

# Анализ данных систем динамического позиционирования при помощи wavelet-спектрограмм

Е. Б. Амбросовская<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО Навис;

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
e-ambr@mail.ru

Д. В. Ромаев

АО Навис

d.romaev@navisincontrol.com

Д. В. Калимов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
dkalimov1@gmail.com

**Аннотация.** В докладе описаны режимы работы и особенности современных систем динамического позиционирования, описаны особенности действия волнового возмущения на разных скоростях и углах встречи с волной. Для оценки свойств возмущения предложено использовать вейвлет-спектрограммы данных датчиков системы динамического позиционирования. Приведены результаты обработки данных моделирования и многочисленных натуральных испытаний

**Ключевые слова:** динамическое позиционирование, управление движением, система управления курсом судна, волновое возмущение, спектр, спектрограмма, вейвлет

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы динамического позиционирования управляют уже не только в режиме удержания точки или движения с малой скоростью по траектории, современные системы динамического позиционирования (ДП) – это всескоростные системы, в частности, с режимами управления от джойстика на всех скоростях (All Speed Joystick), удержания на траектории на всех скоростях (All Speed Track), удержания на курсе на всех скоростях (All Speed Heading Keeping). И хотя базовые принципы управления остаются теми же, что и 30 лет назад [1][3][2], но теперь функциональности и условиям работы такие системы плавно смыкаются с системами управления курсом судна, выгодно отличаясь от них тем, что все средства активного управления доступны системе для контроля движением. В различных режимах (в том числе упомянутые всескоростные режимы, а также специальные режимы управления для земснарядов [5] и тп) судно движется, маневрируя на разных скоростях под разными углами к возмущению.

Волновое возмущение, которое действует на судно, меняет свои спектральные свойства при смене угла встречи с волной и скорости хода судна [3][11]. При удержании в точке это не очень существенно, а вот с ростом скорости хода становится важным. На рис. 1 приведено характерное изменение спектра при

различных скоростях хода (для фиксированного угла встречи с волной) [11].

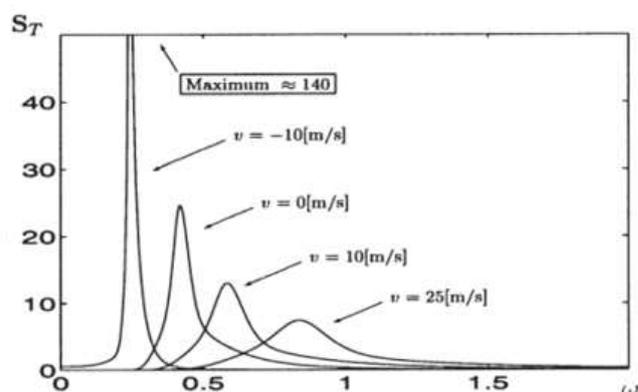


Рис. 1. Спектр волнения при различных углах встречи и скорости хода судна [11]

Фильтры Калмана, которые используются при обработке данных компасов, а также систем определения местоположения различных физических принципов (GPS, Laser Radar, Taut Wire, Hydroacoustic Systems) [6], [7] традиционно подстраиваются под спектральный состав помехи. В данном случае требуется иметь дело с помехой, спектральный состав которой меняется с течением времени, причем достаточно быстро. В этом случае подстраиваться к средней оцененной частоте волны за длительное время бесполезно, и требуется как-то оперативно оценивать спектральный состав действующих возмущений.

Возмущения по сути не являются в этом случае стационарными, и при определении спектра он излишне «размазывается».

В качестве примера можно привести результат моделирования (угловая скорость рыскания) на ДП-симуляторе системы navDP-4000 с удержанием курса при движении с набором скорости от 0 до 4 узлов, при различных углах курса, волнение 3 балла. На рис. 2 приведены два фрагмента графика угловой скорости (из

разных частей записи), график курса судна, а на рис. 3 оценка спектра при помощи алгоритма БПФ.

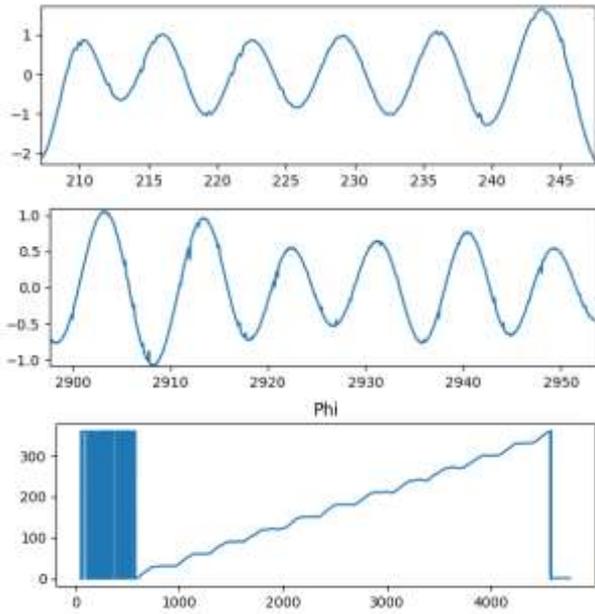


Рис. 2. Движение с переменным углом к волнению (результат моделирования)

