

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА В ЗАДАЧАХ ТРЕКИНГА ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

М.Б. Пименова

pimenovamb@student.bmstu.ru
SPIN-код: 6575-7056

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

Аннотация

Рассмотрен алгоритм захвата и последующего сопровождения воздушного объекта на съемке с использованием фильтра Калмана. Данный алгоритм позволяет отслеживать объект, перемещающийся в пределах сцены по заранее неизвестной траектории, а также благодаря встроенной системе прогноз/коррекция дает возможность предсказывать местоположение объекта в последующий момент времени. Разработка эффективных алгоритмов применения фильтра Калмана в задачах трекинга движущихся объектов является одним из основополагающих направлений в области компьютерного зрения. Алгоритм, рассматриваемый в данной работе, выделяет на сцене искомый объект, выводит текущую траекторию летательного аппарата, адаптируется к возможному маневру объекта в произвольный момент времени или к его пропаданию с последующим появлением на сцене. Визуализируется синтезированная траектория движения воздушного объекта. Для повышения быстродействия алгоритма имеется возможность настройки параметров детектирования и порога сегментации изображений. Результаты экспериментов подтверждают эффективность использования фильтра Калмана в задачах восстановления траектории объекта, перекрывающейся объектами переднего плана сцены.

Ключевые слова

Фильтр Калмана, обработка кадров видеопоследовательности, трекинг объектов, сегментация изображений, машинное зрение, видеопоток, захват объекта

Поступила в редакцию 18.10.2019
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. Под трекингом (от англ. *Tracking* — слежение) понимают определение текущего положения перемещающегося в пространстве объекта во времени на основе оптического потока. Алгоритмы трекинга позволяют анализировать видеозапись и фиксировать координаты объекта относительно текущего кадра.

Задача трекинга движущихся объектов на видеопоследовательности нашла свое применение во многих прикладных областях, к примеру, в системах видеонаблюдения для идентификации людей или мониторинга транспортных средств, множественного трекинга пешеходов, отслеживания дорожного трафика, в робототехнике и т. д. За последнее время было предложено множество

различных подходов к решению задач отслеживания объектов на видео, среди них особенно выделяют использование фильтра частиц [1], метода Виолы – Джонса [2], а также фильтра Калмана. Последний широко применяется в задачах локализации и навигации мобильных роботов [3], в спутниковых радионавигационных системах [4], а также для оценивания параметров макроэкономических моделей [5]. Для достижения эффективности и ускорения работы алгоритма отслеживания и прогнозирования траектории фильтр Калмана использует текущее положение объекта в кадре для предсказания его положения на следующем кадре. В процессе работы программы последовательно получаемые с камеры кадры направляются в среду MATLAB для последующего применения алгоритмов обработки изображений.

Математическое описание фильтра Калмана. Фильтр Калмана — эффективный рекурсивный фильтр, позволяющий дооценивать вектор состояния динамической системы, используя ряд неполных и зашумленных последовательных измерений для формирования оптимальной оценки состояния. Фильтр назван в честь известного венгерского математика Рудольфа Э. Калмана.

Математическую модель динамической системы принято записывать в матричном виде:

$$\begin{aligned}x_k &= A_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k, \\z_k &= H_k x_k + v_k,\end{aligned}\tag{1}$$

где A_k — матрица размером $n \times n$, описывающая изменения состояния системы при переходе из состояния $k-1$ в k при отсутствии управляющего воздействия (матрица собственной динамики системы); B_k — матрица размером $n \times l$, описывающая влияние управляющего воздействия на изменение состояния при переходе из $k-1$ в k ; l — размерность управляющего воздействия; H_k — матрица размером $c \times n$, описывающая процесс преобразования состояния x_k в состояние z_k ; c — размерность вектора наблюдения; w_k и v_k представляют собой нормально распределенный шум при измерении состояния с матрицами ковариации Q_k , R_k соответственно.

