

Струнный волнограф с экранированным проводом для измерения волнения

Э. М. Зуйкова, Ю. А. Титченко ✉, Д. А. Ковалдов, В. Ю. Караев,
В. И. Титов

*Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
Нижний Новгород, Россия*
✉ yuriy@ipfran.ru

Поступила в редакцию 28.03.2025; одобрена после рецензирования 10.04.2025;
принята к публикации 11.07.2025.

Аннотация

Цель. Цель настоящей работы – описать макет струнного волнографа для динамической регистрации возвышений волн в соленой и пресной воде в широком диапазоне длин волн вплоть до капиллярных, который был бы нечувствительным к осаждению солей на проводящем проводе и не имел замыканий от проводящего мусора. Макет требуется при разработке необслуживаемых решеток волнографов для регистрации двумерных спектров волнения и сопровождения исследований волнения моря с помощью дистанционных методов при интерпретации и валидации данных дистанционного зондирования.

Методы и результаты. Представлен емкостный струнный волнограф с экранированным проводом в виде замкнутой двухпроводной петли в качестве струны для регистрации возвышений водной поверхности в соленой и пресной воде. Достоинством экранированного провода по сравнению с проводящим проводом является отсутствие снижения чувствительности вследствие осаждения солей на проводящем проводе и замыканий от мелкого проводящего мусора. Волнограф обладает большим линейным динамическим диапазоном и может регистрировать волны высотой от миллиметров до нескольких метров в соленой и пресной воде. В процессе эксплуатации не требуется очистка провода, волнограф может находиться в воде длительное время без потери чувствительности и температурных «уходов» сигнала.

Выводы. Приводится описание и схема работы волнографа, обсуждаются особенности его конструкции и результаты испытаний в речных и морских условиях. В лабораторных условиях исследовано влияние расстояния между струнами на работоспособность волнографа в соленой и пресной воде. Разработана схема исключения взаимных наводок струн волнографа для многострунной конструкции. В предлагаемой схеме измерений возможно крепление управляющего блока струнного волнографа на высоте нескольких десятков метров от струн, что позволяет удобно установить волнограф над водой для измерений с моста или с морской платформы.

Ключевые слова: поверхностные волны, высота волн, гравитационно-капиллярные волны, уровень воды, струнный волнограф, натурные исследования

Благодарности: авторы выражают благодарность сотруднику ИПФ РАН Е. В. Лебедеву за качественную разработку печатной платы. Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН (FFUF-2024-0033).

Для цитирования: Струнный волнограф с экранированным проводом для измерения волнения / Э. М. Зуйкова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 5. С. 599–610. EDN ZTEМНА.

String Wave Gauge with a Shielded Wire for Wave Measurements

E. M. Zuikova, Yu. A. Titchenko , D. A. Kovaldov, V. Yu. Karaev,
V. I. Titov

A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia
 yuriy@ipfran.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to describe a prototype of a string wave gauge for dynamic record of wave elevations in salt and fresh water in a wide range of wavelengths up to capillary ones, which should be both insensitive to salt deposition on the conducting wire and free from short circuits caused by conductive debris. The prototype is required when developing unattended wave gauge “grids” intended for recording two-dimensional wave spectra and for accompanying of sea wave studies with remote methods for interpretation and validation of remote sensing data.

Methods and Results. A capacitive string wave gauge with a shielded wire in the form of a closed two-wire loop as a “string” for recording water surface elevations in salt and fresh water is presented. The advantage of a shielded wire as compared to a conductive one is the absence both of a decrease in its sensitivity due to salt deposition on the conductive wire and short circuits from small conductive debris. The wave gauge has a large linear dynamic range and can record the waves from millimeters to several meters high in salt and fresh water. During operation, there is no need to clean the wire; the wave gauge can be in water for a long time without losing sensitivity and with no temperature-related signal “drifts”.

Conclusions. The description and scheme of the wave gauge operation is presented, as well as the design of its features and the results of testing in river and sea conditions are discussed. The impact of distance between the “strings” upon the device effectiveness in salt and fresh water is studied in laboratory conditions. For a multi-string design, a scheme for eliminating mutual interference of the wave gauge “strings” is developed. The proposed measurement scheme implies mounting the control unit of string wave gauge at a height of several dozens of meters from the “strings”. It permits to install conveniently the wave gauge above water in order to carry out the measurements from a bridge or a sea platform.

Keywords: surface waves, wave height, gravity-capillary waves, water level, string wave gauge, *in-situ* measurements

Acknowledgements: The authors are grateful to the employee of IAP RAS E. V. Lebedev for high-quality development of the printed circuit board. The study was carried out within the framework of state assignment of IAP RAS (FFUF-2024-0033).

