

ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЧАСТИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «СИГМА-1»

А.Г. Зубов, О.И. Павленко

Морской гидрофизический институт
НАН Украины,
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: dep_turb@mail.ru

Описан многофункциональный комплекс для измерения гидрофизических параметров морской среды. Приведены структурная схема комплекса, его основные технические характеристики и устройство электронной части. Представлены программное обеспечение и структура информационного кадра. Конструкция прибора и сопутствующие программные модули обеспечивают высокое качество получаемой информации и удобство в эксплуатации.

Введение. Одним из самых важных направлений в гидрофизике является исследование процессов вертикального обмена в океане. Сравнительно недавно, в 50-е годы XX в. начали конструировать приборы, измеряющие пульсационные величины гидрофизических параметров, крайне необходимые для описания мелкомасштабных процессов в верхнем слое моря [1, 2].

Наибольшую сложность вызывают, как правило, измерения пульсаций скорости, величины которых могут изменяться в больших пределах: от нескольких метров в секунду (в волновом слое) до нескольких миллиметров в секунду (в придонном слое). Поскольку для современных исследований необходимо одновременное измерение, как пульсационных величин, так и фоновых характеристик, требовалось усовершенствование ранее созданных измерительных систем, которые по своим техническим характеристикам должны обладать более высокими точностью, чувствительностью, быстродействием, пространственно-временным разрешением, максимальной автоматизацией измерений и обработки.

В отделе турбулентности с момента основания МГИ для решения основных научных задач конструировались малоинерционные измерители океанской турбулентности, оснащенные также датчиками

для измерения средних значений и медленных вариаций гидрофизических полей (с частотой ниже 1 Гц) [3–5].

В настоящее время в продолжение традиционного направления исследований в отделе турбулентности создан измерительный комплекс «Сигма-1» [6], соответствующий современным требованиям по точности, чувствительности и по набору измеряемых параметров.

Описание комплекса «Сигма-1».

Многофункциональный измерительный комплекс «Сигма-1», предназначенный для исследования мелкомасштабных процессов в верхнем слое моря, может использоваться в двух режимах работы: позиционном и зондирующем. Позиционный вариант применяется для измерения параметров турбулентности на заданном горизонте вблизи поверхности моря с неподвижного основания (платформа, свайное основание и т.п.), зондирующий – для получения вертикальных разрезов гидрофизических полей до глубины 100 м.

Комплекс состоит из измерительного модуля (имеющего два варианта), кабеля связи и бортового устройства связи. Для регистрации, накопления и обработки полученной информации используется персональный компьютер (ПК).

Комплекс измеряет следующие основные параметры: три компоненты пульсаций вектора скорости течения, температуру и относительную электропроводность в широком частотном диапазоне, а также глубину погружения от поверхности моря. Кроме того, он снабжен системой контроля положения его условной оси относительно магнитного меридиана (азимут) и трехосевым измерителем линейных ускорений. Это позволяет учитывать движения самого комплекса и связывать измеренные величины компонент вектора скорости с неподвижной системой отсчета.

Структурная схема измерительного модуля комплекса «Сигма-1» приведена на рисунке 1. В его состав входят блоки различного функционального назначения: измерители гидрофизических параметров; 16-ти разрядный многоканальный дифференциальный аналого-цифровой преобразователь; системный контроллер; контроллер кабельной связи; преобразователь питающих напряжений.



ИПВСТ – измеритель пульсаций вектора скорости течения;
 ИТ – измеритель температуры и её пульсаций;
 ИЭП – измеритель электропроводности и её пульсаций;
 ИГД – измеритель гидростатического давления;
 ИАУ – измеритель азимутального угла;
 ИЛУ – измеритель линейных ускорений;
 АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
 ППН – преобразователь питающего напряжения.

Рисунок 1 – Структурная схема измерительного модуля

Измеритель пульсаций вектора скорости течения (ИПВСТ) используется для исследования пространственно-временных характеристик поля скорости течений и способен работать в потоках, обтекающих его с любого направления [6]. Конструктивно ИПВСТ выполнен в виде автономного блока, содержащего:

- сферический трехосевой восьмипротрочный электромагнитный датчик пульсаций скорости диаметром 3 см;
- блок инструментальных усилителей в электромагнитном экране;
- блок сумматоров и фильтров.