Работа алгоритма основана на последовательном повторении двух фаз:

- 1) экстраполяция (предсказание) состояния динамической системы в последующий момент времени и вычисление погрешности ковариации;
- 2) коррекция полученного в первой фазе с некоторой погрешностью значения вследствие введения коэффициента усиления Калмана в процесс получения текущего значения измеряемой величины.

Подход, лежащий в основе использования фильтра Калмана, называют распознаванием на основе отслеживания. Он предоставляет широкие возможности для применения данного алгоритма в различных прикладных задачах, поскольку позволяет учитывать всю информацию, полученную в ходе отслеживания, а не только данные с предыдущего кадра.

Вычисление состояний системы осуществляется рекурсивно, благодаря такой итеративной работе данный алгоритм можно использовать для отслеживания перемещающегося объекта в режиме реального времени. Пошаговая схема работы рекурсивного фильтра Калмана приведена на рис. 1.

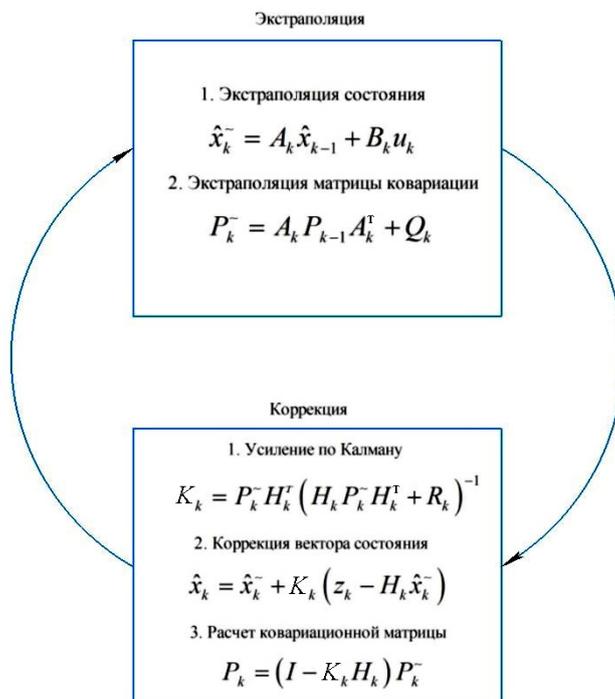


Рис.1. Схема двух этапов алгоритма, использующего в своей основе принцип работы фильтра Калмана

При сопровождении объектов на видео необходимо обрабатывать большое количество потоковых данных, что затратно с вычислительной точки зрения, а значит, и с точки зрения затрачиваемого на обработку времени. Эту проблему решают путем предварительной обработки кадров видеопоследовательности, повышения эффективности сегментации, настройки частоты кадров съемки. В качестве детектора в данной работе использовали алгоритм цветовой сегментации с последующей бинаризацией изображения.

Сегментация изображений. Для предварительной обработки видеопоследовательности применяют процедуры перевода кадров из полноцветных в полутоновые изображения, повышения резкости и контрастности. Но для целей трекинга особенно актуальной является задача сегментации для выделения объекта, в частности, выбор наиболее подходящего порогового значения.

Сегментация — это процесс разделения цифрового изображения на несколько множеств пикселей, или присвоения каждому пикселю таких меток, чтобы пиксели с одинаковыми метками имели общие визуальные характеристики [6]. Назначение сегментации заключается в упрощении представления

изображения для последующего анализа. В результате сегментации обычно выделяют границы, либо объекты на изображениях. Пиксели, принадлежащие одной сегментной области изображения, имеют общие характеристики, к примеру, яркость или цвет, а пиксели соседних областей существенно отличаются от них (рис. 2).



Рис. 2. Исходное (а) и сегментированное (б) изображения

Необходимым условием работы алгоритма является статичность сцены и камеры, что позволяет эффективно отделить объект от фона.

