

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 681.883 + 551.48.03

**ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КЛАСТЕРА НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА
МАСШТАБА КУБИЧЕСКОГО КИЛОМЕТРА НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ**

© 2013 г. А. В. Аврорин, В. М. Айнутдинов, R. Bannasch*, И. А. Белолоптиков**,
Д. Ю. Богородский***, В. Б. Бруданин**, Н. М. Буднев***, О. Н. Гапоненко,
А. Р. Гафаров***, К. В. Голубков, Т. И. Гресь***, И. А. Данильченко,
Ж.-А. М. Джилкибаев, В. И. Добрынин***, Г. В. Домогацкий, А. А. Дорошенко,
А. Н. Дьячок***, В. А. Жуков, А. В. Загородников***, В. Л. Зурбанов***,
В. А. Карнаухов****, А. Г. Кебкал*, К. Г. Кебкал*, А. М. Клабуков, В. А. Кожин****,
К. В. Конишев**, А. В. Коробченко***, Ф. К. Кошель, А. П. Кошечкин, Л. А. Кузьмичев****,
В. Ф. Кулепов****, Д. А. Кулешов, В. И. Ляшук, М. Б. Миленин****, Р. Р. Миргазов***,
Э. А. Осипова****, А. И. Панфилов, Л. В. Паньков***, Г. Л. Паньков***,
А. А. Перевалов***, Д. П. Петухов, Е. Н. Плисковский**, В. А. Полещук***,
М. И. Розанов****, В. Ю. Рубцов***, Е. В. Рябов***, А. В. Скурихин****,
О. В. Суворова, Б. А. Таращанский***, С. В. Фиалковский****, Б. А. Шайбонов**,
А. А. Шейфлер**, С. Г. Яковлев*

Институт ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

**EvoLogics GmbH*

Deutschland, D-13355, Berlin, Ackerstrasse, 76

***Объединенный институт ядерных исследований*

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

****Иркутский государственный университет*

Россия, 664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

*****НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына*

Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Россия, 119992, Москва, Воробьевы горы, 1, стр. 2

******Нижегородский государственный технический университет*

Россия, 603950, Н. Новгород, ул. Минина, 24

******Санкт-Петербургский государственный морской технический университет*

Россия, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

Поступила в редакцию 30.07.2012 г.

В настоящее время сотрудничеством “Байкал” ведутся работы по созданию глубоководного нейтринного телескопа NT1000 с эффективным объемом ~2 км³ на оз. Байкал. Телескоп будет состоять из функционально независимых установок — кластеров гирлянд оптических модулей на основе фотоэлектронных умножителей (по 8 гирлянд в каждом кластере). Начиная с 2011 г. на оз. Байкал ведутся натурные испытания базовых элементов и систем будущего телескопа в составе автономных измерительных комплексов — прототипов кластера NT1000. В статье описаны базовые элементы и принципиальная схема функционирования одного из рассматриваемых в настоящее время вариантов акустической системы позиционирования телескопа NT1000 и приводятся результаты испытаний прототипа этой системы в составе экспериментального кластера 2012 года.

DOI: 10.7868/S0032816213040034

ВВЕДЕНИЕ

Успешная эксплуатация на протяжении более чем десяти лет нейтринных телескопов первого поколения (Байкальского нейтринного телескопа NT200/NT200+, нейтринных телескопов AMANDA

на Южном полюсе и ANTARES в Средиземном море) и достигнутые в этих экспериментах уровни чувствительности к природным потокам нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, которые примерно на два порядка превышают чувстви-

тельности наиболее крупных подземных детекторов, со всей очевидностью продемонстрировали эффективность метода детектирования нейтрино и других элементарных частиц в естественных средах. В то же время результаты, полученные в экспериментах на нейтринных телескопах первого поколения, явились мотивацией разработки и создания нейтринных телескопов с характерным масштабом порядка кубического километра, которые позволят повысить чувствительность к природным потокам нейтрино более чем на порядок величины.

В настоящее время сотрудничеством «Байкал» ведутся работы по созданию нейтринного телескопа НТ1000 на оз. Байкал с эффективным объемом $\sim 2 \text{ км}^3$ [1–3]. Телескоп будет состоять из функционально независимых установок – кластеров гирлянд оптических модулей на базе фотоэлектронных умножителей (по 8 гирлянд в каждом кластере).