For citation: Zuikova, E.M., Titchenko, Yu.A., Kovaldov, D.A., Karaev, V.Yu. and Titov, V.I., 2025. String Wave Gauge with a Shielded Wire for Wave Measurements. *Physical Oceanography*, 32(5), pp. 613-623.

Введение

Для измерения высот волн на реках и на море разработаны разнообразные виды волнографов^{1, 2, 3} [1–3], наиболее точными являются струнные⁴ [4] и лазерные [5]. При этом струнный волнограф наиболее простой в изготовлении и надежный при проведении натурных измерений. Наиболее известным в России является струнный волнограф, установленный на океанографической платформе Морского гидрофизического института в пгт Кацивели, который функционирует в течение многих лет и активно используется для мониторинга волнения и проведения сопутствующих измерений [6–8].

Стандартные струнные волнографы со струнами в виде проводящего провода обладают существенными ограничениями, связанными с загрязнением струны солями, налипанием на нее плавающих водорослей и мелкого проводящего мусора. В Канаде (www.akamina.com) предложили использовать для регистрации изменения уровня жидкости петлю из экранированного провода в виде замкнутой двухпроводной линии. Этот тип волнографа хорошо себя показал на озерах, реках и в разнообразных лабораторных установках [9, 10]. По сравнению с одиночным проводом емкость петли увеличивается в два раза, что существенно при измерении коротких волн высотой порядка нескольких единиц миллиметров. Достоинством экранированного провода по сравнению с проводящим является отсутствие образования окислов, изменяющих емкость струны, и отсутствие замыкания от мелкого проводящего мусора. Именно такой подход был выбран в Институте прикладной физики РАН для разработки макета струнного волнографа (далее – волнограф), описание которого приводится в данной работе. Волнограф проработал в течение трех месяцев на р. Ока в Нижнем Новгороде [11] и подтвердил свою работоспособность. Здесь также приведены некоторые результаты натурного использования этого волнографа в Черном море.

Цель работы – привести описание макета емкостного струнного волнографа с экранированным проводом, показать преимущества использования замкнутой двухпроводной линии и обсудить результаты тестирования макета в натурных условиях.

Конструкция волнографа

Фотографии волнографа в натурных условиях во время измерений на р. Ока и струны показаны на рис. 1.

При измерении волн длиной менее полуметра использовалась петля шириной 5–10 мм и длиной 0,3–2 м из провода диаметром 0,3 мм, натянутая на

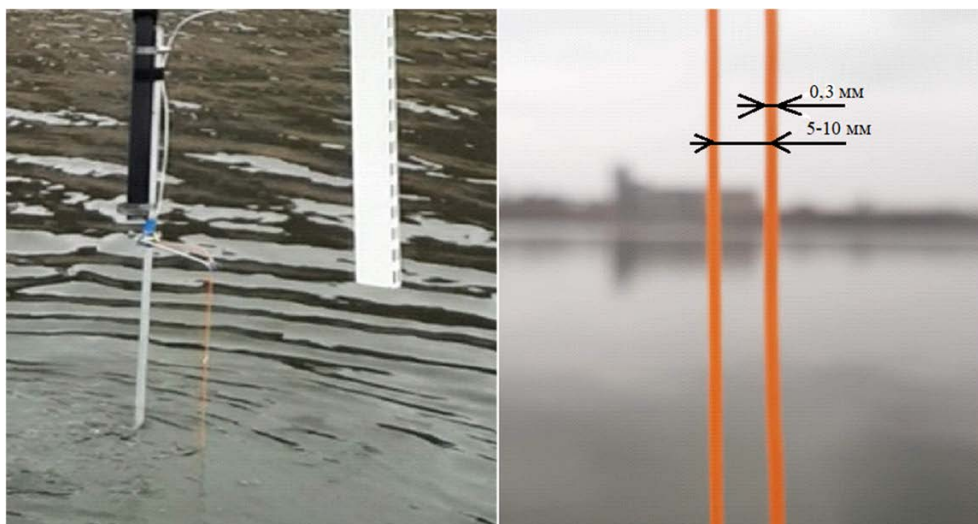
¹ Коровин В. П. Океанологические наблюдения в прибрежной зоне моря. Учебное пособие. СПб. : РГТУ, 2007. 434 с.

² MARINET. D2.1 Wave Instrumentation Database. Work Package 2: Standards and Best Practice / J. Lawrence [et al.]. 2012. 55 p.

³ Розенберг А. Д. Исследование морской поверхности радио- и акустическими методами : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 1980. 237 с.