Обнаружение пятен (*blob detection*) — метод сегментации изображений на области, отличающиеся друг от друга по определенным признакам, к примеру, по цвету или интенсивности, от окружающего фона [7, 8]. Метод обнаружения пятен предоставляет также информацию о площади, центроидах, местоположении, границах этих областей и т. д. Для того чтобы алгоритм можно было использовать в данной конкретной задаче с максимальной эффективностью, необходимо предварительно настроить размер «блоб»-детектора и количество фреймов для обучения и значение порога, по которому будет проводиться сегментация кадров.

Использование детекторов зачастую приводит к возникновению различных по своей природе ошибок, таких как отнесение элементов фона к отслеживаемым объектам, ложное детектирование, игнорирование объектов малого размера. Наличие шумов также может стать причиной некорректной работы алгоритма построения траекторий объекта.

Проблема окклюзии. При трекинге объектов в видеопоследовательности распространена так называемая проблема окклюзии — наложения или затенения наблюдаемого объекта. При классической работе алгоритма фазы прогноз/коррекция чередуются, т. е. предсказание происходит относительно результатов корректировки с прошлой итерации, а корректировка уточняет результат фазы экстраполяции. Однако в некоторых случаях фаза коррекции может быть пропущена, и предсказание будет происходить на основе неуточненной оценки [9]. Такая ситуация возникает, если в какой-то промежуток времени информация о положении объекта на данном шаге отсутствует.

Алгоритм должен адаптироваться к возможному маневру летательного аппарата в случайный момент времени или к его исчезновению из зоны видимости. Пропадание объекта переводит фильтр в режим прогноза траектории. После выхода из зоны затенения искаженная траектория объекта уточняется посредством сравнения с текущими измерениями. В контексте рассматриваемой задачи окклюзия чаще всего возникает из-за перекрытия облачным покровом, а при съемке с неудачных ракурсов — деревьями и зданиями.

Алгоритм трекинга, реализованный в данной работе. Для захвата объекта интереса на съемки с видеокамеры необходимо решать проблему выделения объекта на статичном или слабо меняющемся фоне с последующим слежением за выделенным объектом. Кроме того, эти задачи должны решаться в реальном времени.

Исходными данными для работы программы может быть как заранее записанный видеофайл, так и видеопоток, транслируемый в пространство MATLAB в режиме реального времени с веб-камеры или подключенного внешним образом записывающего устройства. В экспериментах под видеопотоком понимали последовательность цифровых изображений (кадров), поступающих с видеокамеры и имеющих разрешение 528 на 358 пикселей.

Для отслеживания движущихся объектов недостаточно просто выделять их на каждом кадре, необходимо следить за перемещением каждого, т. е. для каждого объекта в текущем кадре сопоставлять объект из предыдущего кадра и определять его смещение. В качестве основных параметров объекта выбраны координаты центра сегментированного объекта интереса и параметры детектора, «следящего» за объектом. На каждом кадре определяется центр масс фигуры, аппроксимирующей движущийся объект, и осуществляется поиск/предсказание положения ближайшего центра масс объекта на следующем кадре. Такой подход дает удовлетворительные результаты в случае перемещения объекта со скоростью, близкой к постоянной. Кроме того, смещение объекта на соседних кадрах должно быть достаточно мало.

Если объект обнаружен, фильтр Калмана сначала предсказывает его состояние в следующем кадре. Затем фильтр использует вновь обнаруженное местоположение для исправления состояния, создавая отфильтрованное местоположение. Если объект отсутствует, фильтр Калмана полагается исключительно на его предыдущее состояние, чтобы предсказать текущее местоположение объекта [10].

Моделирование и анализ результатов. Состояние системы определяется положением центра масс летательного аппарата и направлением вектора скорости. Модель, рассматриваемая в данной работе, линейна, управляющее воздействие отсутствует.

Моделировались траектории следующих воздушных целей: квадрокоптера, вертолета и самолета. Съемку проводили с помощью статичной камеры на открытом пространстве с естественным освещением. Для начала работы алгоритма отслеживания требуется инициализировать первоначальную область слежения и выделить интересующий объект.

