



Ссылка на статью:

// Ученые записки УлГУ. Серия Математика и информационные технологии. 2024, № 1, с. 22-27.

Поступила: 13.03.2024

Окончательный вариант: 25.03.2024

© УлГУ

УДК 681.5.015.44

## Программа для адаптивного оценивания траектории движения объекта на плоскости по показаниям внешних сенсоров

Калянов А.А.

[Andre756@yandex.ru](mailto:Andre756@yandex.ru)

Ульяновский государственный университет, Россия

---

В статье демонстрируется программное решение по адаптивному оцениванию движения объекта на плоскости по внешним сенсорам, позволяющее моделировать различные типы движения объекта и имитировать зашумленность показаний внешних сенсоров. Применение алгоритма адаптивной фильтрации позволяют исследовать степень нивелирования возмущений в условиях внезапного изменения качества показаний с датчиков.

*Ключевые слова:* адаптивное оценивание, мобильная робототехника, моделирование движения, программная фильтрация

---

### Введение

В проектировании мобильных робототехнических систем особое место уделяется средствам навигации в среде ее применения. Исходя из того, какая перед платформой поставлена задача и в каком пространстве будет использована система, перед разработчиком возникает выбор применения тех или иных аппаратных средств и программных комплексов. На данный момент колесную мобильную робототехнику можно поделить на две категории: Outdoor и Indoor [1]. Первая обеспечивает функционирование и решение поставленных задач роботом вне помещения. Чаще всего такие системы опираются на спутниковую навигацию и периферию внешних датчиков и камер. Вторая решает задачи внутри помещения: здания, производственного склада, комнаты и т. п. При этом варианте чаще всего спутниковая навигация становится невозможной из-за перебоев или отсутствия сигнала глобальной системы позиционирования, но за счет ограничения зоны работы малыми площадями зданий, можно применить другие средства навигации, такие как триангуляция,

навигация по меткам (ARUCO-маркеры, сигнальные линии, QR-коды), SLAM-навигация и сочетание предыдущих методов.

Наиболее распространенным способом автономного определения мобильного робота в пространстве внутри здания является SLAM-навигация. Ее применение позволяет решать задачи даже в условиях неопределенности, то есть, когда робототехнической системе заранее неизвестно помещение, в котором необходимо выполнять работу [2]. Особый интерес вызывает то, что данный подход позволяет строить карту местности и определять местоположение робота одновременно. Оценка положения роботизированной системы в пространстве чаще всего реализуется при помощи сочетания нескольких экстериоцептивных датчиков [3]. Сложность заключается в том, что в ходе работы выявляется большая зависимость в точности определения позиционирования платформы от влияния внешних шумов, получаемых с сенсоров робототехнической системы.

Для нивелирования воздействия помех на расчеты траектории движения и позиционирования робототехнической платформы в пространстве применяются различные методы программной фильтрации данных. Одним из наиболее эффективных инструментов решения подобного вида задач является фильтр Калмана. Также стоит отметить, что при наличии препятствий на пути следования мобильной робототехнической системы, шум измерения может превысить номинальные характеристики шума окружающей среды, что в свою очередь приведет к большой погрешности в оценке локализации объекта [4].

## Описание программного решения

Для решения задачи оценивания траектории движения робототехнического объекта была разработана программа на языке MATLAB, предназначенная для моделирования и адаптивного оценивания движения объекта на плоскости по данным, получаемых с внешних сенсоров. Применение данного инструмента позволяет исследовать работу адаптивного алгоритма фильтрации, основанного на расширенном фильтре Калмана. При этом исследовать имитационную модель перемещения объекта можно в трех состояниях: при статическом (отсутствие движения), прямолинейном и круговом движении.

Программа позволяет задавать множество необходимых параметров имитационной модели: координаты внешних статичных сенсоров, тип движения объекта, уровень белого шума, время возникновения и продолжительность действия аномальных помех в измерениях, отображение показаний сенсоров с применением методов фильтрации и без, а также задавать время симуляции (рис. 1).

