

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_04_XX

EDN: MNNLDM

УДК 629.5.01

Оценка основной частоты волнения для безэкипажного скоростного катера

А.С. Коренев^{1,2}, Д.И. Кузнецов¹, Д.Р. Морозов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия;

² Ситроникс КТ, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Активное развитие автономного судовождения на маломерных судах выявляет новую проблему управления. Высокая маневренность катеров определяет их широкую полосу пропускания, превышающую верхнюю границу спектра волнения. В результате разделить полезный сигнал управления и помеху от волнения с помощью методов классической частотной фильтрации довольно трудно. Это приводит к двум ключевым негативным эффектам: снижению точности движения катера по заданной траектории и снижению ресурса исполнительных механизмов движительно-рулевого комплекса, в следствии их постоянной работы на компенсацию волнового возмущения. Таким образом, требуется алгоритм, способный в реальном времени оценивать основную кажущуюся частоту волнения, что необходимо для эффективного разделения управляющего сигнала и волновой помехи.

Цель — разработать метод, позволяющий проводить оценку основной кажущейся частоты волнения, действующего на безэкипажный скоростной катер.

Методы. Нелинейная идентификация с помощью расширенного фильтра Калмана.

Результаты. Предложена математическая модель, на основе которой синтезирован расширенный фильтр Калмана, обеспечивающий оценку пиковой частоты волнения по измерениям угловой скорости рысканья безэкипажного скоростного катера.

Выводы. Синтезированный расширенный фильтр Калмана эффективно отслеживает значение пиковой кажущейся частоты волнения, действующей на корпус катера.

Ключевые слова: основная частота волнения; фильтр Калмана; расширенный фильтр Калмана; модель Номото.

Как цитировать:

Коренев А.С., Кузнецов Д.И., Морозов Д.Р. Оценка основной частоты волнения для безэкипажного скоростного катера // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 4. С. X. DOI: 10.52899/24141437_2025_04_XX EDN: MNNLDM

Рукопись получена: 13.11.2025

Рукопись одобрена: 17.11.2025

Опубликована online: 03.12.2025

Estimation of the main wave frequency for a crewless speedboat

Aleksey S. Korenev^{1,2}, Denis I. Kuznetsov¹, Denis R. Morozov¹

¹ Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia;

² Sitronics KT, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

Background. The active development of autonomous navigation on small vessels reveals a new problem of control. The high maneuverability of boats determines their wide bandwidth, exceeding the upper limit of the wave spectrum. As a result, it is quite difficult to separate the useful control signal and interference from the wave using classical frequency filtering methods. This leads to two key negative effects: a decrease in the accuracy of the boat's movement along a given trajectory and a decrease in the resource of the actuators of the propulsion and steering complex caused by attempts by the control system to compensate for the wave disturbance. Thus, an algorithm is required that can estimate in real time the main apparent frequency of the disturbance, which will allow to separate the signal caused by the disturbance from the control signal.

Aim — to develop a method that allows estimating the main apparent frequency of the wave acting on an unmanned boat.

Methods. Nonlinear identification using the extended Kalman filter.

Results. A mathematical model is proposed, on the basis of which an extended Kalman filter is synthesized, providing an estimation of the peak frequency of the wave based on the measurements of the boat's yaw rate.

Conclusions. The synthesized extended Kalman filter effectively tracks the value of the peak apparent frequency of the wave acting on the boat's hull.

Keywords: fundamental frequency of the wave; Kalman filter; extended Kalman filter; Nomoto model.

To cite this article:

Korenev AS, Kuznetsov DI, Morozov DR. Estimation of the main wave frequency
for a crewless speedboat. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine
Technical University*. 2025; 4(4):X-XX. DOI: 10.52899/24141437_2025_04_XX
EDN: MNNLDM

Submitted: 13.11.2025

Accepted: 17.11.2025

Published online: 03.12.2025

Accepted for publication

ВВЕДЕНИЕ

Движение морской поверхности представляет собой трехмерный случайный процесс. Волновое воздействие на корпус катера вызывает возмущающие силы и моменты, оказывающие влияние на его движение в пространстве. Указанный процесс по каждой координате (координаты и углы в пространстве) может быть представлен в виде двух составляющих: медленно меняющейся, приводящей к дрейфу координат, и осциллирующей, вызывающей колебания координат с частотой волнения. Таким образом, система управления движением катера должна компенсировать низкочастотную составляющую (волновой дрейф) и фильтровать высокочастотную составляющую, приводящую к нежелательным колебаниям исполнительных механизмов. В данной статье основное внимание уделяется анализу влияния волновых колебаний на курс как одного из наиболее критичных аспектов движения безэкипажного катера.

