

Применение стохастического метода управления при исследовании алгоритма расчёта характеристик волнения

Д. Г. Грязин
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Университет ИТМО
volnagdg@yandex.ru

К. А. Глеб
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
Университет ИТМО
kostya_gleb@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена проблеме оценки пространственных производных трехмерного морского волнения в условиях неполной информации, полученной по измерениям волномерными буйами.

Ключевые слова: волномерный буй; пространственная производная; кривизна волн

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При решении некоторых задач океанологии, судостроения, разработки средств океанотехники и др. возникает необходимость в оценке пространственных производных первого и второго порядков. Первая пространственная производная представляет собой угол волнового склона, который является углом между касательной к рассматриваемой точке на поверхности волны и горизонтом. Вторая производная это кривизна волны в этой точке, которая представляет собой меру изменения угла наклона касательной с приращением пространственной координаты.

Наиболее распространенным средством измерения параметров волн, благодаря простоте своей конструкции, автономности, малой стоимости и высокой надежности, являются волномерные буи (ВБ). Большинство ВБ выполнены в виде шарообразной или блиновидной формы и способны измерять только ординаты волн и первые пространственные производные – углы волнового склона. Были попытки [1] создать трехточечных ВБ, способный измерять и вторые пространственные производные – кривизну волн. По сути, такой ВБ представляет собой три соединенных между собой ВБ, способных независимо друг от друга измерять углы волнового склона в трех точках пространства. Именно это позволяет получить информацию о кривизне волн. Однако, после серий экспериментов в 70-х годах прошлого века [2] подобные ВБ практически не использовались в силу своей сложной, массивной и ненадежной конструкции.

Обычные ВБ, в отличие от трехточечного, способны измерять углы волнового склона только в одной точке, а значит прямым образом получить информацию о кривизне

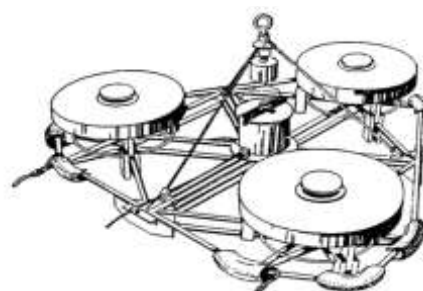


Рис. 1. Трехточечный волномерный буй, способный измерять кривизну волн

невозможно. Однако, учитывая их массовое применение, возникает необходимость оценки кривизны волн, в условиях недостатка измерительной информации.

II. АНАЛИЗ ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Решение данной задачи может быть выполнено при помощи учета информации о продвижении волн в пространстве за единицу времени. Эту информацию можно получить через скорость волны V , которая связана с ее периодом τ соотношением $V = \frac{g\tau}{2\pi}$. Таким образом можно определить параметры волн на небольшом удалении от точки измерения, что позволяет получить производную углов волнового склона по пространственной координате, т.е. кривизну волн.

Морское волнение в большинстве случаев является нерегулярным, которое принято представлять, как суперпозицию плоских регулярных волн [3].

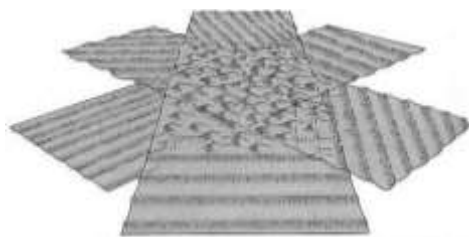


Рис. 2. Представление морского волнения

Работа выполнена при государственной поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 08-08), а также при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-08-00010

Обычно в составе развитого волнения присутствуют как крупные, так и вторичные волны, возникающие на

гребнях крупных волн. При определении периода волн, вторичные волны не учитываются, поскольку он определяется по пересечению реализации через нулевую линию. Это может приводить к большой погрешности оценки кривизны, т.к. первичные крупные волны имеют большую скорость в сравнении со вторичными волнами. Таким образом, необходим метод управления, позволяющий корректировать входные данные алгоритма расчета кривизны волн, который будет корректировать выходные значения.



Рис. 3. Блок-схема метода управления с обратной связью алгоритма расчета характеристик волнения в условиях недостаточной измерительной информации

Такой подход позволяет минимизировать погрешности оценки пространственных производных волн, вызванных наличием большого числа гармоник волн в спектре нерегулярного волнения. Критерием для корректирующей функции с обратной связью является соответствие спектральных плотностей процессов волнения $S_{\zeta''} = k^2 S_{\zeta'} = k^4 S_{\zeta}$, где $S_{\zeta''}$ – спектр кривизны, $S_{\zeta'}$ – спектр углов волнового склона, S_{ζ} – спектр ординат, k – волновое число. Данное соотношение позволяет сравнить два спектра кривизны: один, построенный по промежуточной реализации кривизны, второй – по соотношению $S_{\zeta''} = k^2 S_{\zeta'}$.

