

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: [mathmod.esrae.ru/38-139](http://mathmod.esrae.ru/38-139)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Зайцев О.В., Антонов Д.В., Литвиненко Ю.А., Степанов О.А Сравнение двух моделей при решении задачи прогноза качки корабля // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2022. №2

Выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-19-00627, <https://rscf.ru/project/18-19-00627>

УДК 629.123

DOI: 10.24412/2541-9269-2022-2-16-20

## СРАВНЕНИЕ ДВУХ МОДЕЛЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗА КАЧКИ КОРАБЛЯ

Зайцев О.В.<sup>1</sup>, Антонов Д.В.<sup>1</sup>, Литвиненко Ю.А.<sup>1</sup>, Степанов О.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Россия, Санкт-Петербург

## COMPARISON OF TWO MODELS WHEN SOLVING THE PROBLEM OF SHIP ROCKING FORECASTING

Zaitsev O.V.<sup>1</sup>, Antonov D.V.<sup>1</sup>, Litvinenko Y.A.<sup>1</sup>, Stepanov O.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, Concern TsNII Elektropribor, Russia, St. Petersburg

**Аннотация.** Рассматривается задача прогноза качки корабля на основе алгоритма калмановской фильтрации. Проводится сравнение точности прогноза при использовании двух моделей, описывающих качку корабля: узкополосного марковского процесса второго порядка и модели пятого порядка, учитывающей динамические характеристики корабля и случайные ветро-волновые воздействия. С целью выбора параметров рассматриваемых моделей рассчитываются соответствующие им спектральные плотности, которые сравниваются с выборочной спектральной плотностью, полученной по натурным данным. Приводятся и сопоставляются результаты прогноза качки с использованием натурных данных.

Ключевые слова: качка корабля, прогнозирование, алгоритм калмановской фильтрации, ветро-волновые воздействия

**Abstract.** The problem of ship rocking prediction based on the Kalman filtering algorithm is considered. The prediction accuracy is compared using two models describing ship rocking: a second-order narrow-band Markov process and a fifth-order model that takes into account the dynamic characteristics of the ship and random wind-wave effects. In order to select parameters of the models under consideration, spectral densities corresponding to these models are calculated and compared with a sample spectral density obtained from field data. The results of rocking prediction using field data are presented and compared.

Keywords: ship rocking, prediction, Kalman filtering algorithm, wind-wave effects

Алгоритмы прогнозирования качки корабля востребованы в ряде практических задач, таких как: посадка самолета или вертолета на палубу,

снижение эффекта транспортной задержки в системах косвенной стабилизации, задачи наведения и стабилизации различного корабельного оборудования, повышение безопасности погрузочных работ в море и т.д. [1-4]. Один из подходов к решению задачи прогноза основан на использовании марковских моделей для описания качки [5-10]. Так, в [5] показано, что алгоритм прогноза на основе фильтра Калмана (ФК), при описании качки узкополосным марковским процессом второго порядка, демонстрирует слабую чувствительность к наличию ошибок измерений угла качки и при этом не уступает, а в некоторых случаях превосходит по точности алгоритм на основе нейронных сетей. Однако следует отметить, что модель второго порядка является приближенной, поскольку не учитывает параметры корабля и ветровые возмущения. В [9] для описания качки предложено использовать модель 5-го порядка, учитывающую динамические свойства корабля совместно с информацией о возмущениях в виде волнения и ветрового воздействия. В этой связи представляет интерес провести сравнение точности решения задачи прогноза при использовании двух указанных моделей. Этому и посвящена предлагаемая работа.

### 1. Постановка задачи.

Рассмотрим задачу прогноза угла качки на основе применения ФК и будем полагать, что измерению подлежит угол качки в моменты времени

$$y(t) = u(t) + v(t), \quad (1)$$

где  $u(t)$  – угол качки,  $v(t)$  — белозумная гауссовская ошибка измерения известной интенсивности.

Требуется в момент времени  $t$  получить оптимальную в среднеквадратическом смысле оценку прогноза угла качки  $\hat{u}(t + \tau)$  на величину горизонта прогноза  $\tau$  с использованием измерений (1) на интервале  $[t - t_{изм}; t]$ , где  $t$  – время начала прогноза,  $t_{изм}$  – интервал измерения.

Известно, что такая оценка может быть найдена с использованием ФК, вырабатывающего оптимальную оценку угла качки  $\hat{u}^{\Phi K}(t)$  по измерениям (1) на момент времени  $t$ .