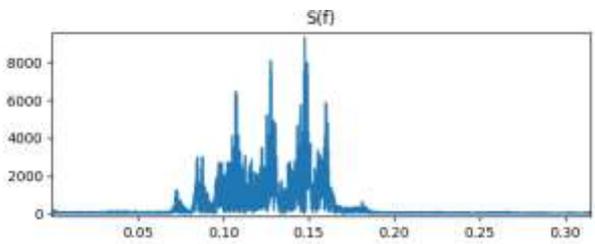


Рис. 3. Движение с переменным углом к волнению (оценка спектра)

Кроме того, в замкнутой системе появляются частоты, вносимые работой регуляторов (курса, положения), которые также не стоят на месте.

Для анализа сигналов, спектральный состав которых меняется от времени, удобно использовать вейвлет-преобразование [4], [10]. В данной работе рассматриваются спектрограммы, построенные с использованием вейвлет-преобразования. В работе рассмотрены спектрограммы различных сигналов датчиков, полученных в ходе натурных испытаний судов, работающих под управлением системы Navis NavDP4000.

## II. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ. СКАЛОГРАММЫ

Непрерывное вейвлет-преобразование  $X_w(\tau, s)$  определяется соотношением:

$$X_w(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt$$

Здесь вейвлет-функция («материнский вейвлет»)  $\psi(t)$ , параметр масштаба  $s$ , \* – обозначение комплексной сопряженности. По сути это свертка сигнала с вейвлет-функцией, где вейвлет-функция – ограниченная во времени в общем случае комплексная

функция, равная нулю на концах, интеграл от этой функции также равен нулю. Вейвлет-функции различаются по виду [ссылки]. Для сигнала, который конечен во времени и измерен в дискретные моменты времени  $t_i$  интеграл (свертка с ядром  $\psi^*$ ) превращается в конечную сумму.

Вейвлет-преобразование позволяет исследовать поведение спектрального состава сигнала во времени. Вейвлет-скалограмма – это двумерное представление одномерных данных. На ось X наносится время, а на ось Y – шкала – результат вейвлет-преобразования сигнала соответствующее значению амплитуды сигнала в момент времени X.

В практике обработки сигналов используют различные вейвлет-функции, некоторые приведены на рис. 4.

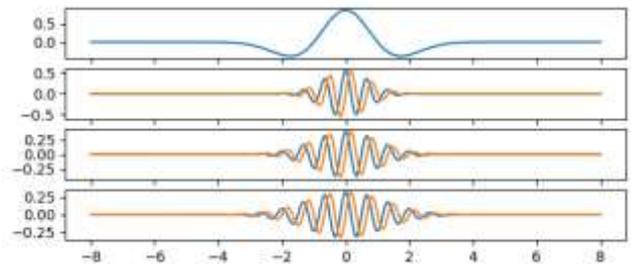


Рис. 4. Вейвлет-функции mexh, smor1-1.5, smor2-1.5, smor3-1.5 уровня 8

Рассмотрим пример использования скалограммы (вейвлет-спектрограммы) для определения состава нестационарного сигнала. Рассмотрим сигнал, представляющий собой смесь гармоник

$$x(t) = a_1 \sin(2\pi f_1(t)t + \varphi_1) + a_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2),$$

где одна частота изменяется со временем

$$f(t) = f_0 + f_1 t,$$

а вторая – постоянная.

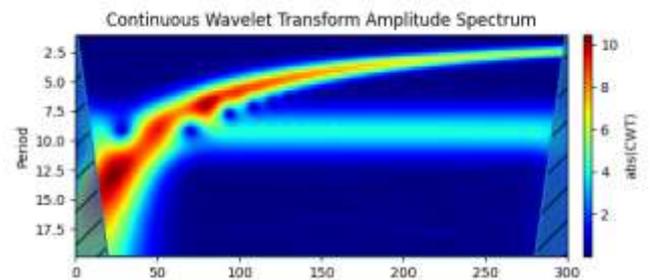


Рис. 5. Спектрограмма смешанного сигнала (smor1-1.5)

Спектрограмма, полученная по вейвлет-преобразованию (рис. 5) в этом случае имеет постоянную полосу, соответствующую второй гармонике, и уже знакомую кривую из первого примера. В этих примерах мы использовали вейвлет типа smor1-1.5. При использовании вейвлета типа smor3-1.5 получим рис. 6.