Высокая маневренность катера определяет его широкую полосу пропускания, превышающую верхнюю границу спектра волнения. Кроме того, волнение действует на катер с кажущейся частотой, которая в свою очередь зависит от скорости катера и направления встречи с волной [1]. Вследствие этого применение фильтров низких частот и полосовых фильтров для исключения высокочастотной составляющей волнения невозможно. Альтернативным решением является использование фильтра Калмана с математической моделью волнения [2, 3]. Данный фильтр демонстрирует высокую эффективность при подавлении высокочастотной волновой составляющей, однако его применение сопряжено со сложностью настройки, требующей знания параметров упрощенной математической модели судна, интенсивности внешних возмущений и значения основной частоты волнения.

Для идентификации параметров математической модели по курсу можно использовать классический подход [4] или альтернативные методы [5]. Вопросам адаптации параметров фильтра, связанных с интенсивностью внешних возмущений, посвящены работы [6–8]. В то же время методы определения основной частоты волнения, предложенные в [1–3, 9], неприменимы, поскольку они предполагают предварительную фильтрацию волновой составляющей и последующий анализ

полученной очищенной выборки. В рассматриваемой задаче выделение репрезентативной выборки, обусловленной исключительно волнением, является труднореализуемой процедурой. Таким образом, существует необходимость в разработке метода, позволяющего оценивать основную частоту волнения непосредственно по сигналу, содержащему смесь данных от волновых возмущений и системы управления.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При синтезе системы управления устойчивого на курсе катера используют модели Номото первого и второго порядков [2]. В режиме стабилизации курса при небольших углах перекладки руля достаточно использовать модель Номото первого порядка. Далее мы будем рассматривать модель Номото первого порядка, которая представлена ниже:

$$T\dot{\omega}(t) + \omega(t) = K\delta(t), \quad (1)$$

где $\omega(t)$ — угловая скорость циркуляции; $\delta(t)$ — угол перекладки пера руля; T — постоянная времени; K — коэффициент усиления.

С учетом математической модели волнения, представленной в [2, 3], и уравнения (1) сформируем систему дифференциальных уравнений для оценки основной частоты волнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_w(t) = \varphi_w(t) \\ \omega_w(t) = -\omega_0^2 \xi_w(t) - 2\lambda\omega_0 \varphi_w(t) \\ \dot{\varphi} = \omega \\ \dot{\omega} = -\frac{1}{T}\omega(t) + \frac{K}{T}\delta(t) \end{array} \right., \quad (2)$$

где ω_0 — основная частота волнения; $\omega_w(t)$ — угловая скорость, вызванная волнением; $\varphi_w(t)$ — угол рысканья, вызванного волнением; $\xi_w(t)$ — интеграл от рысканья, вызванного волнением; $\lambda \approx 0.1$ — коэффициент демпфирования [2].

Измеряемой величиной является угловая скорость. Уравнение измерений записывается в виде:

$$y(t) = \omega(t) + \omega_w(t) + v(t), \quad (3)$$

где $y(t)$ — измеряемый сигнал с датчика; $v(t)$ — шум измерений.

Требуется синтезировать фильтр, который на основе математической модели (2) и результатов измерений (3) осуществляет оценку основной частоты волнения.

СИНТЕЗ РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Система уравнений (2) является нелинейной, что исключает возможность применения линейного фильтра Калмана и обуславливает необходимость использования его расширенной версии в следующем виде [2]:

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + Bu(t) + Gw(t); \quad (4)$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t), \quad (5)$$

где $x(t)$ — вектор состояния; $u(t) = \delta(t)$ — вектор управления; $f(x, t)$ — функция состояния системы; B, C, G — матрицы управления, измерения и внешних возмущений соответственно.

