки. В отличие от процедуры синтеза фильтра Винера здесь оцениваемый случайный процесс задается в виде стохастического дифференциального уравнения, а уравнение наблюдения имеет вид

$$z(t) = H(t)x(t) + n(t),$$

где $H(t)$ — известная функция; $\lambda(t)$ — некоторый случайный процесс, который задается упомянутым дифференциальным уравнением.

Согласно [7] существует три типа линейных оптимальных фильтров, применяемых для обработки случайных процессов. Кроме описанных выше фильтров Винера и Калмана выделяется фильтр, сигнал для которого считается детерминированным. Фильтр оптимален по критерию максимума отношения сигнал/шум на выходе, сигнал на выходе считается детерминированным:

$$z(t) = \frac{s_0^2}{\sigma_{n0}^2},$$

где $s_0 = s_0(t)$ — сигнал на выходе фильтра; σ_{n0}^2 — мощность шума на выходе фильтра.

Классический фильтр Калмана. В данной работе рассмотрим фильтр Калмана. С помощью калмановского подхода, в отличие от винеровского, можно решать нестационарные задачи при конечном интервале наблюдения. Сигнал на его входе, в отличие от фильтра, критерием оптимальности которого является отношение сигнал/шум, считается детерминированным. Таким образом, данный фильтр подходит для осуществления фильтрации случайного процесса на конечном промежутке времени, каким и можно считать движение летательного аппарата. Алгоритм работы классического фильтра Калмана состоит из двух основных этапов, которые перечислены ниже [5].

Уравнение измерения имеет вид

$$Z_k = HX_k + n.$$

1. Предсказание

Предсказание состояния системы (экстраполяция):

$$\hat{X}_k^- = F\hat{X}_{k-1} + Bu_{k-1}. \quad (1)$$

Предсказание ошибки ковариации (ковариация экстраполяции):

$$P_k^- = FP_{k-1}F^T + Q. \quad (2)$$

II. *Экстраполяция*

Вычисление усиления Калмана (коэффициент Калмана):

$$K_k = P_k H^T [HP_k^- H^T + R]^{-1}. \quad (3)$$

Обновление оценки с учетом Z_k :

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k [Z_k - H\hat{X}_k^-]. \quad (4)$$

Обновление ошибки ковариации:

$$P_k = [I - K_k H] P_k^-. \quad (5)$$

Здесь X — уравнение состояния динамической системы; F — матрица экстраполяции, при измерениях в трехмерном пространстве; B — матрица, характеризующая влияние случайных возмущений; P_k — ковариационная матрица оценки состояния системы; H — матрица пересчета пространства состояния динамической системы в пространство отсчетов; R и Q — ковариационные матрицы ошибок оценивания параметров, измеряемых на этапе первичной обработки; Z — матрица измерений; I — единичная матрица.

Коэффициенты k у некоторых матриц опущены, так как переменной данных матриц является интервал времени τ , в случае равнодисcretных и равноточных значений данные матрицы являются постоянными во времени. В таком случае при анализе данного алгоритма выясняется, что коэффициент фильтра Калмана зависит от ковариационных матриц и матриц перехода. Данные матрицы задаются до начала работы с фильтром. Если они постоянны, то коэффициент Калмана также будет постоянным. В процессе фильтрации изменяются значения ковариационной матрицы состояния системы P_k , причем они зависят от коэффициента Калмана. Следовательно, можно предположить, что значение коэффициента Калмана станет постоянным спустя некоторый промежуток времени.

Фильтр «альфа-бета». В случае равнодисcretных и равноточных измерений возможно использование упрощенного алгоритма Калмана, называемого фильтром «альфа-бета». По [8] алгоритм фильтрации упрощается.

I. *Предсказание*

Предсказание состояния системы (совпадает с уравнением (1))

II. *Экстраполяция*

Вычисление усиления Калмана (коэффициент Калмана):

$$K = [\alpha \quad \beta / \tau]^T,$$

где α и β — постоянные коэффициенты, задаваемые до начала работы с фильтром.

Обновление оценки с учетом Z_k совпадает с уравнением (4).