На выходе ИПВСТ образуются три аналоговых сигнала с напряжениями $\pm 10\text{ В}$, пропорциональных амплитудам трёх компонент вектора скорости течения u , v , w . Диапазон измеряемых скоростей $0,002$ – 2 м/с . Питание измерителя осуществляется постоянным током с напряжением $\pm 12 \text{ В}$.

Для измерения температуры в соответствующем канале использован термисторный датчик, заключенный в защитную медную трубку размером $0,5 \times 2,0 \text{ мм}$, с толщиной стенки $0,05 \text{ мм}$. Использование термистора обусловлено необходимостью иметь минимальные размеры и небольшую постоянную времени датчика.

В канале электропроводности для измерения используется точечный чувствительный элемент из золота. Выбор такого

элемента обусловлен требованием малого объема осреднения датчика. С целью минимизации влияния электрохимических процессов, происходящих на электроде датчика, частота питания датчика электропроводности выбрана достаточно высокой (500 кГц).

Применённые в каналах температуры и электропроводности датчики обладают высокой чувствительностью и небольшими размерами, но их недостаток – невысокая стабильность. Поэтому необходима регулярная тарировка этих каналов и привязка к гидрологическим данным, полученным прецизионными CTD-зондами. В этом случае канал температуры обеспечивает погрешность порядка $\pm 0,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при разрешающей способности $0,0005 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а канал относительной электропроводности дает погрешность $\pm 0,01$ при разрешающей способности $0,0001$. Постоянная времени датчика температуры менее 15 мс.

Канал гидростатического давления выполнен на мостовом датчике "кремний на сапфире" Д-1. Для температурной коррекции его показаний используется вспомогательный канал температуры датчика давления (параметром, характеризующим температуру, является общее сопротивление моста датчика), а сама коррекция производится при обработке результатов измерений. Данный канал гидростатического

давления позволяет измерять глубину погружения зонда от 0 до 100 м с погрешностью $\pm 0,1$ м.

Канал линейных ускорений реализован на паре двухосевых акселерометров ADXL202E и датчике температуры, используемом для температурной компенсации. Канал позволяет измерять линейные колебания прибора в диапазоне ± 2 г с погрешностью ± 2 mg (RMS) и определять углы крена и дифферента прибора в пределах $\pm 180^\circ$ с погрешностью $\pm 0,25^\circ$ и разрешением $\pm 0,1^\circ$.

В канале азимута используется магнитный карманный компас в карданном подвесе со съемом информации о положении картушки датчиками Холла. При переводе данных измерительной части схемы непосредственно в азимут (градусы) используется метод отношений квадратурных составляющих, позволяющий исключить влияние на показания прибора многих факторов, с последующим табличным переводом непосредственно в градусы. Это позволило избавиться от нелинейности данного компаса, но наличие у используемого компаса значительного гистерезиса, не позволило достичь точности менее $\pm 5^\circ$.

Канал связи «Сигма-1» обеспечивает передачу информации и питание прибора по одному двухпроводному кабелю, в качестве которого используется полевой телефонный кабель П-274, защищенный и усиленный специально изготовленной ка-проновой оплеткой. Высокая механическая прочность и водостойкость кабеля совместно с оплёткой позволяют использовать его и как линию связи, и как груzonесущий трос (для зондирующего варианта).

Данный канал связи создавался на основе стандарта ГОСТ 26765.52-87 «Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей» (зарубежный аналог – MIL-1553). В связи с особенностями применения канала связи, а именно: сигнал и питание по одним проводам и относительно невысокими скоростями обмена, электрические, скоростные и конструктивные параметры интерфейса были соответствующим образом изменены, при этом сохранился способ кодирования и логический протокол обмена. В данном канале используется способ кодирования информации методом «Манчестер-2» и скорость передачи данных 50 кбит/с (допус-

тимо до 1 Мбит/с). Отсутствие в информационном сигнале постоянной составляющей позволяет без затруднений разделять сигнал и питание, передающиеся по одной паре проводов. Форматы информационных посылок обеспечивают двунаправленную передачу данных между бортовым компьютером и несколькими приборами (моно-канал). Испытания на кабеле длиной 200 м показали достаточно устойчивую работу этого канала, т.к. потеря данных не наблюдалось. Кроме того, были проведены испытания при работе с эквивалентом вышеуказанного кабеля. Устойчивая связь наблюдалась до 1,5 км без регулировки порогов приемника, оптимизированных для 200 м указанного кабеля.