Оценка вектора состояния для нелинейной системы (4) может быть выполнена с помощью расширенного дискретного фильтра Калмана. В данной работе не приводится полное описание алгоритма данного фильтра, поскольку оно детально изложено в [2]. Для реализации расширенного дискретного фильтра Калмана, приведенного в [2], достаточно задать структуру матриц, входящих в уравнения (4) и (5), которые будут иметь следующий вид:

$$B = (0, 0, 0, \frac{K}{T}, 0)^T;$$

$$C = (1, 1, 0, 1, 0);$$

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\frac{\partial f(x, t)}{\partial x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0^2 & -2\lambda\omega_0 & 0 & 0 & -2\omega_0\xi_w - 2\lambda\varphi_w \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

В рассматриваемом случае ковариация ошибки измерений R является скаляром. Ее значение определяется техническими характеристиками применяемого датчика угловой скорости.

Матрица ковариации внешних возмущений Q подлежит настройке, для выполнения которой могут быть применены алгоритмы адаптации, приведенные в работах [6–8].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАБОТЫ ФИЛЬТРА

Проверка работы предложенного фильтра проводилась в два этапа: с помощью имитационного моделирования и проведения испытаний на территории Приморской учебно-научной базы СПбГМТУ на безэкипажном катере «Странник», разработанном компанией «Ситроникс КТ» [10].

Имитационное моделирование работы фильтра проводилось на основе модели Номото первого порядка с параметрами $K = 1,2$ и $T = 0,8$, соответствующими безэкипажному катеру «Странник» при скорости 10 км/ч. Внешнее возмущение задавалось в виде гармонического волнения с номинальной частотой 1,2 рад/с, модулированной по частоте в диапазоне от 1,0 до 1,4 рад/с. Фильтр обеспечил оценку кажущейся частоты волнения с запаздыванием. Результаты моделирования работы фильтра представлены на рис. 1. Сплошной линией показана заданная частота волнения, а прерывистой линией — оценка частоты, полученная с фильтра.

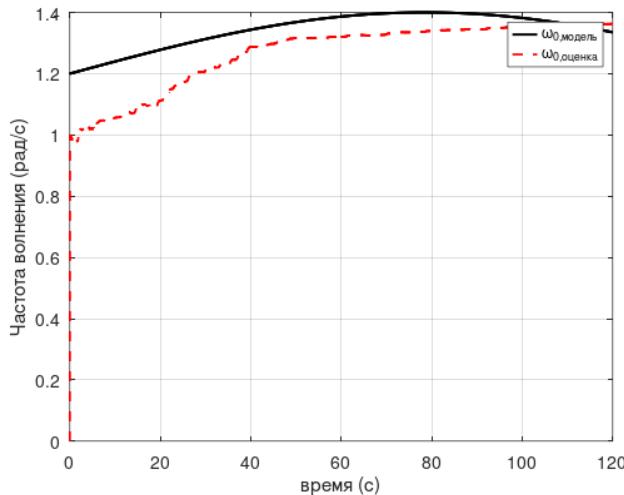


Рис. 1. Имитационное моделирование работы фильтра.

Fig. 1. Simulation of the filter operation.

Испытания фильтра проводились на безэкипажном катере «Странник». Параметры K и T определялись алгоритмом, описанным в [5]. С целью проверки корректности работы фильтра был установлен курс, обеспечивающий боковое направление волнения относительно катера. Выбор данного курса обусловлен тем, что при таком взаимном расположении кажущаяся частота волнения численно равна его основной частоте.

В ходе испытаний интенсивность волнения составляла 3–4 балла по шкале ГУГМС-53. Согласно данным работы [11], основная частота волнения при таких условиях находится в диапазоне 1,25–1,5 рад/с. Результаты работы фильтра в реальных условиях представлены на рис. 2.

После запуска фильтр был инициализирован начальным значением частоты 1,5 рад/с. Через 30 с работы фильтр сошелся к оценке 1,15 рад/с, затем его показания варьировались в диапазоне от 1,05 до 1,15 рад/с.

Расхождение с частотой 1,25 рад/с связано главным образом с трудностью обеспечения строго бортового направления волнения относительно катера. Вследствие этого фильтр оценивает кажущуюся частоту волнения, значение которой близко к расчетному.