⁴ Антонов В. С., Садовский И. Н. Измеритель волнения морской поверхности ИВМП-1: описание устройства и данные измерений натурного эксперимента CAPMOS'05. Москва, 2007. 36 с. (Препринт/ РАН. ИКИ).

резиновые втулки и закрепленная штырями на металлическом стержне толщиной 5 или 15 мм в зависимости от длины петли. Два провода петли припаиваются к центральной жиле экранированного кабеля типа радиочастотного РК-75, экран кабеля – к металлическому стержню. Через разъем СР-50 (соединитель радиочастотный) сигнал передается на блок обработки. Поскольку емкость кабеля складывается с емкостью струны, его длина ограничена. Поэтому блок обработки желательно располагать рядом со струной.



Р и с. 1. Волнограф в измерительной установке (слева) и струны (справа)
Fig. 1. Wave gauge in the measuring setup (left), and “strings” (right)

Емкость петли изменяется от уровня погружения в воду в связи с отличием диэлектрической проницаемости воздуха, равной единице, и диэлектрической проницаемости пресной воды, равной 80, или морской воды, равной 78. Для петель используется провод МС 16-33 (монтажный специальный) сечением $0,03 \text{ мм}^2$ (либо $0,05$ или $0,08 \text{ мм}^2$) с изоляцией из сплошного монолитного фторопласта. Сплошная изоляция МС позволяет измерять уровень жидкости агрессивных сред.

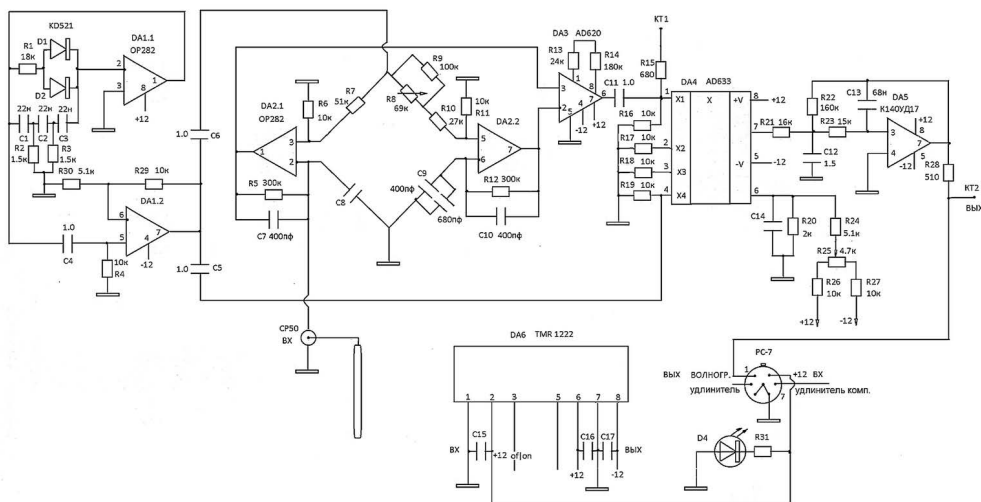
При измерении волн высотой в несколько метров можно применять один экранированный провод с изоляцией от воды погруженного конца и провод, сложенный пополам, который используется в основном для удобства крепления к отвесу при натяжении провода и при отсутствии необходимости проведения изоляции конца опускаемого провода от морской воды. Увеличение емкости струны в два раза является дополнительным положительным результатом. Увеличение емкости существенно для коротких струн длиной до 20 см. Центральная жила РК-провода, как в первом случае, подсоединяется к проводу или петле, а экран – к отдельному проводящему проводу, опущенному в воду, или к металлической конструкции в воде. С целью упрощения конструкции и увеличения прочности рассматривалась возможность закрепления провода на экранированном тросе с одновременным использованием его в качестве земли. К сожалению, это решение оказалось неудачным в связи с медленным

(до десятка секунд) стеканием воды после выхода погруженной части троса из воды. Для прочности можно крепить провод на миллиметровой леске, где практически отсутствует стекание, но потребуются дополнительный провод для контакта с водой.

Изменение емкости волнографа при изменении высоты волны (длины подводной части струны) отслеживается емкостным мостиком. Применение мостика позволяет получить высокую чувствительность. Первоначально для регулировки мостика использовалась переменная емкость, а позднее для упрощения конструкции – переменное сопротивление.