В качестве моделей качки рассмотрим: модель 5-го порядка, описанную в [9], учитывающую динамические свойства корабля и ветро-волновые возмущения, и узкополосный марковский процесс 2-го порядка [5-8]. Оценка прогноза при использовании обеих моделей, может быть записана в виде [5]:

$$\hat{u}(t + \tau) = HF(t + \tau)\hat{x}^{\Phi K}(t), \quad (2)$$

где  $F(t + \tau)$ ,  $H$ ,  $\hat{x}^{\Phi K}$  – матрица динамики, матрица измерений и оценка вектора состояния в ФК, соответствующие моделям 2-го или 5-го порядков. Обычно качка описывается первой компонентой  $u(t) = x_1(t)$ .

Суть рассматриваемой в докладе задачи заключается в сравнении

точности прогноза при использовании двух указанных выше моделей, описывающих качку корабля.

## 2. Выбор параметров моделей качки

Для проведения сопоставления точности при использовании моделей 2-го и 5-го порядков необходимо выбрать параметры, конкретизирующие свойства процессов, описываемых с помощью этих моделей. Сделано это было на основе сопоставления соответствующих им спектральных плотностей (СП). СП для узкополосного процесса имеет известный вид, а СП для модели 5-го порядка получена с использованием известного соотношения, связывающего СП на выходе динамической системы со СП на ее входе [10]. Далее параметры СП были выбраны таким образом, чтобы, с одной стороны, дисперсии процессов были одинаковыми, а с другой – так, чтобы графики СП в наибольшей степени совпадали бы со СП, полученной при обработке реальных данных качки корабля. Пример соответствующих графиков СП для процессов 5-го и 2-го порядков и выборочной СП приведены на рисунке 1.

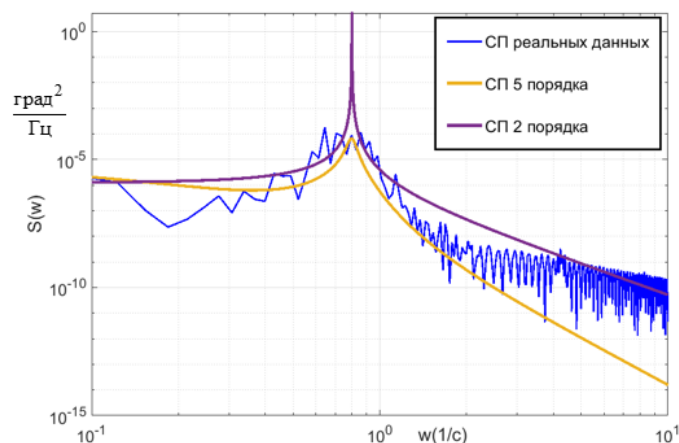


Рис.1. СП процессов 5-го и 2-го порядка и выборочная СП, построенная по реальным данным

## 3. Результаты решения задачи прогноза по реальным данным для двух моделей.

С целью сопоставления результатов прогноза при использовании двух рассматриваемых моделей согласно методике, описанной в [6], были вычислены расчетная и действительная среднеквадратические погрешности (СКП) прогноза. Пример результатов таких вычислений представлен на рис. 2. На графике по оси абсцисс отложено отношение горизонта прогноза  $\tau$  к преобладающему периоду качки (в процентах), задаваемое выражением  $\tau^* = \tau / T_0 \cdot 100\%$ , где  $T_0$  - преобладающий период качки. По оси ординат отложено отношение СКП к априорному СКО качки (в процентах) -  $\sigma^* = \sigma_\tau / \sigma_1 \cdot 100\%$ . В рассматриваемом случае  $T_0 = 10$  с,  $\sigma_1 = 0.2$  град.