Расширенный фильтр Калмана. Классический фильтр Калмана не применим для обработки информации о траекториях маневрирующих целей, так как в этом случае в модели состояния появятся нелинейные составляющие. Алгоритм расширенного фильтра Калмана основан на разложении в ряд Тейлора нелинейного уравнения. В этом фильтре используются уравнения, линеаризованные относительно последней оценки, чтобы приблизить оценку к фактическому состоянию.

Уравнение измерения расширенного фильтра Калмана [9]:

$$Z_k = h[x_k] + n.$$

Алгоритм фильтра Калмана в соответствии с [9]:

I. *Предсказание* (уравнения (1) и (2)).

II. *Экстраполяция*

Вычисление усиления Калмана (уравнение (3)).

Обновление оценки с учетом Z_k :

$$\hat{X}_{k-1} = \hat{X}_{k-1}^- + K_k [Z_k - h[x_k] - H_k (\hat{X}_{k-1}^- - \hat{X}_{k-1}^-)],$$

где H_k — частная производная функции h по обобщенной координате.

Обновление ошибки ковариации (уравнение (5)).

Расширенный фильтр Калмана также можно реализовать, добавив в уравнение состояния (5) дополнительное слагаемое в виде детерминированного управляющего воздействия.

Моделирование траектории движения летательного аппарата. Для исследования приведенных выше алгоритмов фильтрации требуется задать входные данные для цифрового фильтра [10]. Моделируем траекторию летательного аппарата, состоящая из пяти частей, на которых он:

- 1) летит прямолинейно равномерно на постоянной высоте;
- 2) совершает маневр (летит по окружности);
- 3) летит равнозамедленно;
- 4) совершает маневр (летит по окружности) и одновременно снижается;
- 5) снижается.

Поделим траекторию на части для того, чтобы оценить, как ведет себя каждый из алгоритмов фильтрации при различных ее характерах.

Моделирование выполнено в среде MATLAB. Полученная имитационная модель траектории приведена на рис. 1 и 2. Для наглядности представлен вид

сверху, на котором видна петля, совершаемая летательным аппаратом. Единицы измерения, отложенные по осям координат, — метры.

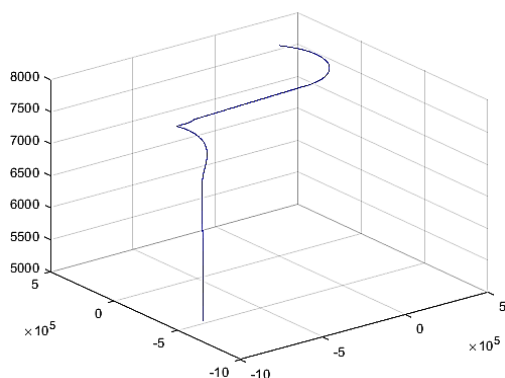


Рис. 1. Модель траектории летательного аппарата

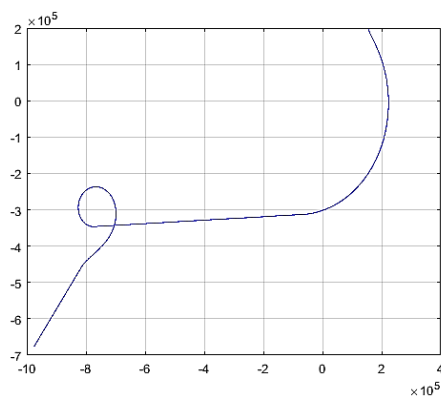


Рис. 2. Модель траектории летательного аппарата в координатах ОХУ

Проведение эксперимента. Реализованы три алгоритма фильтрации. Проведены два эксперимента, по результатам которого построены графики. В первом эксперименте участвуют классический фильтр Калмана и фильтр «альфа-бета». В качестве коэффициента альфа для чистоты эксперимента выбрано значение 0,095, к которому сходится коэффициент Калмана спустя 50 с от начала фильтрации (рис. 3).

