

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ КАЛМАНОВСКОГО ТИПА В ЗАДАЧЕ ГРУППОВОЙ НАВИГАЦИИ АНПА

Кудрявцев Д.Р. (ИТМО), Исаев А.М. (ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Лопарев А.В.

(ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

**Введение.** В последнее время для выполнения масштабных и трудоёмких задач, таких как патрулирование, охрана морских акваторий, поиск и обследование объектов, съёмка физических полей океана активно применяются группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) [1]. Один из подходов, направленных на повышение эффективности решения задачи групповой навигации АНПА заключается в том, что все АНПА, действующие в группе, разделяются на лидеров и ведомых. Лидеры имеют высокоточное навигационное оборудование, а ведомые определяют своё местоположение на основе счисления пути с использованием навигационных датчиков и уточняют его на основе данных о дальностях до лидеров, рассчитываемых с использованием измеряемого гидроакустическим модемом времени распространения сигнала и известной скорости его распространения.

Для комплексной обработки данных в ведомых АНПА используются алгоритмы, построенные в рамках стохастической байесовской теории оценивания исходя из минимизации среднеквадратического критерия [2]. Наиболее распространённый из таких алгоритмов – обобщённый фильтр Калмана (ОФК), простой в вычислительном плане и в ряде случаев позволяющий получить оценку по точности, близкую к оптимальной.

В ряде работ, например, в [3], отмечается тот факт, что погрешности измерения дальностей могут иметь негауссовский характер, в том числе содержать аномальные выбросы. В качестве возможных причин указываются: влияние многолучевого распространения, температуры морской воды, солёности и мутности, отражение и рассеяние звуковых волн при столкновении с морской поверхностью, морским дном и препятствиями. Перечисленные факторы могут стать причиной расходимости алгоритма ОФК. В настоящее время разработан ряд робастных модификаций ОФК [4], направленных на повышение его эффективности при наличии негауссовских погрешностей. Среди таких алгоритмов можно выделить и коррентропийные фильтры [4,5], о которых далее и пойдёт речь.

Цель настоящей работы – на примере решения задачи навигации группы АНПА провести сопоставление ОФК и коррентропийного обобщённого фильтра Калмана (КОФК) в случае как гауссовых, так и негауссовых погрешностей измерений, содержащих помехи импульсного типа.

**Решение задачи навигации группы АНПА.** В работе рассматривается задача навигации группы из трёх АНПА. Два АНПА являются лидерами и имеют на своём борту высокоточное навигационное оборудование, позволяющее безошибочно определять их координаты в дискретные моменты времени. Третий же АНПА – ведомый. Счисление его пути осуществляется по показаниям компаса (измерителя курса) и двухкомпонентного гидроакустического лага (измерителя скорости в продольном и поперечном направлении). В дискретные моменты времени ведомым АНПА проводятся измерения дальностей до двух лидеров и при этом требуется определить его координаты. Для простоты считается, что вся измерительная аппаратура лидеров и ведомого синхронизирована в соответствии с единой шкалой времени, а глубины всех АНПА за время решения задачи считаются известными и не меняются.

При решении задачи используются ОФК и КОФК, имеющие единую структуру, соответствующую алгоритмам калмановского типа и включающую блок прогноза и блок коррекции. Оба алгоритма используют гауссовскую аппроксимацию апостериорной плотности для вектора оцениваемых параметров на каждом шаге, а оценка, вырабатываемая в них, представляет собой сумму некоторого априорного значения и коэффициента усиления, умноженного на вычисленную тем или иным способом невязку измерения [2]. Основное же отличие алгоритмов заключается в следующем: в ОФК коэффициент усиления находится исходя из условия минимизации среднеквадратического критерия [2], тогда как в КОФК

исходя из максимизации критерия коррентропии (статистической меры близости между двумя случайными величинами) [4].

Задача решалась для двух случаев погрешностей измерений дальностей: в первом случае они задавались как дискретные гауссовские центрированные белые шумы, а во втором – формировались аналогично, однако содержали аномальные выбросы (3% выбранных случайным образом реализаций погрешностей измерений формировались с увеличенным в 10 раз среднеквадратическим отклонением). Сопоставление алгоритмов проводилось с точки зрения точности, состоятельности и вычислительно сложности с использованием методики, описанной в работе [6].

**Выводы.** Для решения задачи навигации группы из трёх АНПА предложен коррентропийный обобщённый фильтр Калмана. Проведено его сопоставление с классическим обобщённым фильтром Калмана как в случае гауссовых, так и негауссовых погрешностей измерений, содержащих выбросы импульсного типа. Результаты сопоставления показали, что в случае отсутствия импульсных помех, точности ОФК и КОФК сопоставимы и близки к точности алгоритма, направленного на получение оптимальной оценки. При этом как ОФК, так и КОФК состоятельны. При наличии же помех импульсного типа в погрешностях измерений точность и состоятельность ОФК существенно снижается, тогда как точность коррентропийного фильтра при близка к потенциальной и при этом он состоятелен на всём временном интервале решения задачи фильтрации. Сопоставление вычислительной сложности показало, что КОФК затратнее в вычислительном плане, чем ОФК на 35%.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00626, <https://rscf.ru/project/23-19-00626/>.*

#### **Список использованных источников:**

1. Ю.В. Ваулин, Ф.С. Дубровин, Д.А. Щербатюк, А.Ф. Щербатюк. О методах обеспечения навигации групп АНПА. Краткий обзор. Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 27-36.
2. Степанов О.А. Методы обработки навигационной измерительной информации. СПб., 2017. 196 с.
3. Y. Zhao et al. A collaborative control framework with multi-leaders for AUVs based on unscented particle filter J. Frankl. Inst., 2016
4. Чубич В.М., Филиппова Е.В. Исследование эффективности некоторых робастных фильтров для нестационарных линейных непрерывно-дискретных систем. Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 12 (часть 1) – С. 153-161
5. Chen B., Liu X., Zhao H., Principe J. Maximum correntropy Kalman filter. Automatica. 2017. Vol. 76. P. 70 –77.
6. О.А. Степанов, А.С. Исаев. Методика сравнительного анализа рекуррентных алгоритмов нелинейных фильтрации в задачах обработки навигационной информации на основе предсказательного моделирования. // Гироскопия и навигация. Том 31. №3 (122), 2023. С. 48-65. EDN: MVWKGC