Схема струнного волнографа

Схема указанного волнографа приведена на рис. 2. На мостик DA1.1 подается сигнал от генератора с частотой в десятки килогерц в первом варианте и в единицы килогерц – во втором. На DA1.2 собрана схема дополнительного усиления для получения оптимального уровня сигнала. Усилители DA2.1 и DA2.2 сигналов со струны и эталонной емкости C9 увеличивают размер линейного динамического диапазона. Величина емкости C9 выбирается равной примерно половине емкости струны и состоит из двух частей. Основная емкость – чип на печатной плате, дополнительная емкость для настройки типа КМ47 – на штырях со стороны деталей. На DA3 выделяется разность сигналов с емкости волнографа и с эталонной емкости C9; DA4 – синхронный детектор сигнала с DA3 и опорного сигнала с DA1.2. Синхронное детектирование избавляет схему от различного рода помех со входа. На DA5 собран фильтр нижних частот с частотой среза 10 или 30 Гц. Выход фильтра записывается на ноутбук. Схема волнографа размещена в дюралевом корпусе размером 20 × 70 × 80 мм. На приведенной схеме обработки сигнала струнного волнографа с экранированным проводом получен динамический диапазон относительно шумов ~ 80 дБ при максимальном выходе 10 В и шуме менее 1 мВ.



Р и с. 2. Схема струнного волнографа

F i g. 2. Wave gauge circuit

Измеренные температурные «уходы» выходных сигналов блока обработки при изменении температуры воздуха в лабораторных условиях от -10 до $+50$ °C находятся в пределах нескольких процентов.

Исследование влияния расстояния между струнами на измерения

Приведем анализ схемы исключения взаимных наводок струн, которая может использоваться при создании решеток волнографов для измерения двумерных спектров волнения. В лабораторных условиях на примере двух 40-сантиметровых и двух 7-метровых струн исследовано влияние расстояния между струнами на величину наводки в соленой воде. В двух 40-сантиметровых струнах (в одной из которых установлен генератор с частотой 5 кГц, в другой – генератор с частотой 2,8 кГц), примерно наполовину погруженных в соленую воду, измерялась наводка генератора с частотой 2,8 кГц на струну с генератором 5 кГц для различных расстояний между ними. Наводка измерялась относительно сигнала, полученного при изменении уровня погружения в воду на 10 см. При расстоянии между струнами менее 5 мм наводка составила -16 дБ, при 50 мм -28 дБ, при 120 мм -35 дБ. Сравнение с наводками в струнах, вынутых из воды, показало, что величина наводок в струнах, погруженных в соленую воду, совпадает со значениями наводок между частями струн, находящимися в воздухе. Таким образом, источником наводок является струна, которая находится в воздухе.

В измерениях сигналов в двух 7-метровых струнах, находящихся рядом в соленой воде и на расстоянии, отсутствуют наводки, что означает отсутствие взаимного влияния между струнами.

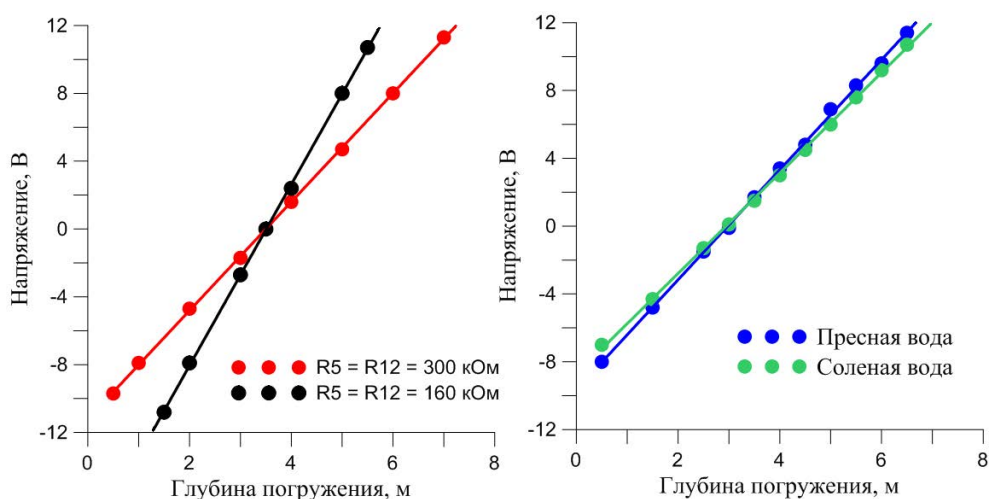
В пресной воде взаимное влияние между струнами уменьшается в зависимости от расстояния между ними медленнее, чем в воздухе. Например, для 7-метровых струн, расположенных на расстоянии 3–5 мм, наводка струны с частотой 2,8 кГц на струну с частотой 5 кГц составляет -13 дБ, на расстоянии 16 см -16 дБ, на расстоянии 33 см -19 дБ относительно сигнала при изменении уровня погружения струны в воду на 10 см. В воздухе для струн, расположенных на расстоянии 3–5 мм, наводка струны составляет -4 дБ, на расстоянии 3 см она равна -20 дБ.