Бортовое устройство связи обеспечивает подачу питания, прием информации с измерительного модуля и передачу принятой информации в ПК по каналу RS-232. Это устройство обеспечивает прием кадра данных, сформированного в измерительном модуле «Сигма-1», и осуществляет его проверку (под кадром здесь понимается совокупность принимаемых параметров, соответствующих данному моменту времени, и служебная информация). В случае соответствия информационная часть принятого кадра передается в ПК, в случае несоответствия – принятый кадр игнорируется.

При передаче информации применяется кодирование, аналогичное используемому в протоколе X-25. Данный метод позволяет обеспечить четкую синхронизацию передаваемых кадров вне зависимости от передаваемой информации.

Программное обеспечение для приема и обработки информации. Программное обеспечение комплекса осуществляет прием, накопление, отображение получаемой информации. Программа приема написана на языке С и ассемблере, работает под операционной системой MS-DOS. Поступающие с измерительного модуля данные после предварительной обработки отображаются на экране монитора в реальном режиме времени в графическом и цифровом виде.

Одновременно отображаются 15 параметров на пяти диаграммах. Длина движущихся графиков на экране соответствует 30 с.

Кроме того, все средние величины, а также, глубина, напряжение питания, количество принятых и записанных кадров, текущие время, дата и прочие служебные параметры отображаются в цифровом виде.

Для привязки получаемых данных к текущей гидрологической обстановке производится параллельный прием, фиксация и отображение данных от прибора «Восток-М», который обеспечивает измерение направления и скорости течения, средних величин температуры и относительной электропроводности с высокой точностью.

Визуализация данных в реальном времени позволяет своевременно и быстро реагировать на изменившиеся условия в процессе работы и корректировать положение прибора, ход эксперимента. Поскольку для правильной и точной оценки полученной информации важно знать и напряжение питания, в реальном времени производится его контроль и выдается визуальное и звуковое предупреждение о несоответствии рабочему значению. Анало-

гично выдается предупреждение об аварийном состоянии в случае обнаружения затекания прибора и превышении максимально допустимой глубины.

Исходная информация в кодах хранится в отдельных файлах, имена которых формируются автоматически из даты и номера постановки.

Для первичной статистической обработки полученной информации создана программа на языке Borland Pascal. Программа выполняет распаковку исходных кодов данных, осуществляет контроль, перевод их в физические величины, рассчитывает соленость, плотность, потенциальную температуру, формирует новый кадр, который состоит из 14 или 17 столбцов параметров в физических величинах (таблица 1) и записывает полученные данные в файл. Гидрофизические параметры: соленость S , условная плотность ρ , потенциальная температура морской воды T_{rot} рассчитываются в соответствии с рекомендациями [7].

Таблица 1 – Формат кадра параметров комплекса «Сигма-1» в физических величинах

1 <i>N</i>	2 <i>u</i>	3 <i>v</i>	4 <i>w</i>	5 <i>T</i>	6 <i>C</i>	7 <i>H</i>	8 <i>Ax</i>	9 <i>Ay</i>	10 <i>Az</i>	11 <i>Ta</i>	12 <i>Azim</i>	13 <i>Kr</i>	14 <i>Dif</i>	15 <i>S</i>	16 <i>ρ</i>	17 <i>Trot</i>
Номер кадра	Пульсационные значения компонентов скорости u, v, w , температуры T , относительной электропроводности C	Zначения гидростатического давления (глубины) H , линейных ускорений Ax, Ay, Az , температуры акселерометров Ta , азимута $Azim$	Zначения крена Kr , дифферента Dif	Zначения солености S , плотности ρ , потенциальной температуры $Trot$												

Для обработки требуется предварительная подготовка дополнительных файлов: файла с градуировочными коэффициентами перевода кодов в физические величины; файлов-таблиц для расчета азимута, крена и дифферента. При первичной обработке и распаковке производится контроль достоверности принятых кодов по нескольким параметрам: длине посылки; величине напряжения питания; дополнительному циклическому номеру кадра (0 – 255), что позволяет контролировать и восстанавливать сбойные (потерянные) значения кодов пульсационных величин на протяжении 1,6 с. Дальнейшая статистическая обработка осуществляется программой, написанной с использованием пакета MatLab, которая состоит из набора подпро-

грамм (функций), объединенных единым графическим пользовательским интерфейсом, и позволяет:

- преобразовывать файлы исходных данных различных форматов, объединять и сохранять файлы;
- пересчитывать данные пульсаций вектора скорости в неподвижную систему отсчета;
- строить графики физических величин;
- использовать широкий набор фильтров;
- рассчитывать и строить гистограммы, спектральные характеристики и прочее.

