

# Особенности алгоритма комплексирования информации полетного контроллера БВС

Д.А. Ворон

Самарский национальный  
исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
vorokh.da@ssau.ru

Д.Н. Овакимян

Самарский национальный  
исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
ovakimyan.dn@ssau.ru

В.С. Кириллов

Самарский национальный  
исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
kiriev.v.s.1@ssau.ru

**Аннотация —** В материале приводится теоритический анализ применения различных реализаций фильтра Калмана при построении полетного контроллера беспилотного воздушного судна. Показано, что реализация UKF предпочтительней, нежели использование EKF фильтра. По результатам исследований можно выделить наиболее перспективный метод, позволяющий повысить производительность и точность вычисления системы.

**Ключевые слова —** полётный контроллер, фильтрация, фильтр Калмана, вектор состояния, нелинейные системы.

## I. ВВЕДЕНИЕ

При решении задач дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) при помощи беспилотного воздушного судна (БВС) необходимо четкое выполнение полетного задания, которое, в свою очередь, выполняется полётным контроллером (ПК). При этом одной из важнейших задач ПК БВС является оценка многомерного вектора состояния, который позволяет получить информационные сигналы для исполнительных механизмов БВС и корректировать его курс. В данной работе описывается алгоритм для комплексирования навигационной части данного вектора. Решение этой задачи обычно обеспечивается с помощью нелинейной калмановской фильтрации. Классическим алгоритмом является EKF, в основе которого лежит линеаризация правой части стохастической модели в окрестности оценки его состояния для оценки математического ожидания неизвестного вектора состояния и матрицы ковариации. EKF — один из самых первых алгоритмов, предложенных для решения подобных задач, однако, на сегодняшний день существуют более современные фильтры — сигмочечечный UKF, квадратурный QKF и кубатурный CKF.

Использование вышеназванных фильтров, как правило, дает более точную оценку вектора состояний, чем использование EKF, но при этом вычислительная сложность таких алгоритмов является слишком высокой для ПК БВС. Например, в PX4 UKF не имплементирован из-за ограничений процессора STM32F4 [1]. Предполагается, что в большинстве случаев EKF является достаточным решением, но, если необходимо повышение точности комплексирования информации, возможно использовать UKF.

В данной работе, одной из частей аппаратного обеспечения является вычислительный модуль «Изделие 2», который позволяет использовать для комплексирования навигационной информации ресурсоемкие алгоритмы, что делает актуальным исследование возможности применения одного из известных алгоритмов, например UKF, и возможностей их модификации (Extrapolated Single-Propagation UKF [2]).

## II. ПРИМЕНЕНИЕ EKF ФИЛЬТРА ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПК

Предположим, у нас есть нелинейная система, вектор состояния  $x$  которой описывается в следующей форме:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f[x_k, u_k, v_k, k], \\ z_k &= h[x_k, u_k, k] + w_k. \end{aligned} \quad (1)$$

где:  $x_k$  - вектор состояния системы на временном шаге  $k$ ;  
 $u_k$  - вектор управления, действующий на систему;

$v_k$  - вектор шумового воздействия (ошибка моделирования);  
 $z_k$  - вектор измерений;  
 $w_k$  - шум измерений.

Предполагается, что векторы шумового воздействия имеют гауссово распределение с нулевым средним значением. Как известно, фильтр Калмана применим только для линейных задач. Одним из способов адаптировать этот фильтр к нелинейным задачам является метод локальной линеаризации, которая является основной идеей расширенного фильтра Калмана (EKF).

Пусть  $\delta$  - малое отклонение от значения оцениваемого вектора, тогда:

$$x_{k+1} = \hat{x}_{k+1}^- + \left. \frac{\partial f[x_k, u_k, v_k, k]}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k^-} \delta x_k. \quad (2)$$

где,  $\hat{x}_{k+1}^-$  - оценки вектора состояния на этапе прогноза для соответствующих моментов.

Измерения в таком случае могут быть представлены в следующей форме:

$$z_{k+1} = h[\hat{x}_{k+1}^-] + \left. \frac{\partial h[x_{k+1}^- u_{k+1} v_{k+1} k+1]}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k^-} \delta x_k. \quad (3)$$

Визуально данный метод можно отобразить на рисунке 1.

UKF предлагает абсолютно другой способ применить фильтр Калмана к нелинейным системам.

$$\hat{x}_{k+1}^- = \sum_{i=0}^{2N} w^i \cdot f(X_{k+1}^i) \quad (4)$$

Проводя ряд математических операций, получим окончательные оценки для вектора состояния и матрицы ковариации:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1}^+ &= \hat{x}_{k+1}^- + K_{k+1}(z_{k+1} - \hat{z}_{k+1}), \\ P_{k+1}^+ &= P_{k+1}^- - K_{k+1} S K_{k+1}^T. \end{aligned} \quad (5)$$

где:

$$T_{k+1} = \sum_{i=0}^{2N} \omega^i \left( X_{k+1}^i - \hat{x}_{k+1}^- \right) \left( \zeta_{k+1}^i - \hat{z}_k \right)^T, \quad (6)$$

$$K_{k+1} = T_{k+1} S_{k+1}^{-1}.$$

Визуально данный метод можно отобразить на рисунке 2.

Математические модели указанных фильтров не дают информации о том, как будет различаться скорость решения при одинаковых ресурсах и задачах для разных фильтров. Поэтому остановимся на сравнении их точности и вычислительной сложности, которые важны с практической точки зрения.