III. ПОДБОР РЕГУЛЯТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В качестве регулятора управления алгоритма с обратной связью выступает мгновенное значение скорости волны. Однако, нерегулярное волнение содержит волны разных скоростей, а также вторичные волны. Для корректировки с обратной связью необходимо выбрать конкретные значения мгновенных скоростей волн. Такими значениями могут быть среднее значение скорости всех волн, скорость волн, несущих максимальную энергию (с частотой пика спектральной области) или же индивидуальное значение скорости для каждой отдельно взятой волны.

Сначала алгоритм был исследован с определением скорости для каждой i -ой волны. В результате которого было выявлено, что такой подход имеет 2 особенности: в районах экстремумов появились резкие, скачкообразные изменения значений кривизны волн; в других областях реализации появились большие отклонения.

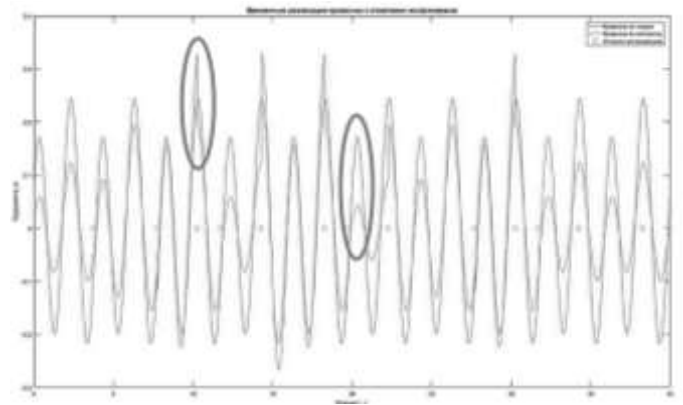


Рис. 4. Сравнение расчетной реализации кривизны с исходной с использованием переменной скорости

Обе особенности оказались вызваны тем, что скорость волн определялась через их период, который в свою очередь определялся по реализации ординат волн. Фазы и периоды процессов волнения (ординат, углов и кривизны волн) немного отличаются друг от друга. В момент перехода от одной волны к другой, при работе алгоритма, изменяется значение скорости, участвующее в расчете кривизны из-за чего, возникают резкие изменения ее значений.

Затем алгоритм был проверен с использованием постоянного среднего значения скорости и скорости на частоте пика спектра. Расчеты показали, что использование среднего периода волн дает результат немного ближе к исходному, поэтому для дальнейших исследований был выбран именно он.

IV. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Предложенный способ корректировки амплитудных значений через преобразование Фурье был проверен численным способом. Сначала были смоделированы процессы волнения по аналитическим выражениям:

$$\begin{aligned}\zeta(t) &= \sum_{i=1}^n A_i \cos(-\omega_i t + \varphi_i) \\ \zeta'(t) &= -\sum_{i=1}^n A_i k_i \sin(-\omega_i t + \varphi_i) \\ \zeta''(t) &= -\sum_{i=1}^n A_i k_i^2 \cos(-\omega_i t + \varphi_i)\end{aligned}\quad (1)$$

где A_i – амплитуда, ω_i – круговая частота, t – время, φ_i – случайная фаза.

Амплитуды A_i элементарных i -ых гармоник волн определялись по формуле $A_i = \sqrt{2S_p(\omega)\Delta\omega}$, где $S_p(\omega)$ – Спектр Пирсона-Московица [4]. Для моделирования спектров $S_p(\omega)$, использовался диапазон частот от 0 до 5 рад/с, что обусловлено тем, что в него укладываются частоты реальных морских волн.

Затем, реализации ординат и углов волнового склона обрабатывались при помощи алгоритма определения характеристик волн, на выходе которого получались дополнительно две реализации кривизны – с откорректированными значениями и неоткорректированными. Обе полученные реализации сравнивались с исходной реализацией (1).