Работа с любой программой производится в диалоговом режиме, удобна для пользователя и требует минимальной специальной подготовки.

Апробация прибора. Стендовые и натурные испытания показали надежность созданного комплекса «Сигма-1».

Опыт использования измерительного комплекса «Сигма-1» показал его хорошие эксплуатационные свойства. Высокое качество получаемой информации обеспечивалось надежной работой электроники и канала связи.

В результате анализа материалов натурных и стендовых испытаний установлено:

- датчик ИПВСТ сохранил свои характеристики, ухудшения изоляции электродов и коррозии магнитов не обнаружено;
- характер полученных реализаций трёх компонент вектора скорости течения u , v , w при проведении экспериментов свидетельствует о том, что датчик и электроника ИПВСТ функционируют нормально;
- вид спектров трёх компонент вектора скорости течения, пульсаций температуры и электропроводности не противоречит их теоретическому представлению, как было показано в [8];
- значения солености и плотности, полученные с использованием данных каналов средней температуры, электропроводности и гидростатического давления, соответствуют текущей гидрологической обстановке.

Проведенное сопоставление данных, полученных комплексами «Сигма» и «Баклан» (Атлантического отделения Института океанологии РАН) во время экспедиции на НИС «Акванавт» выявило их количественное и качественное согласие.

Модульная конструкция комплекса позволяет проводить дальнейшее совершенствование отдельных каналов, не внося изменений в другие. Развитие современных технологий и появление новых датчиков и электронных компонентов позволят улучшить характеристики прибора и расширить его возможности.

Выводы. На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Комплекс «Сигма-1» может использоваться для решения широкого спектра научных задач.
2. Комплекс позволяет получать данные о гидрофизических характеристиках морской среды, а программное обеспечение – оперативно их обрабатывать.

3. Электронная часть комплекса функционирует надежно и обеспечивает получение достоверной информации.

4. Блочная конструкция модулей комплекса позволяет проводить модернизацию отдельных электронных блоков без изменений других, входящих в состав модулей.

Л и т е р а т у р а

1. А.Г. Колесников, Н.А. Пантелеев, Ю.Г. Пыркин, В.П. Петров, В.Н. Иванов. Аппаратура и методика регистрации турбулентных микропульсаций температуры и скорости течений в море // Известия АН СССР. Серия геофизическая. – 1958. – № 3. – С. 405 – 413.
2. А.Г. Колесников, Н.А. Пантелеев, В.Д. Писарев, П.В. Вакулов. Глубоководный автономный турбулуметр – прибор для регистрации турбулентных флюктуаций скорости и температуры в океане // Океанология. – 1963. – Т. 3, вып. 5. – С. 911 – 921.
3. А.Г. Колесников, Н.А. Пантелеев, Г.Ю. Аретинский, В.З. Дыкман. Аппаратура для измерения турбулентных пульсаций скорости течения и температуры на больших глубинах океана // Методы и приборы для исследования физических процессов в океане, 1966. – Т. 36. – С. 15 – 25.
4. А.Г. Колесников. (ред.) Современная аппаратура для океанографических исследований. – Изд. МГИ АН УССР, Севастополь, 1970. – 194 с.
5. А.С. Монин, Р.В. Озмидов. Океанская турбулентность. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 320 с.
6. В.З. Дыкман, О.И. Ефремов. Электромагнитный датчик для измерения флюктуаций вектора скорости течения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ – Гидрофизика, 2000. – С. 318 – 324.
7. П.А. Калашников. Первичная обработка гидрологической информации // Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – С. 152.
8. А.С. Самодуров, В.З. Дыкман, В.А. Барабаш, О.И. Ефремов, А.Г. Зубов, О.И. Павленко, А.М. Чухарев. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря // Мор. гидрофиз. журнал. 2005. № 5. С. 65 – 71.