

УДК 621.391.64

# ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С БУКСИРУЕМОЙ АНТЕННОЙ

**И. Л. Рубанов, Ю. А. Стефанов, Т. В. Егоров, А. Н. Коровин,  
Ю. А. Шелепов, М. Ю. Шелепов, А. Ю. Бухинник, П. Е. Щербатый**

ОАО «Концерн «Океанприбор»<sup>1</sup>  
Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича<sup>2</sup>

Рассмотрены результаты разработки цифровой волоконно-оптической системы передачи информации (ВОСПИ) для применения в составе гидроакустической станции с гибкой протяженной буксируемой антенной. ВОСПИ включает в себя основной канал и канал «горячего» резервирования. Изготовлен макет дуплексной схемы передачи данных по одиночному одномодовому волоконному световоду на длинах волн 1,31 мкм и 1,55 мкм. Принципиальной особенностью разработанной системы передачи информации является организация синхронного дуплексного канала сбора данных и управления на основе асинхронных Ethernet-протоколов.

## ВВЕДЕНИЕ

Гидроакустическая станция (ГАС) с гибкой протяженной буксируемой антенной (ГПБА) представляет собой комплекс аппаратуры, включающей в себя буксируемую часть с акустоэлектронной аппаратурой и бортовую часть с аппаратурой обработки полученной информации. Между собой обе части соединены линией связи, включающей в себя стационарный кабель, проложенный по кораблю-носителю, и кабель-буксир, входящий в состав лебедки спускоподъемного устройства [1]. В настоящее время передача данных от ГПБА в аппаратуру обработки осуществляется в электрическом виде с использованием токопроводящих жил электрических кабелей.

С появлением технологии волоконно-оптической связи наблюдается ее интенсивное внедрение во многие технические приложения, находящие-

ся за рамками традиционных телекоммуникационных задач. Такие основополагающие преимущества ВОСПИ, как высокая скорость передачи информации, малые потери в линии и электромагнитная защищенность оптического канала связи, позволяют быстро передавать большие объемы информации и надежно соединять волоконно-оптическим кабелем устройства сбора и устройства обработки информации, отстоящие друг от друга на значительные расстояния.

Поэтому применение ВОСПИ в корабельной гидроакустике, в частности в гидроакустической станции с цифровой гибкой протяженной буксируемой антенной [2], дает возможность технического совершенствования ГАС по следующим направлениям:

– увеличение числа акустических приемников до нескольких сотен штук в составе одной антенны;

– расширение частотного и динамического диапазонов принимаемых сигналов;

– использование векторных приемников акустических сигналов;

– создание ГПБА нового поколения – многолинейных и многорядных антенн;

– уменьшение диаметра кабель-буксира и его массы;

– увеличение длины кабель-буксира для обеспечения возможности буксировки антенны на больших отдалениях от корабля, снижая тем самым влияние собственных шумов корабля на принимаемые сигналы.

ВОСПИ для ГАС с ГПБА должна обеспечить передачу сигналов управляющих команд

<sup>1</sup> 197376, Санкт-Петербург, Чкаловский пр-т, д. 46. Тел.: 8 (812) 4997479, тел./факс: 8 (812) 4997569; тел.: 8 (812) 4997410, тел./факс: 8 (812) 2306459. E-mail: mfp@mail.wplus.net

<sup>2</sup> 190008, Санкт-Петербург, Наб. р. Мойки, д. 61. Тел./факс: 8 (812) 3129265. E-mail: spdllis@sut.ru

и синхросигнала частоты дискретизации  $F_d$  из центрального вычислительного комплекса (ЦВК) в буксируемую антенну, а в обратном направлении осуществить передачу больших массивов оцифрованных данных от акустических приемников и датчиков системы ориентации (СО) антенны.

Структурная схема ВОСПИ для гидроакустической станции с ГПБА представлена на рис.1.