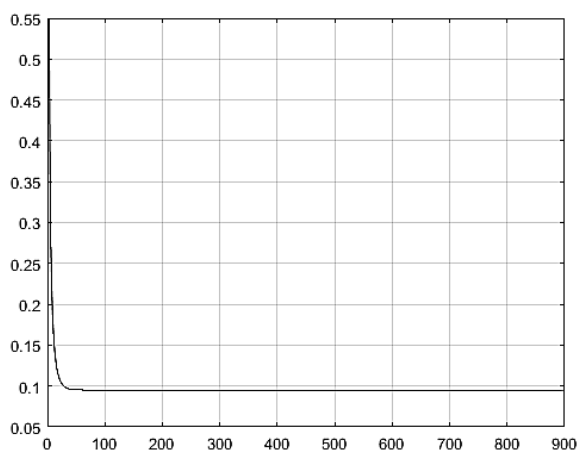


Рис. 3. Зависимость значения коэффициента Калмана от времени, где по оси абсцисс отложено время, по оси ординат — значение коэффициента

После установления коэффициента альфа на вход обоих фильтров подавали модель траектории движения летательного аппарата, смоделированную выше. Фильтрация осуществлялась в трехмерной системе координат (рис. 4), однако для наглядности подробное рассмотрение осуществлялось только в координа-

тах OXY (рис. 5). Далее рассмотрены три участка траектории (рис. 6–8). Первый и третий из них — это участки, на которых летательный аппарат совершает маневр, вторая — не меняет траектории движения.

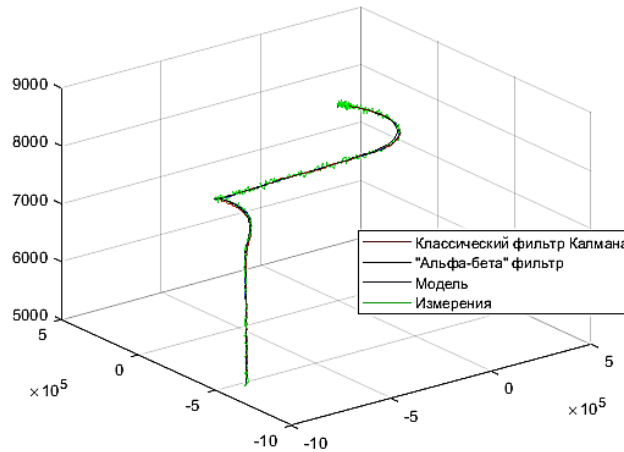


Рис. 4. Результаты эксперимента, в котором сравниваются классический фильтр Калмана и фильтр «альфа-бета»

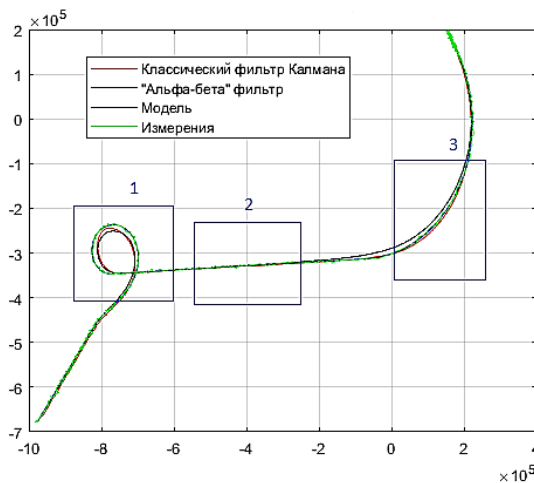


Рис. 5. Результаты эксперимента, в котором сравниваются классический фильтр Калмана и фильтр «альфа-бета» (вид сверху)

В результате построения траекторий можно заметить: при условии, что для фильтра «альфа-бета» был установлен коэффициент, к которому сходится коэффициент усиления Калмана, результаты не сильно различаются. На участках маневра наблюдаются значительные расхождения с реальной траекторией, зато на линейном участке оба фильтра успешно выдают траектории, близкие к реальной.