В некоторых случаях при достаточно удаленном расположении струн взаимным влиянием соседних струн можно пренебречь, в других случаях его нужно удалить. На схеме волнографа (рис. 2) видно, как легко исключить взаимные наводки, применяя синхронное детектирование. Для этого в струнах используются разные частоты, и необходимо выполнять синхронное детектирование в каждой струне с опорным сигналом своей частоты. Число схем обработки может совпадать с числом струн или достаточно одной схемы обработки с последовательным переключением частоты. При небольших уровнях сигнала наводки от соседних струн, работающих на других частотах, не приводят к искажению сигнала. Например, при сигнале, равном 0,4 В, и наводке, большей сигнала на 8 дБ, величина выходного сигнала не меняется. При больших значениях сигнала и наводок максимальный рабочий уровень необходимо уменьшить, чтобы избежать искажений сигнала. При этом соответственно уменьшается динамический диапазон.

Методика измерений

Перед проведением измерений половина струны опускается в воду. Эталонная емкость предварительно выбирается равной емкости половине струны в воде. Например, в пресной воде емкость сложенного пополам провода МС сечением $0,08 \text{ мм}^2$ и длиной 3,5 м равна 1200 пФ, что соответствует $\sim 3,4 \text{ пФ/см}$. При этом емкость РК-кабеля равна $\sim 70 \text{ пФ}$, емкость петли без воды $\sim 30 \text{ пФ}$. Например, петля из МС сечением $0,05 \text{ мм}^2$ имеет емкость $2,2 \text{ пФ/см}$, а две петли – $4,4 \text{ пФ/см}$. Переменный сигнал с контрольного выхода на передней панели блока обработки подключается к осциллографу или ноутбуку. Изменяя сопротивление потенциометра R8, размещенного на передней панели, добиваются минимального сигнала на осциллографе с контрольного выхода КТ1. Так получается компенсация емкостей мостика по формуле: емкость струны $C = C9 \cdot R8/R7$. Далее смещением по постоянному напряжению на выходе КТ2 настраиваются на минимум потенциометром R24 на передней панели.

При измерениях в реальных условиях для регистрации возвышений волн перед экспериментами используется калибровка волнографа путем изменения глубины его погружения на заданную величину с применением поверенных приборов для измерения сигналов волнографа. На рис. 3 приведена полученная в лабораторных условиях зависимость сигнала 7-метровой петлевой струны из провода МС сечением $0,08 \text{ мм}^2$ для емкости $C7 = C10 = 400 \text{ пФ}$ при различной чувствительности волнографа (при разных значениях сопротивления R5 – рис. 3, *слева*) от глубины погружения в пресную и соленую воду с концентрацией соли 20 г/л (рис. 3, *справа*). Точками отмечены значения уровня воды при калибровке, которые аппроксимируются прямой линией. Таким образом, связь напряжения с глубиной погружения струны можно считать линейной на достаточно большом интервале.



Р и с. 3. Зависимость выходного сигнала при различной чувствительности (*слева*) и для пресной и соленой воды (*справа*) от глубины погружения струны

F i g. 3. Dependence of output signal upon the string immersion depth at different sensitivity (*left*), and for fresh and salt water (*right*)

Для струны длиной более двух метров необходимо дополнительно использовать леску, чтобы повысить прочность конструкции. Возможно крепление управляющего блока струнного волнографа на высоте нескольких десятков метров над водой (мост, нефтяная платформа). Внизу петля надевается на резиновую втулку и крепится к леске, к которой привязывается отвес (груз весом 2–3 кг) для натяжения струны. Вверху петля крепится на резиновой втулке, которая через резинку вместе с леской привязывается к кевларовому тросу, идущему наверх. Блок обработки закрепляется рядом, а вдоль троса проводятся провода питания (12 В) и выходной сигнал волнографа с блока обработки («ВЫХ. ВОЛНОГР.») от разъема РС-7. При этом основное натяжение принимает на себя леска.