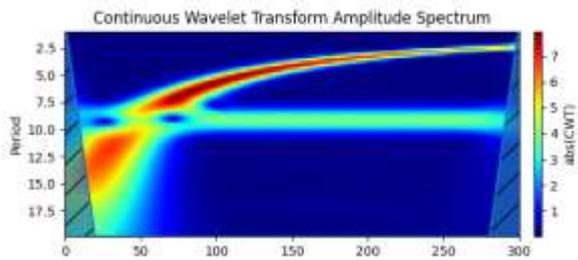


Рис. 6. Спектрограмма смешанного сигнала (сморг3-1.5)

Рассмотрим теперь результаты обработки реальных записей работы системы динамического позиционирования в различных режимах.

### III. ОБРАБОТКА ДАННЫХ БОРТОВОЙ И КИЛЕВОЙ КАЧКИ

Рассмотрим спектрограммы бортовой и килевой качки, полученные по результатам обработки данных датчика Vertical Reference System (VRS) маневрирующего судна. Скорость хода была практически постоянная (около 10 уз), а вот курс менялся, как показано на рис. 7.

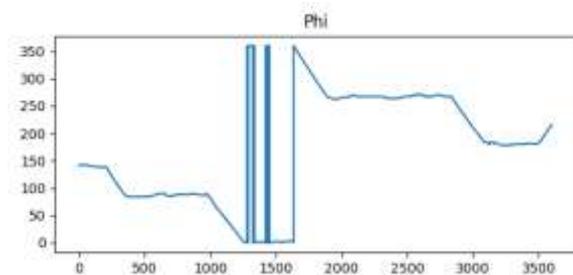


Рис. 7. Курс судна в течение эксперимента

Даже на ненулевой скорости хода судна бортовая качка не зависит от угла встречи с волной, поэтому процесс можно практически считать стационарным. Период бортовой качки меняется только при изменении волнения (то есть не связан с изменением скорости хода и курса судна). Спектрограмма приведена на рис. 8, на ней четко виден средний период около 12 секунд, соответствующий периоду бортовой качки на волнении в данном случае. Присутствуют и другие частоты, но они выражены слабо.

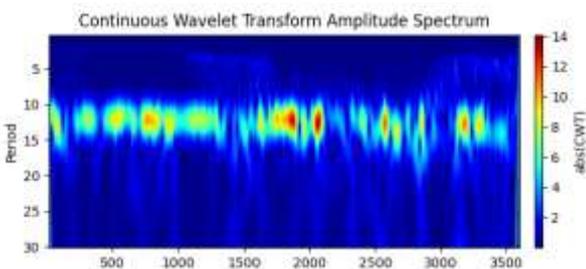


Рис. 8. Спектрограмма крена

В том же эксперименте состав сигнала по дифференту уже не столь однозначен. На рис. 9 приведена спектрограмма дифферента, здесь мы видим преобладающую периодами от 3 до 9 секунд, но есть и 12-секундная составляющая.

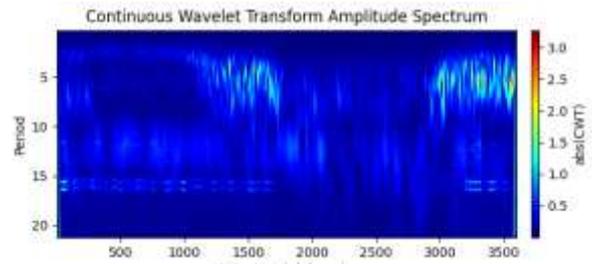


Рис. 9. Спектрограмма дифферента

### IV. ОБРАБОТКА ДАННЫХ РЫСКАНИЯ

Наиболее интересно динамика по курсу видна в записях угловой скорости.

Обрабатываем данные моделирования (рис. 10.) при помощи вейвлет-спектрограммы. Получим периоды около 7.5 секунд для встречных курсов, около 11 секунд для попутных.

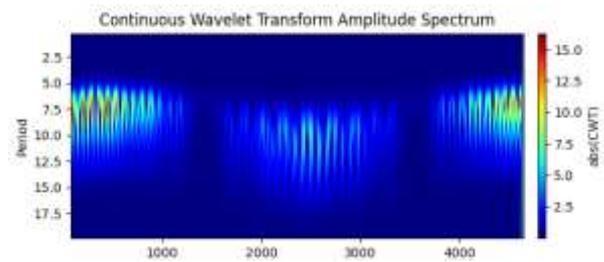


Рис. 10. Спектрограмма рыскания

На рис. 11, 12 приведены результаты обработки угловой скорости, полученной при помощи инерциального блока чувствительный элементов (БЧЭ) [8] в ходе морских испытаний. График скорости хода в ходе эксперимента приведен на рис. 11. Курс был практически постоянным – 90, затем 80 градусов. Однако скорость набиралась ступеньками – и по ходу изменения скорости (как видно на спектрограмме) менялся средний период возмущения.