Бортовая (1) и антенная (2) аппаратура ВОСПИ соединяются между собой одномодовыми волоконными световодами, входящими в состав корабельного кабеля стационарной прокладки (8) и комбинированного кабель-буксира (9). Так как к ВОСПИ предъявляется требование повышенной надежности, то в ней предусматривается резервирование канала связи. Резервирование обеспечивается тем, что бортовая и антенная части ВОСПИ содержат дублирующие приемопередающие модули, а стационарный корабельный кабель и кабель-буксир включают в себя резервные волоконные световоды. Бортовая секция ВОСПИ включает в себя драйвер (7) управления приемопередающими модулями основного (5) и резервного каналов (4), а также элементы (12) (разъемные или сварные) соединений волоконных световодов и волоконных компонен-

тов. В свою очередь, приемопередающие модули каждого канала состоят из оптоэлектронного передатчика (13), оптоэлектронного приемника (14) и мультиплексора-демультиплексора (15), обеспечивающего возможность объединять или разделять по волоконным световодам оптические излучения разных длин волн – 1,31 мкм и 1,55 мкм. Бортовая секция ВОСПИ имеет стык протокола Ethernet-1000TX для передачи к ЦВК потока данных от акустических приемников, стык протокола RS-232 для передачи к ЦВК потока данных СО, а также вход сигнала частоты дискретизации  $F_d$  аналого-цифровых преобразователей (АЦП) антенной аппаратуры. Комплекс аппаратуры бортовой секции ВОСПИ располагается в посту гидроакустика.

Узел оптического перехода (3) ВОСПИ выполняет функцию сопряжения световодов стационарного кабеля и кабель-буксира. Узел оптического перехода (3) включает одноканальный модуль вращающегося оптического перехода (10) и волоконные разветвители-объединители Y-типа (11). Разветвители-объединители обеспечивают сведение и разделение волоконных световодов основного и резервного каналов при прохождении через модуль

вращающегося перехода. Узел оптического перехода входит в состав комбинированного тросъемника лебедки спускоподъемного устройства (СПУ), расположенного на корме корабля.

Кабель-буксир и сочлененная с ним ГПБА в транспортном состоянии уложены на барабан СПУ. Процесс постановки антенны в рабочее положение включает в себя сматывание ГПБА и кабель-буксира с барабана СПУ и последующую буксировку за кораблем на удалении, определяемом длиной выпущенного кабель-буксира.

Антенная секция ВОСПИ также содержит приемопередающие модули основного (5') и резервного каналов (4'), драйвер (6) управления приемопередающими модулями и электронный коммутатор (16). Электронный коммутатор обеспечивает стык протокола Ethernet-1000TX с пятью независимыми протоколами Ethernet-100TX каналов цифровых данных от аналого-цифровых преобразователей (АЦП) акустических приемников антенны, с протоколом RS-485 канала обмена информацией с датчиками СО, имеет выход импульсов частоты дискретизации  $F_d$  для синхронизации схем АЦП и до 8 выходов потенциальных управляющих