Для упрощения настройки и удобства измерений необходимо обеспечить работоспособность волнографа при размещении струны на большом расстоянии от блока обработки и записывающего устройства. Благодаря наличию в схеме обработки мостика решить эту проблему несложно. Предложен метод, когда удлинитель подключается к струне, а к компенсирующей емкости С9 подключается такой же удлинитель, что позволяет исключить температурные «уходы» и другие менее значительные факторы. Струна через короткий РК-кабель и разъем СР-50 подключалась к входу схемы обработки, при этом разъем РС-7 (рис. 2) использовался для подачи на схему обработки питания (12 В) и вывода сигнала волнографа с выхода схемы обработки («ВЫХ. ВОЛНОГР.»). С удлинителями разъем РС-7 используется также для подачи сигнала со струны через вход «УДЛИНИТЕЛЬ» и подключения компенсирующего второго такого же удлинителя на емкость С9 через вход РС-7 «УДЛИНИТЕЛЬ КОМП.». Простейший вариант удлинителя – интернет-кабель с двумя витыми парами без экранирующей оплетки и отдельного провода для заземления. В последних вариантах речного волнографа для петлевых проводов до 2 м, закрепленных на металлических стержнях, тоже используются для удобства работы удлинители ~ 3 м из двух витых пар. Динамический диапазон относительно шумов не изменился. В лаборатории проведена проверка имитации работы с нефтяной платформы. Семиметровая струна в виде петли с удлинителями 30-метрового интернет-кабеля с двумя витыми парами подключена к блоку обработки и записи. Емкость этой струны, погруженной на 3,5 м в соленую воду, составляет ~ 1200 пФ, емкость 30-метрового кабеля 2400 пФ.

Эксперимент подтвердил, что зависимость сигнала от глубины погружения в соленую воду не меняется после 6 сут нахождения в воде струны из провода МС. Исследовано влияние ширины петли (расстояние между струнами) на принимаемый сигнал. В пресной воде нет зависимости сигнала от ширины петли. В соленой воде при уменьшении ширины до 2 мм сигнал не менялся, а при меньшей ширине при подъеме струны он устанавливался с задержкой в несколько секунд из-за появляющейся инерционности в связи с медленным стеканием воды. При погружении струны инерционности нет.

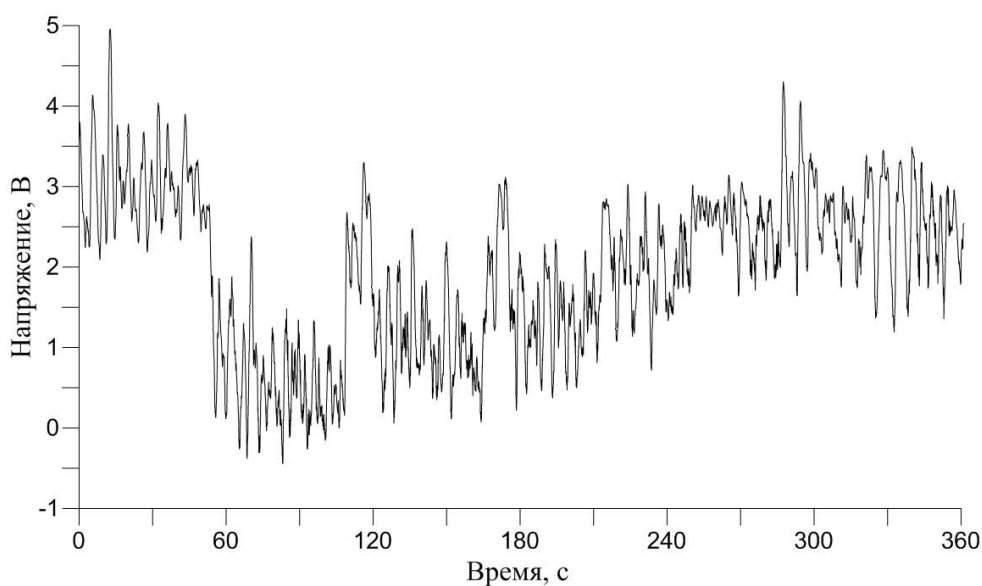
Это недостаток петлевой струны со сложенными вместе проводами. В однострунном волнографе инерционность не замечена, но у него меньше чувствительность. У петли не будет инерционности, если сделать достаточный за-

зор между проводами, например если закрепить провода с внешней или внутренней стороны термоколец, установленных через каждые 50–30 см струны. Но необходимо помнить, что минимальная измеряемая волна будет иметь длину в 4 раза больше ширины петли.

Некоторые результаты натурных измерений волнения с помощью волнографа

Измерения волнографом высот волн меньше 0,5 м проводились на реке в течение нескольких сезонов. При длительном нахождении в воде чувствительность струны не менялась [11].