Пример работы фильтра Калмана приведен на рис. 3, где продемонстрирована реальная (отслеживаемая) траектория летательного аппарата (квадрокоптера) и прогнозируемые положения аппарата. Синие кружки показывают настоящее положение объекта в разные отсчеты времени, а зеленые звездочки — предсказанное положение.

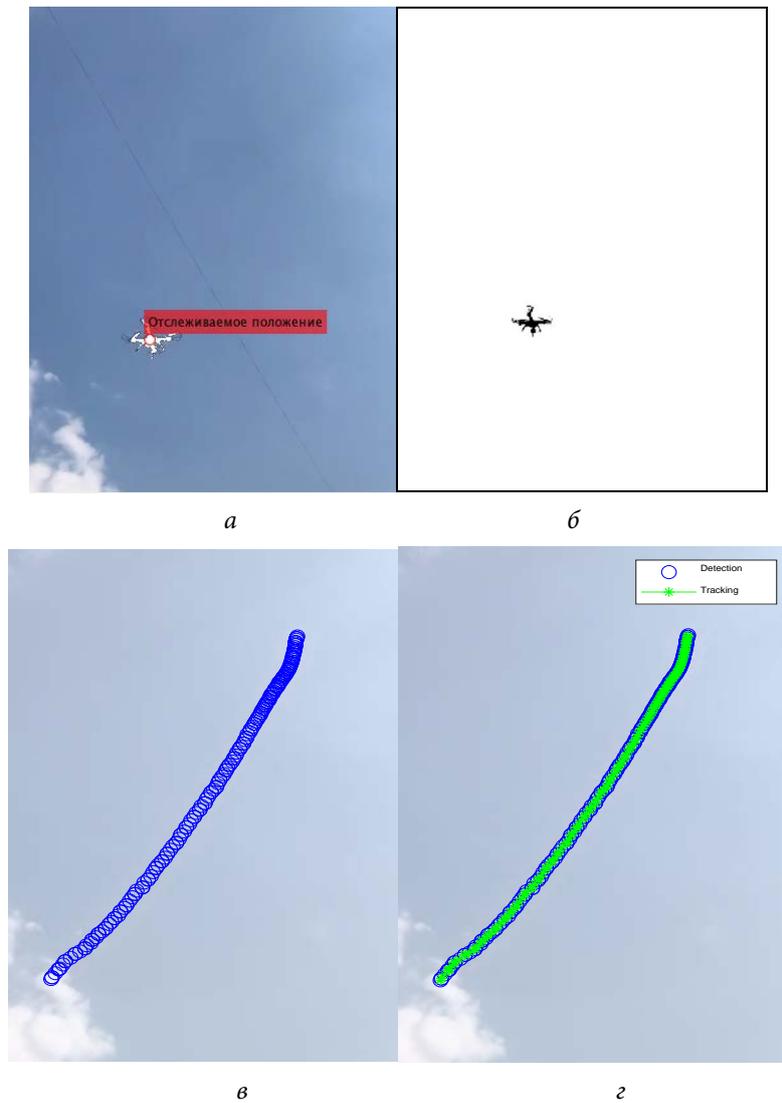


Рис. 3.Пример работы фильтра Калмана:

a — кадр, полученный с исходной съемки; *б* — результат сегментации;
в — отслеживаемое положение квадрокоптера; *г*— предсказываемые и корректируемые положения квадрокоптера

Траектория движения, экстраполированная фильтром Калмана, визуализирована на рис. 4. На записи представлен движущийся с постоянной скоростью летательный аппарат (самолет), скрывающийся за облачным покровом.