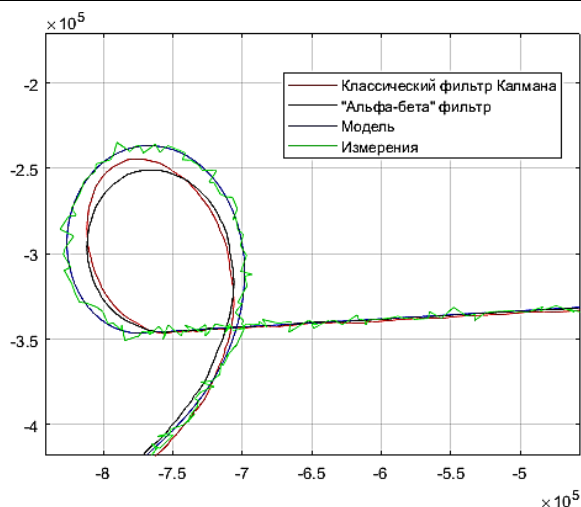


Рис. 6. Участок траектории № 1 (сравнение алгоритмов классического фильтра Калмана и фильтра «альфа-бета»)

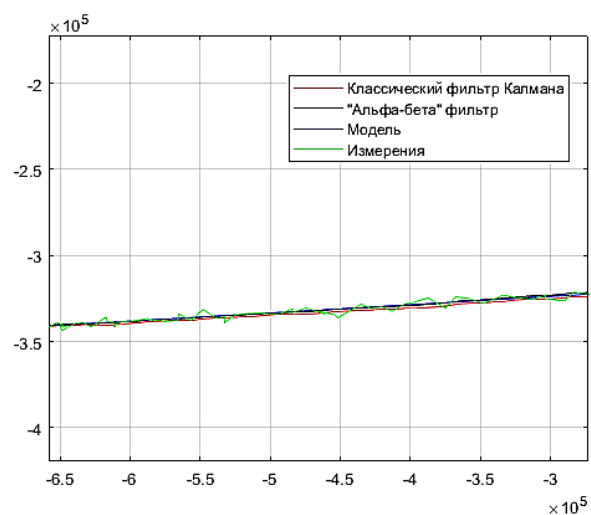


Рис. 7. Участок траектории № 2 (сравнение алгоритмов классического фильтра Калмана и фильтра «альфа-бета»)

Во втором эксперименте выполнено сравнение алгоритмов классического фильтра Калмана и расширенного фильтра. Фильтрация также проводится в трехмерной системе координат. По результатам эксперимента построены графики (рис. 9 и 10). Также для наглядности отдельно рассмотрены три участка траектории в координатах OXY (рис. 11–13).

На рис. 11 и 13 наглядно видно, что результат фильтрации расширенного фильтра Калмана больше приближен к реальной траектории, чем результат классического фильтра Калмана. Однако очевидно, что траектория, выдаваемая расширенным фильтром Калмана, ведет себя менее стабильно, чем выдаваемая

классическим. Особенно это заметно на участке траектории № 1 (см. рис. 11). Это объясняется тем, что первый, корректируя значения траектории по результатам измерения, высчитывает ускорение, присутствующее у летательного аппарата два измерения назад. Это, конечно, накладывает свой отпечаток на траекторию. Для устранения этого фактора следует увеличить частоту измерений.

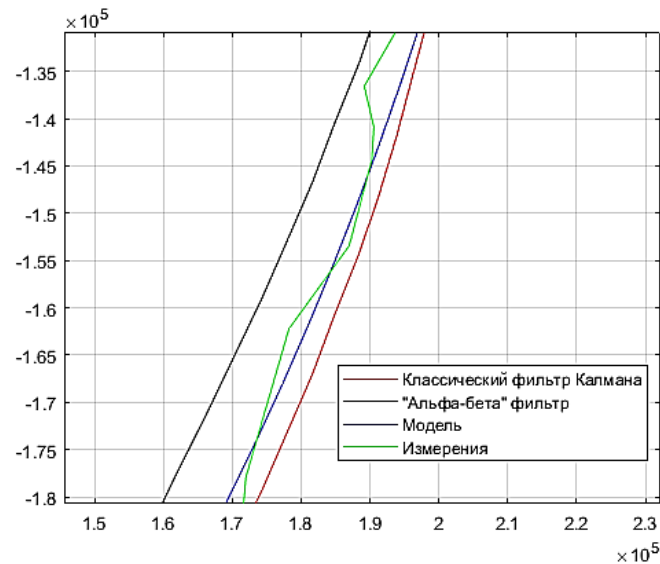


Рис. 8. Участок траектории № 3 (сравнение алгоритмов классического фильтра Калмана и фильтра «альфа-бета»)

Также видно, что на участке № 3, где также совершается маневр, но по кругу большего радиуса, расширенный фильтр ведет себя более стабильно. Следовательно, возможности установления маневра данного фильтра так же, как и классического, ограничены. Хотя, очевидно, они шире.