Неотъемлемой частью НТ1000 является гидроакустическая система позиционирования, предназначенная для определения координат фотодетекторов телескопа. Необходимость такой специализированной измерительной системы в составе нейтринного телескопа обусловлена тем обстоятельством, что в отличие от подземных или наземных детекторов космических лучей расположение фотодетекторов глубоководных нейтринных телескопов невозможно зафиксировать в определенном положении.

Даже в условиях развертывания с ледового покрова на оз. Байкал постановка буйковых станций с фотодетекторами телескопа не может быть осуществлена с точностью лучше, чем несколько десятков сантиметров. Более того, расположение оптических модулей изменяется в процессе эксплуатации телескопа под воздействием подводных течений. Вместе с тем эффективное восстановление событий, регистрируемых нейтринным телескопом, предполагает достаточно точное знание пространственных координат элементов установки.

Масштабом требуемой точности измерения координат является размер фотодетектора, который для разных типов ф.э.у. составляет 200–370 мм. С другой стороны, характерная точность измерения времени системами телескопа составляет несколько наносекунд, что соответствует расстояниям в несколько десятков сантиметров при распространении света в воде. Таким образом, точность измерения координат оптических модулей нейтринного телескопа НТ1000 должна быть не хуже 10–20 см.

Ключевыми элементами любой гидроакустической длиннобазовой системы позиционирования (д.б.с.п.) являются базовые приемопередающие акустические модули, координаты которых

известны, а расстояния между которыми образуют базовые линии д.б.с.п., и акустические модули, устанавливаемые в пространственных точках, координаты которых следует определить в результате измерений. Набор базовых линий большой длины, т.е. длины, соизмеримой с дальностью до объекта позиционирования, образует длиннобазовую антенну. Координаты объекта позиционирования рассчитываются методом трилатерации.

Текущие пространственные координаты оптических модулей нейтринного телескопа НТ200 определялись гидроакустической системой ГАСИК [4], которая успешно функционирует в составе Байкальского нейтринного телескопа уже более 15 лет. В системе ГАСИК узкополосные акустические приемопередатчики закреплены на кабель-тросах, несущих оптические модули телескопа НТ200/НТ200+. Координаты этих передатчиков (наклонные дальности) определяются относительно системы автономных гидроакустических маяков, расположенных вблизи дна озера вне телескопа.

В данной работе обсуждается альтернативная системе ГАСИК д.б.с.п., в которой используется функция цифровой гидроакустической связи между модулями системы, совмещенная с функцией позиционирования. Наличие гидроакустической связи позволяет быстро позиционировать произвольно размещенные базовые модули системы, оперативно формируя длиннобазовую антенну, и осуществлять передачу данных на большие расстояния через последовательность гидроакустических модулей, а также проводить другие измерения без изменения конфигурации системы, например измерения скорости звука.

В настоящее время в мировой практике акустическая связь используется только в короткобазовых антеннах как дополнительная опция и активизируется переключением режима позиционирования на режим связи. В рассматриваемой д.б.с.п. используются широкополосные акустические модемы S2C компании EvoLogics, позволяющие реализовать систему позиционирования с расширенными возможностями, повышенной помехоустойчивостью и повышенной точностью определения координат по сравнению с известными системами.

Для объединения функций позиционирования и цифровой гидроакустической связи на программном уровне разработан D-MAC-протокол обмена цифровой информацией на основе так называемого MAC-протокола (гибридный MAC-протокол канального уровня общего назначения [5, 6]), реализующий гибридный метод управления доступом к среде. В рассматриваемой системе с объединением функций позиционирования и акустической связи применен сферический метод позиционирования, используется один и тот же электроакустический тракт для приема и передачи сигналов, один и тот же модуль обработки

сигналов, а также установлен режим обмена цифровой информацией между базовыми станциями и объектами позиционирования.

В апреле 2012 года на оз. Байкал был введен в эксплуатацию экспериментальный кластер, содержащий три гирлянды оптических модулей. Комплекс измерительных систем экспериментального кластера включает в себя тестовый вариант обсуждаемой в этой работе системы позиционирования, содержащей 9 приемопередающих модулей. В данной работе представлены первые результаты, полученные в апреле–мае 2012 г. по исследованию поведения гирлянд оптических модулей экспериментального кластера с помощью тестовой д.б.с.п. с широкополосными гидроакустическими приемопередатчиками и совмещением функций позиционирования и акустической связи.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Сведения о современных методах реализации д.б.с.п. представлены в обзорах [7, 8]. Задача гидроакустического позиционирования сводится в основном к измерению времени распространения акустического сигнала между объектом позиционирования и базовыми станциями и пересчете этих времен в дальности с учетом скорости звука в воде. При этом точность позиционирования объектов зависит от степени неоднородности водной среды, особенностей многолучевого распространения акустического сигнала, скорости движения объектов позиционирования и отражающих границ [9].