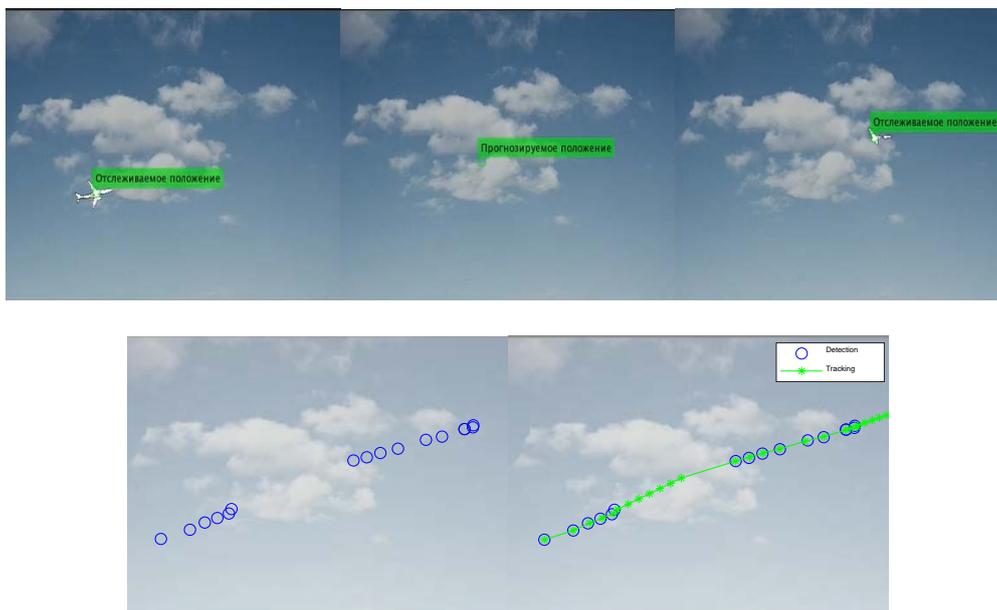


Рис. 4. Отслеживаемые и прогнозируемые положения ЛА и соответствующие траектории движения

Анализ результатов проведенных экспериментов свидетельствует о достоверном отслеживании местоположения объекта в видимой части сцены и достаточно точном прогнозировании поведения объекта в скрытой препятствием области.

В дальнейших исследованиях возможно использование методов SIFT [11] и SURF [12] совместно с фильтром Калмана, что позволит охарактеризовать отслеживаемые объекты набором характерных признаков. В перспективе это повысит точность обнаружения объектов и позволит избежать ошибок в случае взаимной окклюзии нескольких движущихся объектов. Расширенный фильтр Калмана играет существенную роль в реализации алгоритмов оценки координат и навигационных параметров скоростной маневрирующей воздушной цели [13].

Выводы и перспективы применения. В данной работе для отслеживания движущихся объектов применены алгоритмы сегментации фона, метод выделения и трекинга воздушных объектов с помощью фильтра Калмана. Выполнен обзор решения проблемы окклюзии наблюдаемого объекта. Алгоритм использован для обработки видеопотока, получаемого с камеры на открытом пространстве с естественным освещением. В результате проведенных экспериментов установлено, что фильтр хорошо справляется с перекрытиями объекта и быстро корректирует местоположение после повторного появления объекта на сцене. Кроме того, расфокусировка и частичное размытие изображений не влияют на качество работы алгоритма. Неоспоримым достоинством фильтра Калмана является устойчивость к несильным окклюзиям и инвариантность определения перемещающегося объекта. Успешное обнаружение объекта в кадре во многом достигается благодаря правильному выбору значения порога сегмента-

ции. Тем не менее данный алгоритм обладает рядом существенных ограничений: объект должен быть отличен от общего фона сцены, его форма и размеры не должны претерпевать значительных трансформаций в процессе отслеживания, сцена и ракурс съемки должны оставаться неподвижными во избежание помех в работе алгоритма.