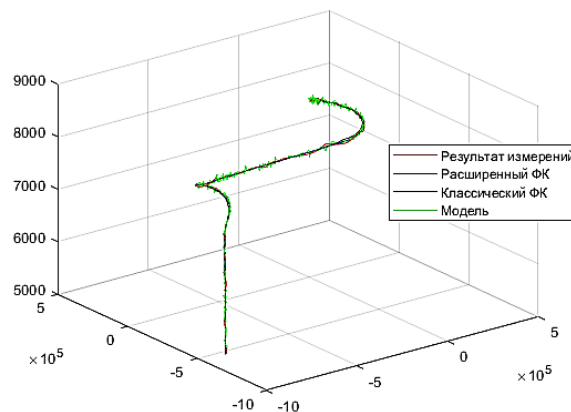


Рис. 9. Результаты эксперимента, в котором сравниваются классический фильтр Калмана и расширенный

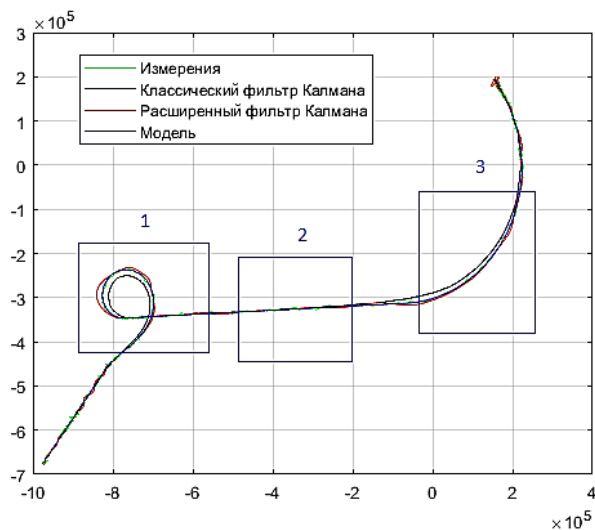


Рис. 10. Результаты эксперимента, в котором сравниваются классический фильтр Калмана и расширенный, вид сверху

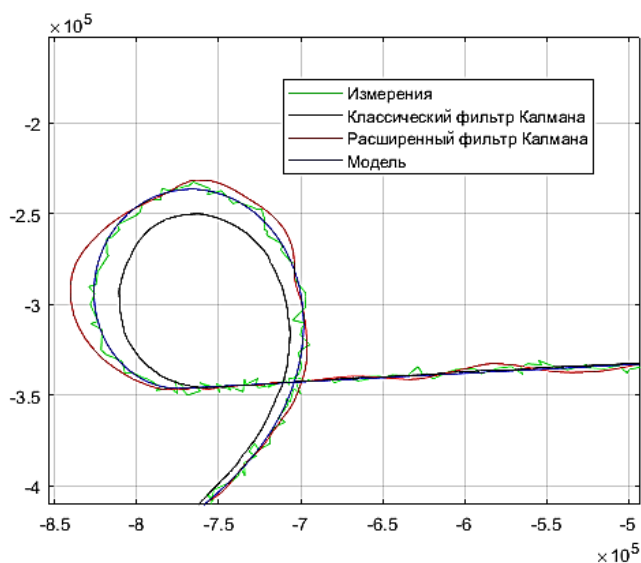


Рис. 11. Участок траектории № 1 (сравнение алгоритмов классического фильтра Калмана и расширенного)

Заключение. По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Классический алгоритм фильтра Калмана и его упрощенная версия — фильтр «альфа-бета» — показывают приблизительно одинаковый результат. На линейных участках траектории целесообразно применение фильтра «альфа-бета», причем значения коэффициентов можно экспериментально устанавливать посредством алгоритма классического фильтра Калмана.