Представленный вариант симуляции модели позволяет продемонстрировать качество работы алгоритмов оценивания траектории движения объекта при наличии аномального шума в измерениях. Под аномальным шумом в данной работе мы понимаем непредвиденное возрастание уровня помех в измерениях показаний внешних сенсоров. Подобное резкое увеличение амплитуды шума в реальных условиях измерений, по сравнению со стандартными номинальными характеристиками, может наблюдаться при электромагнитном возмущении, наводке помех металлических предметов, резком

изменении освещенности окружающего пространства, задымленности помещения и т. п. При возникновении подобных «нештатных» ситуаций ковариация шума внезапно возрастает, что влечет за собой накопление ошибки в оценке траектории движения объекта [5]. Именно поэтому для эффективной работы фильтра важно отслеживать пороговые диапазоны значений показаний датчиков и программно устранять всплески в измерениях.

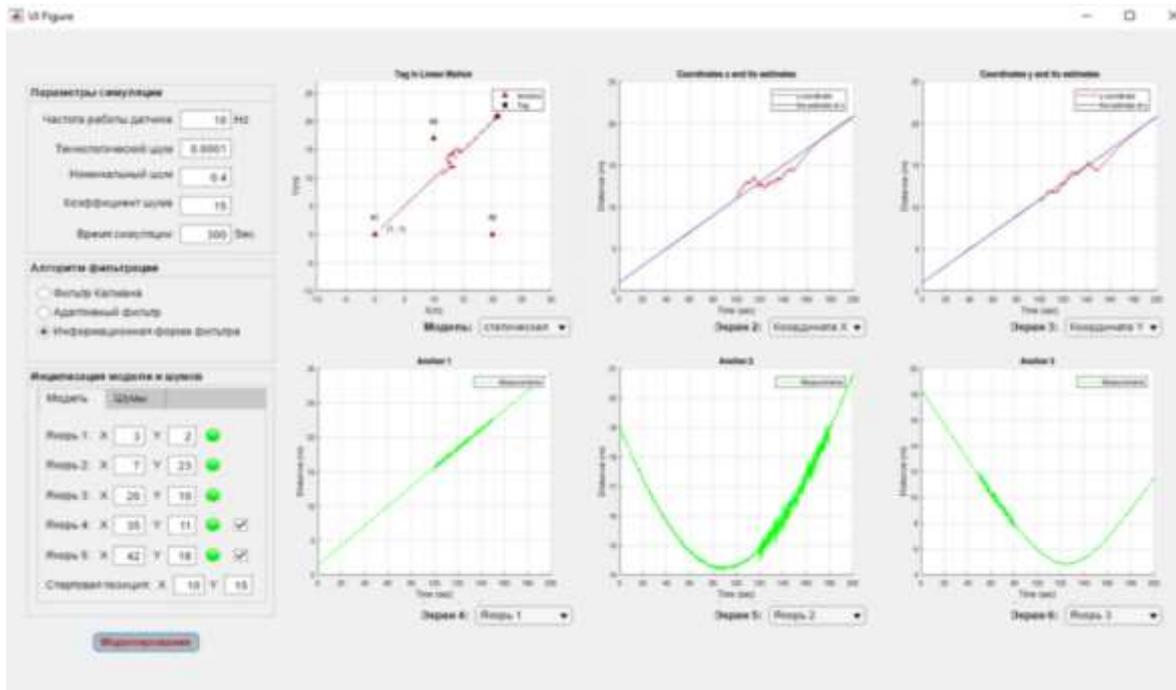


Рис. 1. Интерфейс программы

Рассмотрим результаты оценивания при статическом режиме, т.е. когда объект не движется. В окне отображения траектории движения объекта показана работа алгоритмов Расширенного фильтра Калмана (РФК) и Адаптивного фильтра Калмана (АФК), построенного на основе РФК [4] (см. рис. 2). В левой части изображения отражена траектория движения объекта на основе алгоритма обычного РФК, а в правой части АФК.