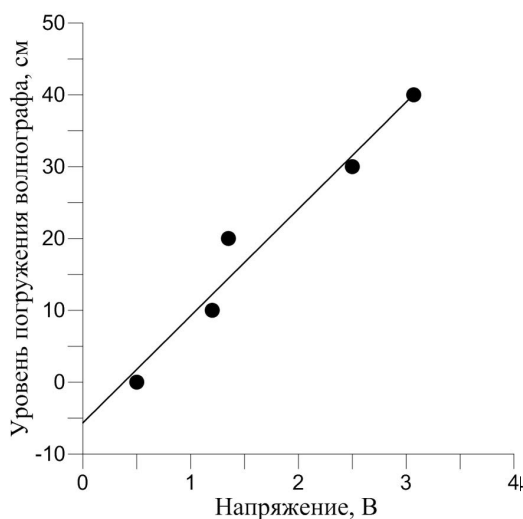
На море (Геленджик) для измерения волнения использовались струна-петля длиной 2,5 м из МС сечением 0,08 мм² и леска. На рис. 4 показана запись калибровки волнографа на море. Сначала волнограф регистрировал волнение на горизонте 0 см, затем – на высоте 40 см, затем – на высоте 30 см, затем – на высоте 20 и 10 см от нулевого горизонта.



Р и с. 4. Калибровка волнографа
F i g. 4. Calibration of the wave gauge

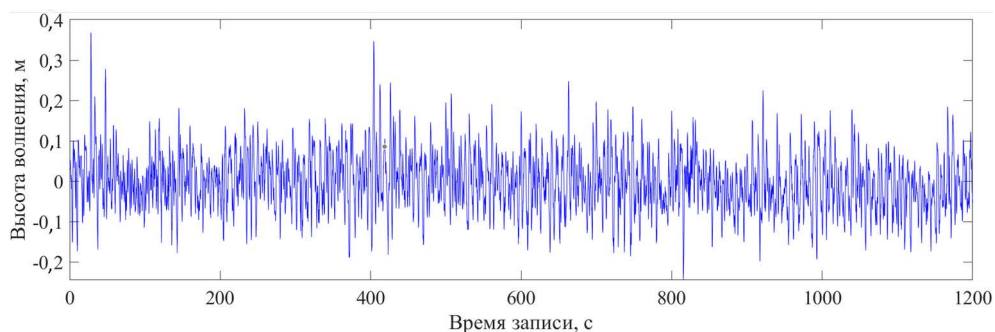
В результате получена калибровочная прямая (рис. 5), точками показаны средние значения напряжения для разных уровней погружения волнографа. Уравнение этой прямой $h = 14,916U - 5,66$ используется для пересчета измеренного напряжения в высоту волны. Среднеквадратическое отклонение калибровочной прямой от экспериментальных точек составляет 3,6 см.

На рис. 6 приведена реализация калиброванного сигнала волнографа за 16.06.24 на полигоне в Геленджике. Длительность реализации равна 20 мин (1200 с).



Р и с. 5. Калибровочная прямая волнографа

F i g. 5. Calibration line of the wave gauge

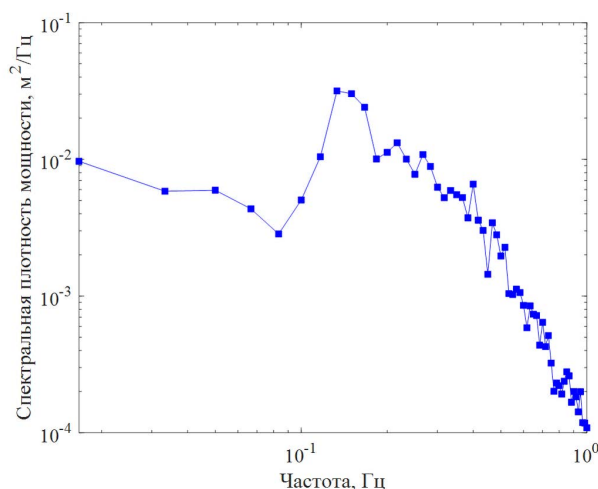


Р и с. 6. Реализация калиброванного сигнала волнографа

F i g. 6. Implementation of the calibrated signal of wave gauge

На рис. 7 показан спектр реализации возвышений волн (согласно рис. 6), полученный усреднением некоррелированных спектров (по непересекающимся реализациям длительностью 60 с). Под спектром подразумевается квадрат модуля преобразования Фурье возвышений волн, или спектральная плотность мощности. На нулевой частоте присутствует узкий пик, который убирается при вычитании средней составляющей сигнала волнографа (рис. 6).

Спектр на рис. 7 узкополосный с пиком на частоте 0,13 Гц и «расширением» у основания в сторону более высоких частот, т. е. в сторону более коротких волн по сравнению с длиной волны, соответствующей спектральному пику. Оценка по дисперсионному соотношению $\omega^2 = gk$ дает значение длины волны спектрального пика ~ 87 м.