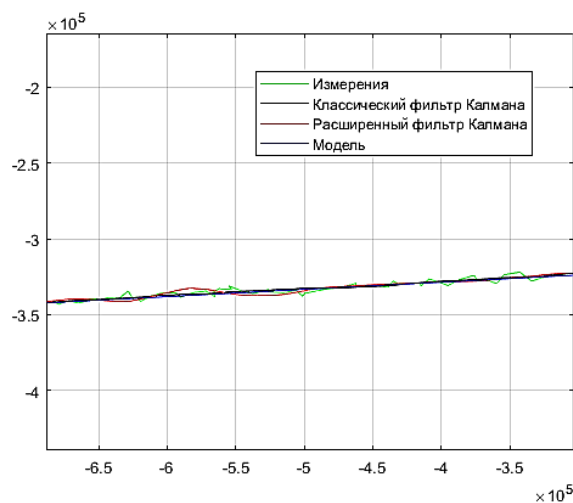


Рис. 12. Участок траектории № 2 (сравнение алгоритмов классического фильтра Калмана и расширенного)

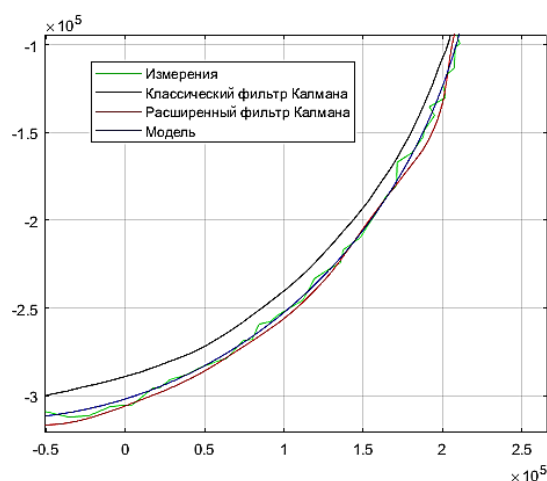


Рис. 13. Участок траектории № 1 (сравнение алгоритмов классического фильтра Калмана и расширенного)

2. Наилучшей чувствительностью к маневрам цели обладает расширенный фильтр Калмана, но и его возможности ограничены, поскольку данный фильтр не является нелинейным, а только линеаризованным, и использует для корректировки значения, полученные несколько отсчетов назад, что ухудшает качество корректировки.

Литература

- [1] Панасюк Ю.Н., Пудовкин А.П. *Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах*. Тамбов, Изд-во ТГТУ, 2016, 84 с.
- [2] Черваков В.О., Богданов А.В., Жиронкин С.Б. Научно-методический аппарат синтеза оптимальных алгоритмов отождествления измерений векторов состояния по-

- движных объектов различными системами наблюдения на основе теории фильтрации дискретно-непрерывных марковских случайных процессов. *Инженерный вестник*, 2016, № 3. URL: <http://engsi.ru/doc/834362.html>.
- [3] Кузьмин С.З. *Цифровая радиолокация. Введение в теорию*. Киев, Квіт, 2000, 428 с.
- [4] Жиронкин С.Б., Черваков В.О. *Применение статистических методов в авиационных радиолокационных комплексах*. LAP Lambert, 2012, 104 с.
- [5] Федоров И.Б., ред. *Информационные технологии в радиотехнических системах*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 846 с.
- [6] Шахтарин Б.И. *Фильтры Винера и Калмана*. Москва, Горячая линия-Телеком, 2016, 396 с.
- [7] Шахтарин Б.И., Сучков В.Б., Губанов Д.А. *Оптимальная фильтрация случайных процессов*. Москва, Горячая линия-Телеком, 2018, 90 с.
- [8] Blair W.D. *Fixed-gain two-stage estimators for tracking maneuvering targets*. Naval Surface Warfare Center, 1992, 68 p.
- [9] Нгуен Чонг Лыу. *Исследование алгоритмов сопровождения воздушных целей*. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, МАИ, 2004, 114 с.
- [10] Зюзин А.В., Туров В.Е., Белобородов А.В., Зинова В.В. Модель движения воздушного объекта в условиях априорной неопределенности относительно времени начала и интенсивности маневра. *Актуальные вопросы развития вооружения, военной и специальной техники войск противовоздушной и противоракетной обороны, космических войск воздушно-космических сил. Мат. науч.-метод. тр. всеросс. науч.-практ. конф.*, 2017, с. 216–222.