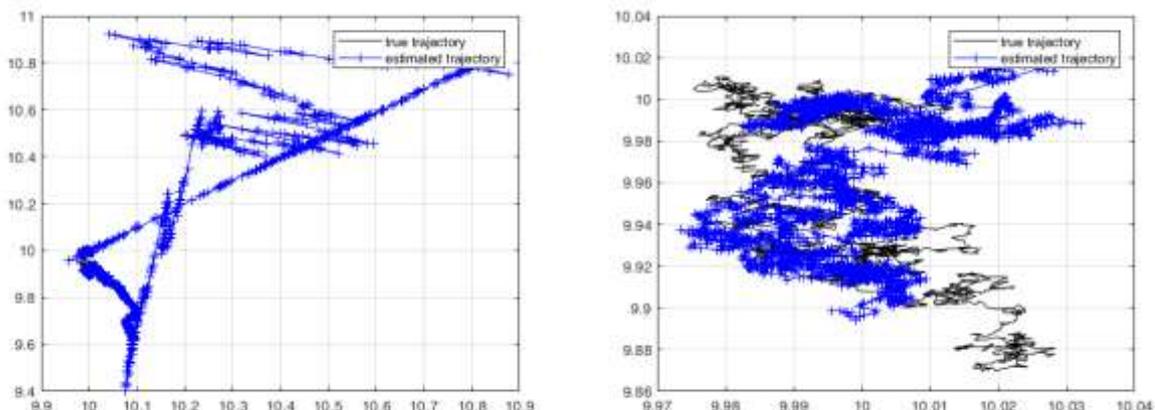


Рис. 2. Графическое отображение траектории движения объекта

На графике черной непрерывной линией отображена реальная траектория движения объекта, а синей линией со штрихами – оценка траектории, рассчитанная двумя алгоритмами фильтрации (РФК и АФК). На левом графике рисунка 2 видно, что оценка траектории объекта, вычисленная с помощью обычного РФК, существенно отличается от реальной и составляет максимальное отклонение в 1 м. Это связано с тем, что алгоритм оценивания траектории движения объекта, основанный на обычном расширенном фильтре Калмана, недостаточно эффективно справляется с задачей фильтрации. В то же время АФК показывает лучший результат с максимальным отклонением от эталонного значения в 0,06 м.

Теперь оценим величину отклонений реального положения объекта по осям  $OX$  и  $OY$ , соответственно. На рис. 3 на левом графике продемонстрирована работа РФК при оценивании проекции траектории вдоль оси  $OX$ , на правом графике – работа АФК.

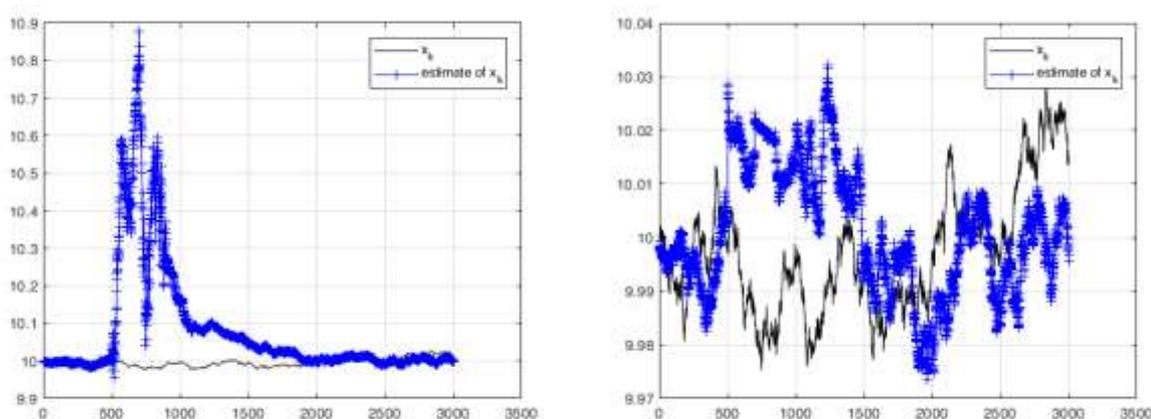


Рис. 3. Графическое отображение показаний по оси  $OX$

Исходя из показаний графиков можно предположить, что оба алгоритма фильтрации справляются со своей задачей, тем не менее, у первого алгоритма в диапазоне 500-1900 выявлены существенные отклонения показаний от эталонных, что свидетельствует о менее низком качестве фильтрации при наличии аномальных измерений. В то же время второй алгоритм работает в штатном режиме.

Рассмотрим ту же ситуацию, но проекции траектории движения вдоль оси  $OY$  (рис. 4). Аналогичная ситуация просматривается при сравнении левого и правого графиков. Оценки координаты  $y$ , вычисленные алгоритмами фильтрации, отличаются так же, как и в предыдущем случае.

Также программа позволяет получить оценки расчета среднеквадратичной ошибки алгоритма (RMSE), позволяющие сделать вывод о качестве исследуемых алгоритмов фильтрации при наличии аномальных измерений. Результаты данного примера представлены в Таблице 1.