На точность позиционирования также влияет наличие и качество текущих данных по изменению скорости звука $c(z)$ с глубиной z по мере того как меняется давление (P), температура (T) и соленость среды (S) в месте проведения измерений. Известно несколько аналитических выражений полученных из анализа экспериментальных данных (например, [10]), которые позволяют рассчитать величину скорости звука по данным о T , S и P . Соленость S вод озера Байкал очень мала, сухой остаток в среднем составляет 95 мг/л и варьируется не более чем на 30% от максимальной величины. В частности, вклад солености в величину скорости звука в Байкале, рассчитанной по формуле из работы [10], составляет около 12 см/с с возможными вариациями порядка 4 см/с.

Для определения абсолютных значений скорости звука в районе расположения Байкальских нейтринных телескопов были проведены специальные эксперименты, которые показали, что в диапазоне глубин z от 500 м до дна озера зависимость скорости звука от глубины может быть описана следующим аналитическим выражением:

$$c(z), \text{ м/с} = 1418.96 + 0.0153645z$$

с точностью не хуже 30 см/с и наилучшим образом согласуется с результатами расчета по формуле для скорости звука из работы [10] при подстановке в нее данных по глубинной зависимости температуры из работы [11].

По данным многолетнего мониторинга температурного режима глубинных вод, исключая придонный слой толщиной порядка 50 м, на глубинах больше 500 м колебания температуры воды не превышают нескольких сотых долей градуса, что приводит к очень редким изменениям скорости звука на величину не более 10 см/с. В придонном слое толщиной порядка 10 м возможны вариации температуры вплоть до 0.1°C или скорости звука порядка 0.5 м/с.

Функционирование д.б.с.п. предполагает решение следующих задач: измерение вертикального разреза скорости звука (в.р.с.з.), измерение времени прихода излученного импульса, сбор промежуточных или окончательных результатов измерений на одной из станций д.б.с.п. или объекте позиционирования и, на основе этих данных, оценка положения объекта позиционирования в географических или местных координатах. Знание в.р.с.з. позволяет рассчитывать траектории распространения звука [12]. Компенсация непрямолинейности траекторий для известного в.р.с.з. повышает точность измерений, но требует повышенной вычислительной мощности измерителя [13].

Погрешность измерения времени распространения сигнала определяется свойствами акустического тракта, особенностями реализации приемопередающих устройств и доступа к среде. Время распространения сигнала измеряется при его прохождении от источника до приемника и обратно (двусторонняя задержка) или только от источника до приемника (односторонняя задержка). При измерении двусторонней задержки часы источника и приемника сигнала могут быть не синхронизированы, в то время как при измерении односторонней задержки синхронизация часов источника и приемника сигнала обязательна. В любом случае для измерения задержки распространения сигнала требуется управление доступом к среде.

Измерение двусторонней задержки требует более частого доступа к измерительной аппаратуре по сравнению со случаем измерения односторонней задержки. При этом изменяющееся взаимное положение источника и приемника сигнала может существенно влиять на результат измерения: погрешность измерения становится пропорциональной величине взаимных смещений за время распространения сигнала в оба конца. С другой стороны, измерение односторонней задержки, требующее точной синхронизации часов, имеет погрешность, связанную с дрейфом тактового генератора, например, из-за влияния температуры. На практике

дрейф тактового генератора может оказывать значительное влияние на точность позиционирования.

Гидроакустические системы позиционирования можно разделить на несколько типов в зависимости от длины базовой линии антенны, метода измерения времени распространения акустического сигнала, наличия базовых станций на поверхности, оснащенных приемниками GPS, или наличия мобильных базовых станций. К одному из этих типов относится д.б.с.п. со стационарными базовыми станциями, развернутыми на дне с длиной базовой линии от 50 до 2000 м [8], к другому типу — д.б.с.п. с мобильными базовыми станциями, которые, как правило, размещаются на поверхности с включением в состав буев интегрированных приемников GPS (так называемые “GPS интеллектуальные буи” [14]). Такие д.б.с.п. основаны на измерении односторонних задержек распространения сигнала от объекта позиционирования до базовых станций или в обратном направлении. К третьему типу относятся смешанные д.б.с.п., которые включают в себя базовые станции, расположенные как на дне, так и на поверхности водоема.