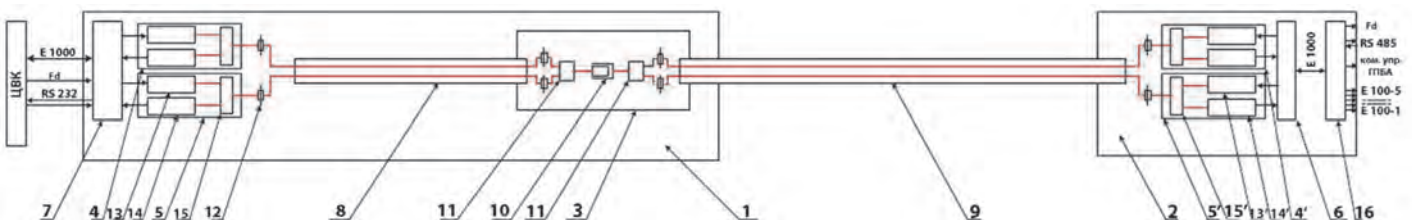


Рис. 1. Структурная схема ВОСПИ для ГАС с ГПБА: 1 – аппаратура ВОСПИ бортовой части; 2 – аппаратура ВОСПИ антенной части; 3 – оптический переход в составе лебедки спускоподъемного устройства; 4, 4' – бортовой и антенный приемопередающие модули резервного канала; 5, 5' – бортовой и антенный приемопередающие модули основного канала; 6 – драйвер управления антенными приемопередающими модулями; 7 – драйвер управления бортовыми приемопередающими модулями; 8 – кабель корабельный стационарный; 9 – кабель-буксир; 10 – модуль вращающийся оптический; 11 – волоконный разветвитель-объединитель; 12 – разъемные или сварные соединения волоконных световодов; 13, 13' – оптический передатчик (ОТр) бортовой и антенной частей ВОСПИ; 14, 14' – оптический приемник (ОПр) бортовой и антенной частей ВОСПИ; 15, 15' – волоконный мультиплексор-демультиплексор бортовой и антенной частей ВОСПИ; 16 – антенный коммутатор каналов

команд. Приемопередающие модули основного и резервного каналов также включают в себя оптические передатчики (13'), оптические приемники (14'), а также мультиплексоры-демультиплексоры (15'). Антенная часть ВОСПИ расположена в концевой секции кабель-буксира, в месте сопряжения кабель-буксира с телом ГПБА.

ВОСПИ реализует дуплексный режим работы со спектральным мультиплексированием на одиночном одномодовом волоконном световоде. Он заключается в том, что информационные потоки распространяются по одиночному волоконному световоду одновременно и независимо друг от друга в прямом и обратном направлениях на двух несущих рабочих длинах волн оптического излучения 1,31 мкм и 1,55 мкм. «Горячее» резервирование каналов связи подразумевает возможность автоматического переключения с одного канала на другой при наступлении следующих негативных случаев: увеличения оптических потерь или обрыва волоконного световода работающего канала, выхода из рабочего режима (деградации) оптоэлектронного передатчика (ОТр) или оптоэлектронного приемника (ОПр) работающего канала. Переключение неисправного приемопередающего модуля на резервный в антенной секции ВОСПИ производится автоматически, а в бортовой секции осуществляется вручную.

Особенностью разработки ВОСПИ для ГПБА является то, что часть ВОСПИ, входящая в состав забортной аппаратуры ГПБА, эксплуатируется в гораздо более жестких условиях, чем противоположная бортовая часть ВОСПИ. Антенная часть

ВОСПИ должна удовлетворять условиям применения по группе исполнения 2.1.5 ГОСТ РВ.20.39.304–98, то есть аппаратуры, работающей непосредственно в воде, в то время как бортовая часть должна удовлетворять условиям применения по группе исполнения 2.1.1. К тому же к антенной части ВОСПИ предъявляются требования по минимизации массогабаритных размеров и энергопотребления.

Для рассматриваемой ВОСПИ были разработаны протоколы передачи информации и структуры линейных сигналов, отвечающие требованиям синхронной передачи пакетов данных. Информация по волоконно-оптическому тракту в обоих направлениях передается пакетами, структура которых соответствует стыку протоколов Ethernet-II-Ipv4-UDP в линейном коде 8B10B по стандарту 1000Base-LX (IEEE.802.3.2005) со скоростью 1,25 Гбит/с [3]. Для поддержания синхронизма и контроля исправности ВОСПИ в соответствии с протоколом IEEE.802.3.2005 в паузах между пакетами по линии связи непрерывно передаются кодовые сигналы паузы передачи (IDLE).

Система работает следующим образом. Из ЦВК на драйвер (7) управления бортовыми приемопередающими модулями поступают синхроимпульсы требуемой частоты дискретизации  $F_{\phi}$  (12..48 кГц) для обеспечения работы устройств аналогоцифрового преобразования сигналов акустических приемников буксируемой антенны. В драйвере при регистрации фронта импульса  $F_{\phi}$  начинает формироваться текущий пакет данных для передачи в антенную часть ВОСПИ. Формируе-

мые пакеты имеют фиксированную структуру и длительность с информационным блоком длиной 64 байта. Информационный блок пакета представляет собой виртуальный контейнер для передачи в антенную часть команд на систему ориентирования и управляющих команд, поступающих от ЦВК через стык Ethernet-1000TX или через стык RS-232 системы ориентации. Если команды СО и/или команда управления к моменту формирования очередного пакета не поступали, передается пустой пакет, в противном случае в виртуальный контейнер пакета загружается полученная команда. Сформированные пакеты данных кодируются линейным кодом 8B10B и в последовательном формате поступают на вход оптоэлектронного передатчика ОТр (14) задействованного канала связи.