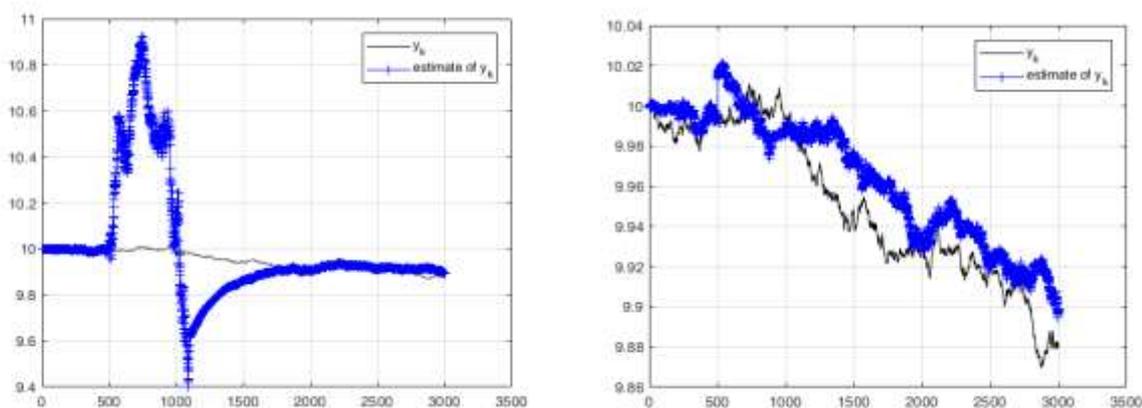


Рис. 4. Графическое отображение показаний по оси ОУ

Таблица 1 – Значения RMSE для обычного и адаптивного фильтров

Алгоритм фильтрации	RMSE( $x$ )	RMSE( $y$ )	nRMSE( $(x,y)^T$ )
Адаптивный фильтр (АФК)	0.0183	0.0195	0.0268
“Обычный” расширенный фильтр Калмана (РФК)	0.1773	0.2407	0.2990

Согласно графическим и численным данным, можно сделать вывод о том, что качество решения задачи оценивания траектории движения объекта в условиях аномальных показаний сенсоров для мобильной платформы в статическом состоянии с помощью алгоритма АФК на порядок выше, чем с помощью обычного РФК. Таким образом, по результатам имитационного моделирования алгоритм АФК можно рекомендовать к применению на практике.

## Заключение

Разработанная программа для имитационного моделирования и адаптивного оценивания движения объекта на плоскости по внешним сенсорам позволяет моделировать работу датчиков при непредвиденном возникновении аномального шума в измерениях, а также с достаточной точностью определять положение мобильной робототехнической системы в двумерном пространстве.

Результаты работы могут быть применены при поиске оптимального алгоритма обработки информации данных с сенсоров робототехнической платформы в условиях внезапного изменения качества показаний с внешних датчиков.

## Список литературы

1. Pedrosa E., Reis L., Silva C., Ferreira H. Autonomous Navigation with Simultaneous Localization and Mapping in/outdoor // *Porto: FEUP*, 2020. p. 75.

2. Geng J., Xia L., Wu D. Attitude and Heading Estimation for Indoor Positioning Based on the Adaptive Cubature Kalman Filter // *Micromachines*. 2021, v. 12, no. 1, p. 79.
3. Labbé M., Michaud F. RTAB-Map as an Open-Source Lidar and Visual SLAM Library for Large-Scale and Long-Term Online Operation // *Journal of Field Robotics*. 2019, 35(2), p. 416–446.
4. Калянов А.А., Лукин О.В., Цыганова Ю.В. Об алгоритме адаптивной фильтрации параметров движения объекта // *Автоматизация процессов управления*. 2023, №1 (71), с. 75-87.
5. Akhlaghi S., Zhou N., Huang Z. Adaptive Adjustment of Noise Covariance in Kalman Filter for Dynamic State Estimation // *Proceedings of the 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2017, p. 1-5.

## **A program for adaptive estimation of the trajectory of an object on a plane, based on readings from external sensors**

***Kalyanov, A.A.***

[andre756@yandex.ru](mailto:andre756@yandex.ru)

Ulyanovsk State University, Russia

The paper demonstrates a software solution for the adaptive estimation of object movement on a plane, using external sensors, allowing for the simulation of various types of object movement and simulating the noise level of the external sensors. The use of an adaptive filtering algorithm allows for investigation of the degree of disturbance leveling in conditions of abrupt changes in the quality of readings from the sensors.

**Keywords:** adaptive estimation, mobile robotics, motion modeling, software filtering