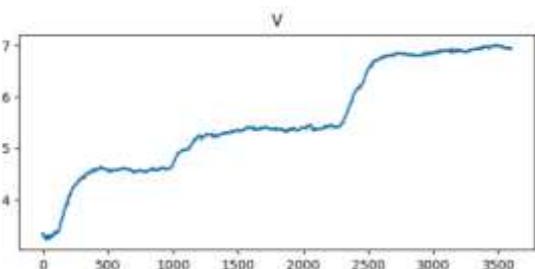


Рис. 11. Скорость хода в ходе эксперимента

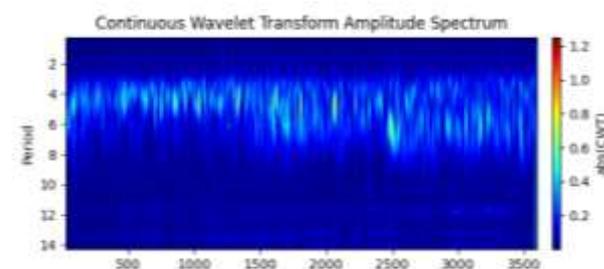


Рис. 12. Спектрограмма рыскания

Ограниченность объема не позволяет показать все интересные результаты обработки данных, но и приведенные результаты позволяют сделать выводы о применимости вейвлет-спектрограмм для обработки данных системы СУ ДП.

#### В. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были рассмотрены спектрограммы, полученные при помощи непрерывного вейвлет-преобразования на языке программирования python с использованием пакета numpy и библиотеки вейвлетов PyWavelets, scaleogram. Спектрограммы позволяют отследить изменение частотного состава в ходе эксперимента, что важно при маневрировании на волнении.

В дальнейшем предполагается рассмотреть спектрограммы систем определения местоположения различных типов в случае их нормальной работы и при сбоях.

Спектрограммы сигналов перспективно использовать при анализе систем при помощи нейросетей, используя алгоритмы анализа изображений, которые в данный момент очень хорошо развиты

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Fossen, Thor. (2011). Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. 10.1002/9781119994138.  
[2] H. Fay, Dynamic Positioning Systems, Principles, Design and Applications. Paris, France: Editions Technip, 2005  
[3] Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами: Учебник. Л.: Судостроение, 1988. 272 с., ил.

[4] Torrence, Christopher, Compo, Gilbert P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 79, Issue 1, pp.61-78.  
[5] DP systems for track control of dredging vessels / A. Loginov, A. Proskurnikov, E. Ambrosovskaya, D. Romaev // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), Arezano, 19–21 сентября 2012 года. Arezano, 2012. P. 453-458. DOI 10.3182/20120919-3-IT-2046.00077  
[6] Барабанов А.Е., Ромаев Д.В. Нелинейная фильтрация методом сценариев для оценки скорости судна // Материалы XXIX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Острякова, Санкт-Петербург, 07–09 октября 2014 года. Санкт-Петербург: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 198-206.  
[7] Барабанов А.Е., Ромаев Д.В., Мирошников А.Н. Нелинейная фильтрация методом подбора сценариев для радарного слежения и динамического позиционирования судов // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16–19 июля 2014 года / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 3624-3633.  
[8] Deep integration of INS and DP: From theory to experiments / E. Ambrosovskaya, D. Romaev, A. Loginov [et al.] // IFAC-PapersOnLine: 13th, Oldenburg, 2021. P. 132-138. DOI 10.1016/j.ifacol.2021.10.084  
[9] Амбросовская Е.Б., Калимов Д.В., Попова Е.В. Оценивание полосы частот действующего на судно волнового возмущения по результатам экспериментальных данных // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2020: Материалы Юбилейной международной-научно практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2020 год. С. 94-99.  
[10] Bouchikhi E.H., Choqueuse V., Benbouzid M.E.H., Charpentier J.F. and Barakat G., "A comparative study of time-frequency representations for fault detection in wind turbine," IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2011, pp. 3584-3589, doi: 10.1109/IECON.2011.6119891  
[11] Podgorski, Krzysztof & Rychlik, Igor & Machado, Ulla. (2000). Exact distributions for apparent waves in irregular seas. Ocean Engineering. 27. 979-1016. 10.1016/S0029-8018(99)00030-X