В секции антенного приемопередающего модуля (5') кодированные пакеты данных, поступающие с выхода оптического приемника ОПр (14'), преобразуются в параллельный формат и декодируются. При регистрации стартовой посылки пакета на выходе  $F_{\phi}$  формируется импульс сигнала дискретизации длительности 2 мкс в уровнях LVDS для схем АЦП сигналов гидроакустических приемников. Таким образом, обеспечивается синхронизация по частоте АЦП антенного оборудования с сигналом  $F_{\phi}$  бортовой части системы. Из виртуального контейнера пакета извлекаются команды СО и команды управления антенны. Команды СО передаются в аппаратуру системы ориентации через стык RS-485, где по полученным командам управления формируются соответствующие логические уровни сигналов 0 или 3В.

В аппаратуре ГПБА по импульсу частоты дискретизации запускаются процедуры аналого-цифрового преобразования сигналов гидроакустических приемников. По окончании преобразования оцифрованные сигналы акустических приемников передаются в антенный коммутатор каналов (16) в пакетах данных по 5 электрическим линиям связи Ethernet-100TX (E100-1..E100-5). В антенном коммутаторе каналов информация из поступающих пакетов в течение периода дискретизации накапливается в буферной памяти. По окончании накопления данных начинается формирование UDP-пакета данных для передачи в бортовую часть. Формируемый пакет имеет фиксирован-

ные структуру и длительность. Информационная часть пакета длиной 1345 байт имеет 5 виртуальных контейнеров по 256 байт каждый для переноски информации, полученной от АЦП антенны за период дискретизации соответственно по 5 каналам Ethernet-100TX, и виртуальный контейнер длиной 63 байта для передачи ответов на команды СО, поступивших на момент начала формирования пакета по линии связи RS-485. В UDP-пакетах используются широковещательные MAC и IP-адрес назначения.

Сформированный пакет кодируется кодом 8B10B и в последовательном формате поступает на вход оптического передатчика ОТр (13').

В бортовой части ВОСПИ пакеты данных, поступающие с выхода оптического приемника ОПр (14), преобразуются в параллельный код, декодируются и далее транслируются в электрический стык Ethernet-1000T для передачи на ЦВК. Кроме того, данные, полученные в виртуальном контейнере пакета СО, передаются в последовательный стык RS-232.

Электронные блоки антенной и бортовой частей реализованы аппаратно-программным методом на базе ПЛИС фирмы «Altera» серии Cyclone III [4] и 8-разрядными универсальными микроконтроллерами ATmega-8A фирмы «Atmel» [5]. Конструктивно аппаратура антенной секции ВОСПИ выполнена в виде двух модулей в металлических герметичных корпусах цилиндрической формы с габаритами  $110 \times \varnothing 32$  мм, а аппаратура бортовой – на плате «Евромеханика-6U».

На основе описанных выше технических решений был изготовлен и протестирован макет ВОСПИ (рис. 2). Фото фрагмента антенной секции ВОСПИ представлено на рис. 3.

По результатам тестирования макета следует отметить, что заложенные принципы построения ВОСПИ позволили создать линию связи, обладающую рядом достоинств.

1. Динамический диапазон по оптическому затуханию сигнала (при вероятности ошибки передачи на бит не хуже  $10^{-11}$ ) составляет 17 дБ, что является хорошим показателем оценки «бюджета» ВОСПИ.

2. Малое энергопотребление, а именно электрическая мощность потребления бортовой и антенной секций ВОСПИ, измеренная на макете, составила соответственно 5,8 Вт и 4 Вт.