В качестве путей дальнейшего улучшения работы алгоритма могут быть предложены следующие направления и модификации: введение системы стабилизации видео; удаление теней и коррекция освещенности; включение в вектор состояния таких параметров, как форма и размеры отслеживаемого объекта; сочетание принципа распознавания эталонного объекта с одним из методов, инвариантных к проективным преобразованиям (например, с методом SURF, работающим с совокупностью значимых признаков объекта) с трекингом распознанного объекта в видеопотоке по найденным ключевым точкам. Модифицированный в результате совместного использования двух методик алгоритм позволит объединить преимущества этих подходов для обработки видеопотока с нечеткими и затененными объектами. Его можно также будет адаптировать для устойчивого мультиобъектного трекинга в условиях динамически изменяющегося фона и ракурса съемки.

Литература

- [1] Мокшин В.В., Кирпичников А.П., Шарнин Л.М. Отслеживание объектов в видеопотоке по значимым признакам на основе фильтрации частиц. *Вестник Казанского технологического университета*, 2013, № 18, с. 298–303.
- [2] Viola P., Jones M.J. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *IEEE CVPR*, 2001, vol. 1, pp. 511–518. DOI: 10.1109/CVPR.2001.990517 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/990517>
- [3] Забегаев А.Н., Павловский В.Е. Адаптация фильтра Калмана для использования с локальной и глобальной системой навигации. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, 2010, № 82.
- [4] Мороз А.Н., Хмарский П.А., Шабан С.А. и др. Сопоставительный анализ ансцентного и расширенного фильтров Калмана при вторичной обработке информации в спутниковых радионавигационных системах. *Доклады БГУИР*, 2014, № 4(82), с. 66–72.
- [5] Поршаков А.С., Пономаренко А.А., Синяков А.А. Оценка и прогнозирование ВВП России с помощью динамической факторной модели. *Журнал Новой экономической ассоциации*, 2016, № 2(30), с. 60–76. DOI: 10.31737/2221-2264-2016-30-2-3 URL: <http://www.econorus.org/repec/journal/2016-30-60-76r.pdf>
- [6] Волосатова Т.М., Яблоков В.Е. Слежение за выделенными объектами на протяжении видеоряда. *Инженерный вестник*, 2015, № 7. URL: <http://engsi.ru/doc/789966.html>
- [7] Kaspers A. Blob detection. Image Science Institute, UMC Utrecht, Tech. Rep., 2011.
- [8] Bochem A., Herpens R., Kent K.B. Hardware acceleration of blob detection for image processing. *3rd Int. Conf. Advances in Circuits, Electronics and Micro-Electronics*, 2010, pp. 28–33. DOI: 10.1109/CENICS.2010.12 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5558171>

- [9] Агафонов В.Ю., Розалиев В.Л., Заболеева-Зотова А.В. Использование фильтра Калмана в задачах трекинга объектов. *Интеллектуальные системы. Теория и приложения*, 2016, т. 20, № 4, с. 13–17.
- [10] Захарова М.В., Шмигельский Г., Григорьев В.В. Исследование алгоритмов технического зрения для систем пространственного слежения в типовых режимах их функционирования. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2018, т. 18, № 3, с. 487–492.
- [11] Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vis.*, 2004, vol. 60, no. 2, pp. 91–110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94 URL: <https://link.springer.com/article/10.1023%2FB%3AVISI.0000029664.99615.94>
- [12] Дышлюк В.О. Исследование показателей качества и быстродействия поиска опорных точек на изображениях методом SURF. *Молодой ученый*, 2018, № 27, с. 23–26.
- [13] Попов Ю.Б., Машаров К.В. Оценка координат воздушного объекта в многопозиционной РЛС с использованием фильтра Калмана. *Доклады ТУСУР*, 2011, № 1(23), с. 22–28.