Зинова Василисса Владимировна — студентка кафедры «Технология машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Черваков Владимир Олегович, кандидат технических наук, профессор Военного института МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF FILTERING ALGORITHMS USED IN THE SECONDARY PROCESSING OF RADAR INFORMATION

V.V. Zinova

zinova.vasilissa@mail.ru

SPIN-code: 4129-9250

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article provides a brief overview of the filtering algorithms used in the secondary processing of radar information in radar systems. To do this, simulation is performed, consisting of two stages. At the first stage, the mathematical model of the aircraft is built, and on the second stage, an experiment is carried out. During the experiment, three filtering algorithms are synthesized: the classic Kalman filter, the advanced Kalman filter, and the alpha-beta filter. The relationship between them and the principal differences is established. In the end, the conclusions in the form of recommendations on the feasibility and appropriateness of the application of the listed filtering algorithms in various air conditions are made.

Keywords

Classic Kalman filter, alpha-beta filter, advanced Kalman filter, secondary processing, filtering algorithm, trajectory processing, dynamic system, simulation modeling, criterion of optimality, motion model

Received 07.06.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P. Obrabotka radiolokatsionnoy informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh [Radiolocation information processing in radiotechnical systems]. Tambov, TSTU publ., 2016, 84 p.
- [2] Chervakov V.O., Bogdanov A.V., Zhironkin S.B. Science-methodical apparatus for synthesis of optimum measurement identification algorithms for state vectors of moving objects by means of different tracking systems based on filtration theory of discrete-continuous Markov processes. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2016, no. 3. Available at: <http://engsi.ru/doc/834362.html>.
- [3] Kuz'min S.Z. Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu [Digital radiolocation. Theory introduction]. Kiev, Kvits publ., 2000, 428 p.
- [4] Zhironkin S.B., Chervakov V.O. Primenenie statisticheskikh metodov v aviatsionnykh radiolokatsionnykh kompleksakh [Application of statistical methods in aircraft radiolocation complexes]. LAP Lambert publ., 2012, 104 p.
- [5] Fedorov I.B., ed. Informatsionnye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh [Information technologies in radio-technical systems]. Moscow, Bauman MSTU publ., 2011, 846 p.
- [6] Shakhtarin B.I. Fil'try Vinera i Kalmana [Viner and Kalman filters]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom publ., 2016, 396 p.
- [7] Shakhtarin B.I., Suchkov V.B., Gubanov D.A. Optimal'naya fil'tratsiya sluchaynykh protsessov [Optimum filtration of random processes]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom publ., 2018, 90 p.
- [8] Blair W.D. Fixed-gain two-stage estimators for tracking maneuvering targets. Naval Surface Warfare Center, 1992, 68 p.

- [9] Nguen Chong Lyu. Issledovanie algoritmov soprovzhdeniya vozdushnykh tseley. Diss. kand. tekhn. nauk [Research on air target tracking algorithms. Kand. Tech. sci. diss.]. Moscow, MAI publ., 2004, 114 p.
- [10] Zyuzin A.V., Turov V.E., Beloborodov A.V., Zinova V.V. Model' dvizheniya vozdušnogo ob"ekta v usloviyakh apriornoy neopredelennosti otnositel'no vremeni nachala i intensivnosti manevra [Aircraft object motion model in conditions of prior uncertainty to starting time and manoeuvre intensity]. *Aktual'nye voprosy razvitiya vooruzheniya, voennoy i spetsial'noy tekhniki voysk protivovozdušnoy i protivoraketnoy oborony, kosmicheskikh voysk vozdušno-kosmicheskikh sil. Mat. nauch.-metod. tr. vseross. nauch.-prakt. konf.* [Actual questions of developing weapon, military and special purpose equipment of air and missile defense troops, and space forces. Proc. Russ. Sci.-Pract. Conf.]. 2017, pp. 216–222.

Zinova V.V. — Bachelor's Degree student, Department of Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — V.O. Chervakov, Cand. Sc. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.