3. Примененный принцип синхронизации сигналов от ги-

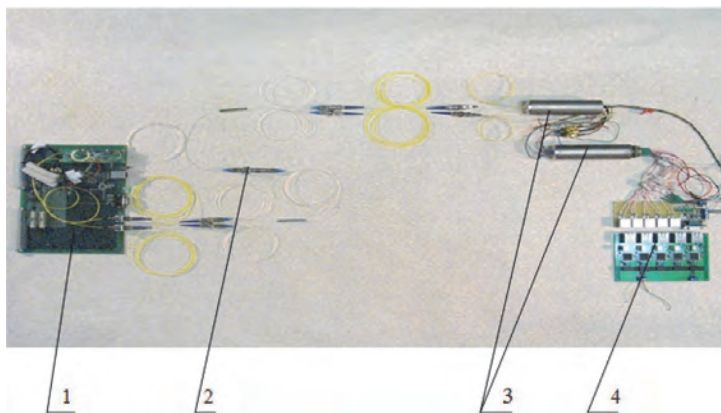


Рис. 2. Фото макета ВОСПИ: 1 – бортовая секция ВОСПИ с приемопередающими модулями, 2 – модуль вращающийся оптический, 3 – антенная секция ВОСПИ с приемопередающими модулями и антенный коммутатор каналов, 4 – электронный стенд тестирования макета ВОСПИ с имитацией пяти независимых каналов от ГПБА

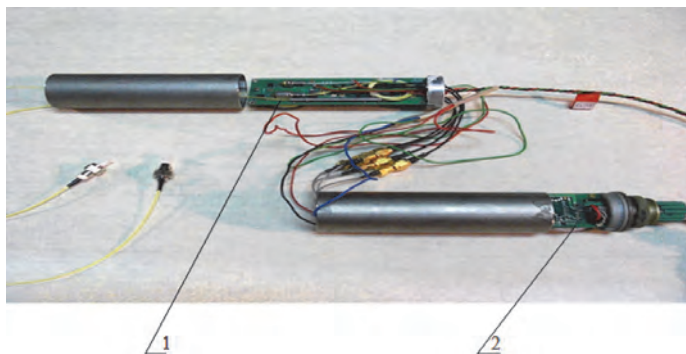


Рис. 3. Фото антенных сборок модулей и коммутатора каналов в корпусах: 1 – антенные приемопередающие модули, 2 – антенный коммутатор каналов

дроакустических приемников (без создания выделенного канала синхронизации) по стартовым посылкам принятых пакетов обеспечивает малые фазовые дрожания (джиттер) сигнала синхронизации АЦП антенны. Совокупные фазовые дрожания складываются из временных погрешностей регистрации фронтов синхроимпульсов  $F_{\phi}$  в бортовой секции и регистрации стартовых посылок пакета в антенной секции ВОСПИ, джиттера задающих генераторов бортовой и антенной секций ВОСПИ и допол-

нительного джиттера, возникающего в оптическом тракте. При использованных в системе высокостабильных кварцевых генераторах частоты 125 МГц теоретический предел пикового джиттера (без учета джиттера оптического тракта) составляет  $\pm 8$  нс. Пиковый джиттер, измеренный на макете системы, в совокупности составил  $\pm 18$  нс, что в пересчете на наибольший период частоты дискретизации, равной 48 кГц, составляет  $\pm 0,09\%$ . Это существенно лучше нормативных требований цифровых ГАС.

4. Стандартные структуры пакетов и стандартные скорости передачи данных существенно упрощают наладку и испытания составных блоков аппаратуры ВОСПИ.

5. Горячее резервирование канала ВОСПИ успешно реализовано в макете. При нарушении оптического соединения световодов в одном из каналов ВОСПИ происходит автоматическое переключение передачи на резервный канал ВОСПИ, при этом не нарушается конфигурация Ethernet-соединения и не происходит заметной потери данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 410 с.
2. Андреев М. Я., Виноградов А. В., Рубанов И. Л., Стефанов Ю. А. Волоконно-оптический тракт передачи информации гидроакустической станции с буксируемой антенной // Гидроакустика. СПб., 2009. Вып. 9. С. 87–95.
3. IEEE Std 802.3–2005. Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications, N.Y., 2006
4. Cyclone III Device Handbook. Altera Corporation [Electronic resource], Режим доступа: [http://www.altera.com/literature/hb/cyc3/cyclone3\\_handbook.pdf](http://www.altera.com/literature/hb/cyc3/cyclone3_handbook.pdf)
5. ATmega-8A Datasheet. Atmel Corporation. [Electronic resource], Режим доступа: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-8159-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8A\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8159-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8A_datasheet.pdf)