Р и с. 7. Спектр возвышений волн, полученный усреднением некоррелированных спектров
F i g. 7. Wave elevation spectrum obtained by averaging the uncorrelated spectra

Выводы

Разработанный макет струнного волнографа с экранированным проводом для измерения волн в пресной и соленой воде имеет большой линейный динамический диапазон и может измерять длины волн от миллиметров до нескольких метров. Была измерена и подтверждена линейность динамического диапазона в струнах длиной до 7 м.

Основное достоинство струнного волнографа с экранированным проводом – отсутствие осаждения солей и замыкания от мелкого проводящего мусора, в результате при длительном нахождении в воде не меняется чувствительность струны.

Наличие емкостного мостика в блоке обработки дает возможность удалить струну от места обработки и записи сигнала, например с помощью интернет-провода длиной ~ 30 м, используя такой же провод в качестве компенсирующей емкости в другом плече мостика. В частности, можно располагать блоки обработки и записи сигнала струны далеко от воды, например на нефтяной платформе.

Предложен способ исключения взаимных наводок между струнами путем применения синхронного детектирования, что позволит создавать автономные решетки для регистрации двухмерного спектра волн. Использование провода МС в струнах с изоляцией из сплошного фторопласта дает возможность измерять уровень жидкости в агрессивных средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуйкова Э. М., Лучинин А. Г., Титов В. И. Определение характеристик пространственно-временных спектров волнения по оптическому изображению морской поверхности // Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21, № 10. С. 1095–1102.
2. Мольков А. А., Долин Л. С. Определение характеристик ветрового волнения по подводному изображению морской поверхности // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 5. С. 617–630.

3. Салин Б. М., Салин М. Б. Комбинированный метод измерения трехмерных спектров волнения. I. Алгоритмы преобразования поля оптической яркости в распределение высот волнения // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 2. С. 123–133. EDN TQMLBF.
4. Смолов В. Е., Розвадовский А. Ф. Применение платформы Arduino для регистрации ветровых волн // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 467–479. EDN AKIIBG. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-467-479>
5. Стерлядкин В. В., Куликовский К. В., Бадулин С. И. Натурные измерения формы морской поверхности и одномерного пространственного спектра волнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 1. С. 270–285. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-1-270-285>
6. Retrieval of the Statistical Characteristics of Wind Waves From the Width and Shift of the Doppler Spectrum of the Backscattered Microwave Signal at Low Incidence Angles / M. Panfilova [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020. Vol. 58, iss. 3. P. 2225–2231. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2955546>
7. Экстремальный черноморский шторм в ноябре 2023 года / В. А. Дулов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 2. С. 325–347. EDN ESLTYQ.
8. Titov V. I., Antonov A. A. Reconstruction of Sea Surface Relief and Sea Wave Spectra Using a Sea Surface Image // Cosmic Research. 2024. Vol. 62 (Suppl 1). S150–S156. <https://doi.org/10.1134/S0010952524601270>
9. Experimental modelling of a multi-use floating platform for wave and wind energy harvesting / J. Sarmiento [et al.] // Ocean Engineering. 2019. Vol. 173. P. 761–773. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.046>
10. Uncertainty Assessment of Wave Elevation Field Measurement Using a Depth Camera / H. Kim [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, iss. 3. 657. <https://doi.org/10.3390/jmse11030657>
11. Измерения спектра волнения на реке с помощью струнного волнографа и акустического волнографа / М. С. Рябкова [и др.] // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва : ИКИ РАН, 2022. С. 209. <https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>

Об авторах:

Зуйкова Эмма Михайловна, ведущий электроник, отдел радиофизических методов в гидрофизике, ИПФ РАН (603950, Россия, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46), **ORCID ID: 0000-0003-0343-8879**, **SPIN-код: 6803-1490**, zuykova@ipfran.ru

Титченко Юрий Андреевич, заместитель заведующего отделом радиофизических методов в гидрофизике, ИПФ РАН (603950, Россия, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-7762-7731**, **SPIN-код: 5168-5939**, yuriy@ipfran.ru

Ковалдов Дмитрий Алексеевич, стажер-исследователь, лаборатория моделирования плазменных геофизических и астрофизических явлений, отдел геофизической электродинамики, ИПФ РАН (603950, Россия, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46), **ORCID ID: 0000-0002-9535-4949**, **SPIN-код: 8709-6624**, d.kovaldov@ipfran.ru

Караев Владимир Юрьевич, заведующий лабораторией анализа и моделирования спутниковых данных, отдел радиофизических методов в гидрофизике, ИПФ РАН (603950, Россия, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4054-4905**, **SPIN-код: 9228-6684**, volody@ipfran.ru

Титов Виктор Иванович, старший научный сотрудник, отдел радиофизических методов в гидрофизике, ИПФ РАН (603950, Россия, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9483-8231**, **SPIN-код: 6304-6773**, titov@ipfran.ru