Пименова Мария Борисовна — студентка кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Пименова М.Б. Применение фильтра Калмана в задачах трекинга воздушных объектов. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 12(41). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-12-557>

APPLICATION OF THE KALMAN FILTER IN TRACKING PROBLEMS OF AIR OBJECTS

M.B. Pimenova

pimenovamb@student.bmstu.ru

SPIN-code: 6575-7056

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The algorithm is considered of capturing and subsequent tracking of an air object in the survey using the Kalman filter. This algorithm allows you to track an object moving within the scene along a previously unknown path, also thanks to the built-in forecast/correction system, it makes it possible to predict the location of the object at a subsequent point in time. The development of effective algorithms for applying the Kalman filter in tracking tasks of moving objects is one of the fundamental directions in the field of computer vision. The algorithm considered in this paper selects the desired object on the scene, displays the current trajectory of the aircraft, adapts to the possible maneuver of the object at an arbitrary point in time or to its disappearance with the subsequent appearance on the scene. The synthesized trajectory of the air object movement is visualized. To increase the speed of the algorithm, it is possible to configure the detection parameters and the threshold for image segmentation. The results of the experiments confirm the effectiveness of using the Kalman filter in the tasks of restoring the trajectory of an object overlapping by objects of the foreground of the scene.

Keywords

Kalman filter, video sequence frame processing, object tracking, image segmentation, machine vision, video stream, object capture

Received 18.10.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Mokshin V.V., Kirpichnikov A.P., Sharnin L.M. Object tracking in video stream by significant features based on particles filtration. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, no. 18, pp. 298–303 (in Russ.).
- [2] Viola P., Jones M.J. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *IEEE CVPR*, 2001, vol. 1, pp. 511–518. DOI: 10.1109/CVPR.2001.990517 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/990517>
- [3] Zabegaev A.N., Pavlovskiy V.E. Kalman filter adaptation for use with local and global navigation system. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha [KIAM Preprint]*, 2010, no. 82 (in Russ.).
- [4] Moroz A.N., Khmarskiy P.A., Shaban S.A., et al. The comparative analysis of unscented and extended Kalman filterS for global positioning systems receiver data processing. *Doklady BGUIR*, 2014, no. 4(82), pp. 66–72 (in Russ.).
- [5] Porshakov A.S, Ponomarenko A.A., Sinyakov A.A. Assessment and forecasting of Russian GDP by means of dynamic factor model. *Zhurnal Novoy ekonomicheskoy assotsiatsii*, 2016, no. 2(30), pp. 60–76. DOI: 10.31737/2221-2264-2016-30-2-3 URL: <http://www.econorus.org/repec/journal/2016-30-60-76r.pdf> (in Russ.).

- [6] Volosatova T.M., Yablokov V.E. Tracking of selected object through the video sequence. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2015, no. 7. URL: <http://engsi.ru/doc/789966.html> (in Russ.).
- [7] Kaspers A. Blob detection. Image Science Institute, UMC Utrecht, Tech. Rep., 2011.
- [8] Bochem A., Herpers R., Kent K.B. Hardware acceleration of blob detection for image processing. *3rd Int. Conf. Advances in Circuits, Electronics and Micro-Electronics*, 2010, pp. 28–33. DOI: 10.1109/CENICS.2010.12 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5558171>
- [9] Agafonov V.Yu., Rozaliev V.L., Zaboleeva-Zotova A.V. Using of the Kalman filter in problems of object tracking. *Intellektual'nye sistemy. Teoriya i prilozheniya*, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 13–17 (in Russ.).
- [10] Zakharova M.V., Shmigel'skiy G., Grigor'yev V.V. Study of computer vision algorithms for space tracking systems in typical modes of their functioning. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 487–492 (in Russ.).
- [11] Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vis.*, 2004, vol. 60, no. 2, pp. 91–110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94 URL: <https://link.springer.com/article/10.1023%2FB%3AVISI.0000029664.99615.94>
- [12] Dyshlyuk V.O. Study on quality figures and speed of datum point search at the images by SURF method. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2018, no.27, pp. 23–26 (in Russ.).
- [13] Popov Yu.B., Masharov K.V. The estimation of the coordinates of an aerial object in multi-station radars with the usage of Kalman filter. *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], 2011, no. 1(23), pp. 22–28 (in Russ.).

Pimenova M.B. — Student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Pimenova M.B. Application of the Kalman filter in tracking problems of air objects. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 12(41). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-12-557.html> (in Russ.).