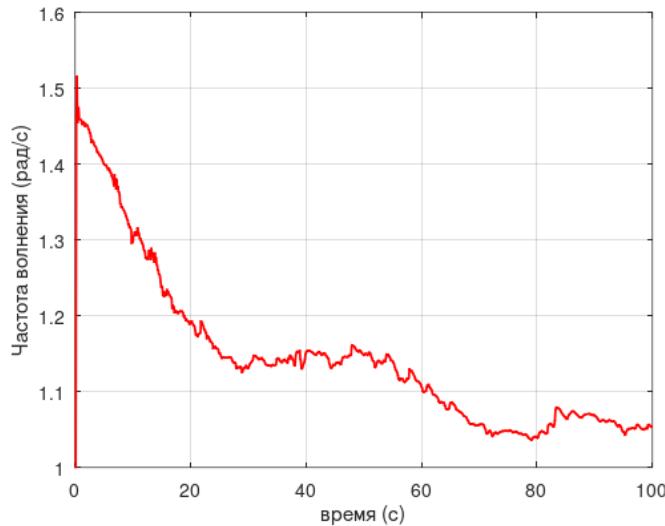


Рис. 2. Проверка работы фильтра в реальных условиях.

Fig. 2. Checking the operation of the filter in real conditions.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение предложенного фильтра позволило оценить кажущуюся частоту волнения, воздействующую на скоростной катер. Благодаря этому из данных угловой скорости циркуляции была исключена гармоническая составляющая волнения. Это предотвратило ее прохождение в регулятор и, как следствие, повысило точность удержания заданного курса.

Наличие запаздывания оценки ограничивает применение фильтра режимом стабилизации курса. В ходе маневрирования целесообразно переходить на использование зафиксированного последнего значения оценки частоты волнения.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.С. Коренев — проводил исследования использования фильтра Калмана с математической моделью волнения, участвовал в экспериментальной проверке работы фильтра; Д.И. Кузнецов — принимал участие в организации экспериментальных исследований, и активное участие в подготовке статьи; Д.Р. Морозов — принимал активное участие в натурных

экспериментах проверки работы фильтра, принимал участие в оформлении статьи. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции оценки основной частоты волнения для безэкипажного скоростного катера и подготовку статьи. Авторы одобрили версию для публикации, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой ее части.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (комерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре.

ADDITIONAL INFO

Authors' contribution. A.S. Korenev — conducted research on the use of the Kalman filter with a mathematical model of perturbation, participated in the experimental verification of the filter; D.I. Kuznetsov — participated in the organization of experimental research, and actively participated in the preparation of the article; D.R. Morozov — took an active part in field experiments testing the

filter, participated in the design of the article. All the authors have made a significant contribution to the development of the concept of estimating the basic frequency of waves for a crewless speedboat and the preparation of the article. All the authors approved the version of the draft to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality. In preparing this work, the authors did not use previously published material (text, illustrations, or data).

Generative AI. Generative AI technologies were not used in the preparation of this article.

Provenance and peer-review: This work was submitted to the journal on the authors' own initiative and processed under the standard procedure.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Амбросовский В.М., Коренев А.С., Лукомский Ю.А., Шпекторов А.Г. Координированное управление морскими подвижными объектами. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016.
2. Fossen T. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. New York: John Wiley & Sons, 2011.
3. Коренев А.С., Хабаров С.П. Фильтрация волновых возмущений, действующих на объект управления. В кн.: Информационные системы и технологии: теория и практика : Сборник научных трудов. Т. 15. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2023. С. 91–97. EDN RMEWDF
4. Nomoto K. Analysis of Kempf's standard maneuver test and proposed steering quality indices. Proceedings of 1st Symposium on Ship Maneuverability, 1960
5. Патент РФ № 2828164 / 07.10.2024. Коренев А.С., Хабаров С.П. Способ настройки системы управления судном по курсу. EDN HFEWUW
6. Амбросовский В.М., Хабаров С.П., Коренев А.С. адаптивный фильтр Калмана к внешним возмущениям. В кн.: Информационные системы и технологии: теория и практика : Сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 29 января 2015 г. Т. 7. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2015. С. 5–10. EDN VKJVOJ
7. Барабанов А.Е. Линейная фильтрация с адаптивной подстройкой матриц ковариаций возмущений в объекте и шумов измерения // Автоматика и телемеханика. 2016. № 1. С. 30–49. EDN VWWUFJ
8. Амбросовский В.М., Коренев А.С., Хабаров С.П. Отказоустойчивый адаптивный к внешним возмущениям фильтр Калмана // Морская радиоэлектроника. 2015. № 3(53). С. 20–23. EDN UYCGWF
9. Yuan J., An S., Pan X., et al. A Wave Peak Frequency Tracking Method Based on Two-Stage Recursive Extended Least Squares Identification Algorithm // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 86514–86522. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3057454