Рассмотрим результаты исследования [3], в котором произведено сравнение данных алгоритмов по точности оценки. Чем выше значение  $N$ , тем выше интервал измерений. Можно заметить, что при небольшом интервале измерений, EKF обеспечивает практически такую же точность, как UKF и CKF, однако если интервал измерений увеличивается, то ошибка EKF начинает значительно расти вплоть до выхода за рамки допустимых значений. Этот факт имеет особую значимость для комплексирования навигационной информации летательного аппарата, т.к. один из главных источников информации – датчик глобальной спутниковой навигационной системы может иметь большие интервалы между измерениями.

Превосходство UKF в точности над EKF так же подтверждается исследованием [4].

Все вышеупомянутые исследования оценивали лишь точность алгоритмов, не затрагивая тему ресурсоемкости вычислений. В реальных условиях данный параметр играет важную роль, так как вычислительная мощность на борту БВС зачастую ограничена даже с использованием компьютера компаньона. Поэтому значимым видится исследование [5], в котором было произведено сравнение по этому параметру.

Данные результаты наглядно демонстрируют проблемы UKF с производительностью. Но в тоже время, его модификации SPUKF и ESPUKF могут предложить точность UKF с производительностью близкой к EKF.

Данные модификации UKF были представлены в 2016 году в работе [6]. Перевести их названия можно как UKF только одной итерацией этапа прогнозирования и, соответственно, такой фильтр с экстраполяцией.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После проведенного анализа становится понятно, что применение UKF и EKF фильтров дают вполне хорошие результаты, однако с целью повышения точности вычисления вектора состояний целесообразно применять UKF фильтр. Математический анализ показывает, что EKF фильтр обладает рядом недостатков, а именно, к снижению точности приводит отбрасывание членов выше первого порядка при разложении в ряд Тейлора, а также сама сущность подхода, заключающаяся в построении касательной к гиперплоскости. В результате анализа экспериментальных исследований шести типов

алгоритмов вычисляемых полетным контроллером, показано, что наиболее перспективным методом является ESPUKF, позволяющий повысить производительность системы с 122 мс до 17мс при незначительном ухудшении точность.

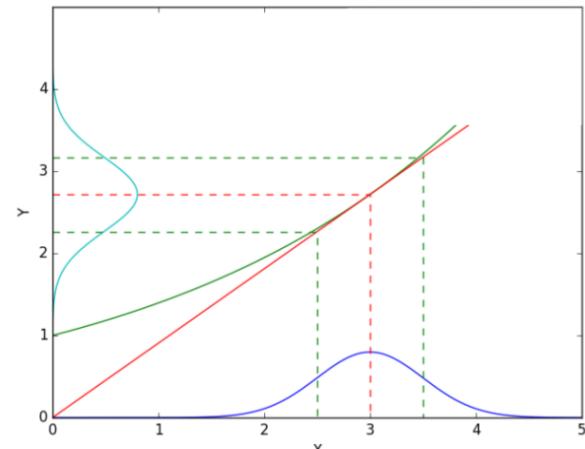


Рис. 1. Проекция распределения значений двумерного вектора при использовании EKF

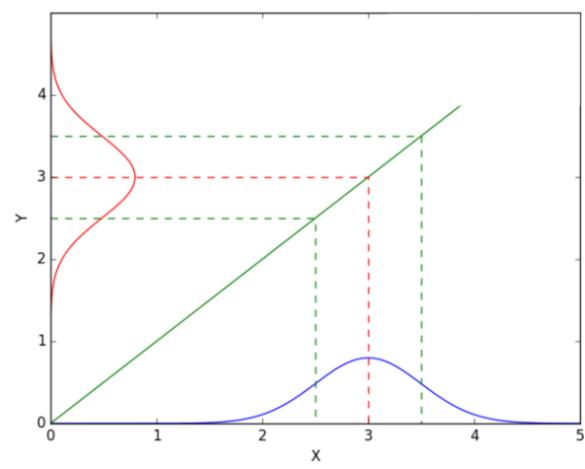


Рис. 2. Проекция распределения значений двумерного вектора при использовании UKF

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Unscented KF vs EKF [Electronic resource]. — Access mode: <https://discuss.ardupilot.org/t/unscented-kf-vs-ekf/27052> (19.06.2022)
- [2] Biswas, S.K., Qiao, L., Dempster, A. G., A Novel a priori State Computation Strategy for the Unscented Kalman Filter to Improve Computational Efficiency / S.K. Biswas, L. Qiao, A. G. Dempster // IEEE Transactions on Automatic Control, 2017. – Vol. 62(4) – P. 1852–1864.
- [3] Шавин, М. Ю. Численные методы нелинейной фильтрации для оценки состояния квадрокоптера с поворотными роторами / М.Ю. Шавин // Труды МФТИ. – 2019, – Т. 11, № 3. – С. 86 – 95.
- [4] EKF vs UKF [Electronic resource]. — Access mode: <https://jgoslinski.medium.com/ekf-vs-ukf-in-terms-of-an-ellipse-of-confidence-b51f6cb02da2> (19.06.2022)
- [5] Biswas, S.K., Southwell, B., Dempster, A.G. Performance analysis of Fast Unscented Kalman Filters for Attitude Determination / S.K. Biswas, B. Southwell, A.G. Dempster // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51(1). – P. 697–701.
- [6] Pilte, M., Bonnabel, S., Barbaresco, F. Drone Tracking Using an Innovative UKF. / M. Pilte, S. Bonnabel, F. Barbaresco // 3<sup>rd</sup> conference on Geometric Science of Information (GSI 2017). – 2017. – Vol. 2. – P. 81–89.