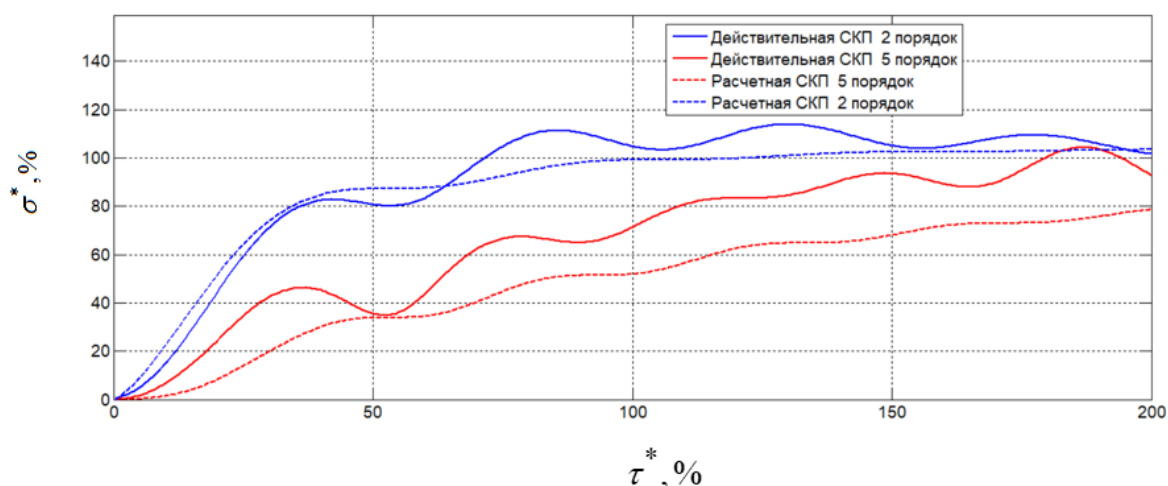


Рис.2. Расчетная и действительная СКП прогноза при использовании модели 5-го и 2-го порядков

Из представленных результатов следует, что при использовании модели пятого порядка, точность прогноза увеличилась по сравнению с использованием модели второго порядка. Выигрыш по точности составляет 50% при горизонте прогноза  $T_0/2$  и на 15% при горизонте прогноза  $T_0$ . Однако следует отметить, что расчетная и действительная СКП для модели второго порядков в большей степени согласованы между собой, чем для модели пятого порядка.

### Заключение.

Проведено сравнение точности прогноза при использовании двух моделей, описывающих качку корабля: узкополосного марковского процесса второго порядка и модели пятого порядка, учитывающей динамические характеристики корабля и случайные ветро-волновые воздействия. Показано, что при обработке реальных данных записей качки при интервале прогнозирования, равном половине периода качки, использование модели пятого порядка позволяет повысить точность на 50% по сравнению с моделью второго порядка. Вместе с тем отмечено заметное отличие действительной и расчетной СКП. Наличие этих отличий может быть вызвано несопадением выбранных (расчетных) параметров модели пятого порядка реальным данным. С целью преодоления этого недостатка в дальнейшем предполагается выбор параметров провести путем решения задачи идентификации модели пятого порядка на основе алгоритма многоальтернативной фильтрации [11].

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 18-19-00627, <https://rscf.ru/project/18-19-00627>.*

### Литература

1. Ривкин С.С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. М.: «Наука», 1978. 320 с.

2. Ruiyang Z., Konstantin N., Maria S. and Andrey P. Pitching Prediction Algorithm for Landing on Aircraft Carrier Deck // 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg. 2020. P. 1-3.
3. Xu C.Z., Zou Z.J. Online prediction of ship roll motion in waves based on auto-moving grid search-least square support vector machine // Math. Probl. Eng. 2021. 2760517.
4. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами. Л.: Судостроение, 1988. 272 с.
5. Антонов Д.В., Зайцев О.В. Анализ чувствительности алгоритмов прогноза качки корабля к параметрам используемых моделей // Материалы XXIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2021.
6. Stepanov O, Litvinenko Yu, Antonov D. Zaitsev O. Adaptive algorithms for vessel roll prediction based on the Bayesian approach // 30th Mediterranean Conference on Control and Automation. Vouliagmeni-Athens, Greece. 2022. P. 713-718
7. Степанов О.А., Антонов Д.В., Зайцев О.В., Моторин А.В. Сопоставление алгоритмов прогноза на основе байесовского и нейросетевого подходов при обработке навигационной информации / Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации». 2021. С. 97-98.
8. Antonov D., Zaitsev O. and Litvinenko Yu. (). Comparative Analysis of Pitching Prediction Algorithms // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022. Vol. 1215(1), 012002. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1215/1/012002>.
9. Пелевин А.Е. Прогноз угла наклона палубы корабля // Гирскопия и навигация. 2016. № 4 (95). С. 122-132. DOI 10.17285/0869-7035.2016.24.4
10. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 2. Введение в теорию фильтрации. (Изд. 3-е, исправленное и дополненное). Санкт-Петербург, 2017. 428 с.
11. Степанов О.А., Моторин А.В. Проблемно-ориентированный подход к решению задачи идентификации моделей погрешностей навигационных датчиков и оцениваемых сигналов / Сборник 9-й российской мультиконференции по проблемам управления. Материалы пленарных заседаний. ГНЦ РФ АО "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор". 2016. С. 49-59.