EDN: CZRANE

10. Ситроникс и Корабелка повысили точность движения безэкипажных катеров: пресс-релиз. СПб.: СПбГМТУ, 2025. [internet] Дата обращения: 09.11.2025. Режим доступа: <https://www.smtu.ru/ru/viewnews/1581/>
11. Колызаев Б.А., Косоруков А.И., Литвиненко В.А., Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Судостроение, 1980.

REFERENCES

1. Ambrosovskii VM, Korenev AS, Lukomskii YuA, Shpektorov AG. Coordinated Control of Marine Mobile Objects. St. Petersburg: Izd-vo SPbGETU "LETI"; 2016. (In Russ.)
2. Fossen T. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. New York: John Wiley & Sons; 2011.
3. Korenev AS, Khabarov SP. Filtering of wave disturbances acting on a control object. In: *Information Systems and Technologies: Theory and Practice: Collection of Scientific Works*. Vol. 15. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet imeni S.M. Kirova; 2023:91–97. (In Russ.) EDN: RMEWDF
4. Nomoto K. Analysis of Kempf's standard maneuver test and proposed steering quality indices. In: *Proceedings of 1st Symposium on Ship Maneuverability*; 1960.
5. Russian Patent 2828164. Korenev AS, Khabarov SP. Method for tuning a ship course control system. 2024. (In Russ.) EDN: HFEWUW
6. Ambrosovskii VM, Khabarov SP, Korenev AS. Adaptive Kalman filter for external disturbances. In: *Information Systems and Technologies: Theory and Practice: Collection of Scientific Works*. St. Petersburg, January 29, 2015. Vol. 7. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet im. S.M. Kirova; 2015:5–10. (In Russ.) EDN: VKJVOJ

7. Barabanov AE. Linear filtration with adaptive adjustment of disturbance and measurement noise covariance matrices. *Avtomatika i Telemekhanika*. 2016;(1):30–49. (In Russ.) EDN: VWWUFJ
8. Ambrosovskii VM, Korenev AS, Khabarov SP. Fault-tolerant adaptive Kalman filter for external disturbances. *Morskaia Radioelektronika*. 2015;3(53):20–23. (In Russ.) EDN: UYCGWF
9. Yuan J, An S, Pan X, et al. A Wave Peak Frequency Tracking Method Based on Two-Stage Recursive Extended Least Squares Identification Algorithm. *IEEE Access*. 2021;9:86514-86522. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3057454. EDN: CZRANE
10. Sitroniks and Korabelka improved the motion accuracy of unmanned boats: press release. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet (SPbGMTU); 2025. Accessed November 9, 2025. Available from: <https://www.smtu.ru/ru/viewnews/1581/>
11. Kolyzaev BA, Kosorukov AI, Litvinenko VA. *Handbook for Designing Ships with Dynamic Support Principles*. Leningrad: Sudostroenie; 1980. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

* Коренев Алексей Сергеевич; адрес:
Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул.
Лоцманская, д. 3;
eLibrary SPIN: 2467-4193;
e-mail: alexey.korenev@sironics-kt.ru

Морозов Денис Рудольфович; e-mail:
D.R.Morozov@smtu.ru

AUTHORS INFO

Aleksey S. Korenev; address: 3
Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, Russia,
190121,
eLibrary SPIN: 2467-4193;
e-mail: alexey.korenev@sironics-kt.ru

Denis R. Morozov; e-mail:
D.R.Morozov@smtu.ru

Кузнецов Денис Иванович, д-р. техн.
наук, доцент;
eLibrary SPIN: 5128-0266;
e-mail: D.I.Kuznetsov@smtu.ru

Denis I. Kuznetsov, Dr. Sci. (Engineering),
Associate Professor;
eLibrary SPIN: 5128-0266;
e-mail: D.I.Kuznetsov@smtu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Accepted for publication