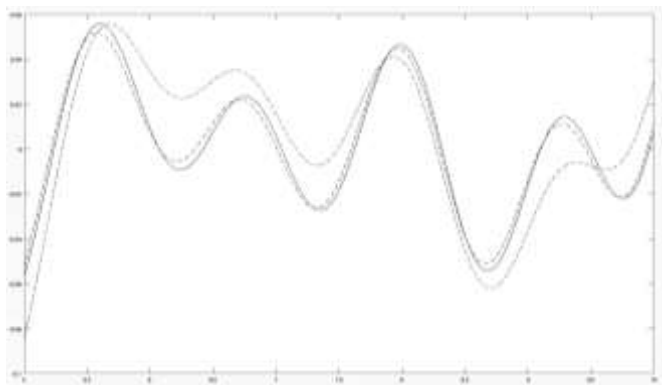


Рис. 5. Временные реализации кривизны. Сплошная линия – кривизна по формуле (1), штрих-пунктирная – кривизна без коррекции, пунктирная – с коррекцией

Реализации моделировались для диапазона интенсивности волн от 2 до 9 баллов по шкале ГУ ГМС 53 с высотами волн в диапазоне от 0,3 до 11,9 м, средними периодами от 2,3 до 12,7 с. Шаг дискретизации был выбран равным 0,01 с. Погрешности полученных реализаций кривизны определялись по формуле

$$\delta = \max \left| 1 - \frac{\zeta''_{pi}}{\zeta''_i} \right| 100\%,$$

где ζ''_{pi} – расчетная кривизна, ζ''_i – заданная (1).

На рис. 6 видно, что оба метода имеют тенденцию к увеличению погрешности с ростом интенсивности волнения, однако тенденция метода с корректировкой менее выраженная. Погрешность определения реализации кривизны с корректировкой относительно значений заданной кривизны составила менее 5% для всего диапазона моделируемых волн, в то время, как погрешность метода без корректировки – 53%.

Такая большая разница погрешности определения реализаций кривизны отчетливо показывает преимущество метода управления выходными значениями алгоритма определения пространственных параметров волнения.

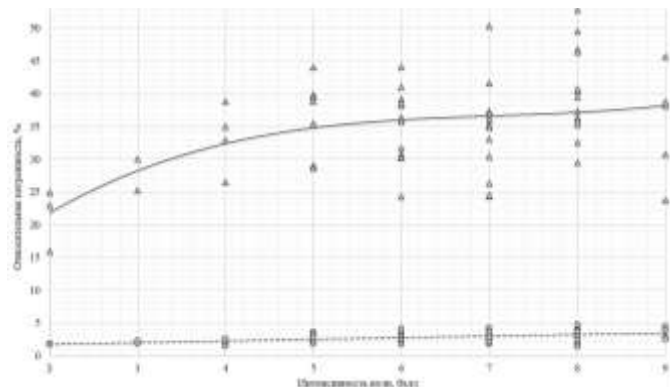


Рис. 6. Погрешность расчетной кривизны в зависимости от интенсивности волн без корректировки – треугольными точками, с корректировкой с обратной связью – круглыми. Сплошной и пунктирной линией изображены тенденции метода без корректировки с корректировкой соответственно

V. ВЫВОДЫ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что способ обратной связи с привлечением дополнительной информации о скорости распространения волн в пространстве позволяет управлять выходным сигналом алгоритма определения пространственных характеристик волнения. Относительная погрешность оценки кривизны уменьшилась с 53 до менее 5 %. Отметим, эти цифры не являются окончательными, поскольку при численном эксперименте не учитывались иные факторы, которые могут влиять на погрешность результата на выходе алгоритма. К таким погрешностям могут относиться величина интервала дискретизации, ширина моделируемого спектра, крутизна волн, наличием волн зыби и др. Влияние каждый из этих факторов требует отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Cartwright D.E. Buoy techniques for obtaining directional wave spectra / D.E. Cartwright, N.D. Smith // Buoy Technology, Washington, D.C., Marine Tech. Soc. 1964. P. 112–121.
- [2] Mitsuyasu H. Observations of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy / Mitsuyasu, H., Tasai, F., Suhara, T., Mizuno, S., Ohkusu, M., Honda, T., Rikiishi, K. // Journal of Physical Oceanography, vol. 5, issue 4. 1975. p. 750–760.
- [3] Лонге-Хиггинс М.С. Статистический анализ случайной движущейся поверхности. Сб. переводов «Ветровые волны» под ред. Ю.М. Крылова, ИЛ, 1962.
- [4] Pierson Willard J., and Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii // Journal of geophysical research. 1964. No. 69. p. 5181–5190.