Стационарные д.б.с.п. обеспечивают высокую точность позиционирования при условии выполнения точной геодезической привязки базовых станций на дне, что, как правило, осуществляется с поверхности водоема и поэтому представляет собой достаточно трудоемкую операцию. При использовании автономных донных станций время их работы ограничивается временем работы автономного источника питания.

Д.б.с.п. с размещением базовых станций на поверхности водоемов дают меньшую точность, но позволяют питать их от возобновляемых источников, использующих энергию ветра и солнца, а также применить радиоканал для связи между базовыми станциями и точного определения положения базовых станций (по GPS). Однако поверхностные станции слабо защищены от внешних воздействий, что ограничивает возможные области их применения.

Системы гидроакустического позиционирования могут быть активными или пассивными в зависимости от свойств объектов позиционирования, которые могут либо принимать, либо излучать акустические сигналы. Пассивные системы разрешают доступ к среде распространения сигнала только для базовых станций. В работе [8] дан подробный обзор пассивных систем позиционирования.

По способу формирования д.б.с.п. можно разделить на одноступенчатые и многоступенчатые. Одноступенчатые д.б.с.п. оценивают положение объекта на основе прямого обмена сигналами между ним и базовыми станциями. Многоступенчатые д.б.с.п. имеют промежуточный этап, на кото-

ром один из объектов позиционирования после определения собственной позиции временно становится базовой станцией для последующего определения позиций других объектов позиционирования, которые не были первоначально включены в систему базовых станций [15].

Наибольший интерес для позиционирования оптических модулей глубоководных нейтринных телескопов и ряда других применений представляют разработки, направленные на расширение функциональных возможностей д.б.с.п. путем комбинирования функции активного позиционирования и цифровой гидроакустической связи, а также обеспечивающие доступ к каналу распространения сигнала как базовым станциям, так и объектам позиционирования [16]. Описываемая в данной работе система позиционирования реализует эти достижения в развитии д.б.с.п.

D-МАС-ПРОТОКОЛ

Для объединения функций позиционирования и цифровой гидроакустической связи на программном уровне был разработан D-МАС-протокол обмена цифровой информацией на основе так называемого МАС-протокола (гибридный МАС-протокол канального уровня общего назначения, реализующий гибридный метод управления доступом к среде, описание которого дано в работах [5, 6]). Основная особенность D-МАС-протокола состоит в комбинировании различных алгоритмов доступа к среде. В частности, для передачи больших объемов данных используется специализированный алгоритм, учитывающий задержки распространения сигнала в канале и осуществляющий “переплетение” встречных потоков данных [17]. В D-МАС-протоколе использованы алгоритмы обмена данными, свойственные гидроакустическим системам связи технологии S2C [18]. В соответствии с этим поддерживаются данные двух типов [5], а именно: срочные сообщения (пакеты небольшой длины с фиксированной невысокой скоростью кодирования) и потоковые данные (пакеты большей длины с адаптивной, высокой скоростью кодирования).

Для передачи потоковых данных устанавливаются соединения, в ходе которых определяются параметры канала связи. Программный алгоритм управления потоками данных оптимизирует эффективность гидроакустического канала, повышая скорость передачи до максимально возможного значения [17]. Все получаемые по каналу данные динамически делятся на пакеты сравнительно небольшой длины в зависимости от параметров канала, заносятся в буфер и передаются потребителю в исходном виде.

D-МАС протокол имеет дополнительные программные интерфейсы, обеспечивающие применение специфических пользовательских прото-

колов управления доступом к среде. В частности, в состав протокола D-MAC входят шесть типов срочных сообщений, три из которых являются синхронными. Протоколы верхнего уровня устанавливают последовательности меток времени приема/передачи синхронных срочных сообщений, позволяющих использовать собственные алгоритмы доступа к среде, например, узлов гидроакустической сети.

Для передачи срочных сообщений пакетами небольшой длины инициализация соединения не требуется и используется фиксированная (невысокая) скорость передачи данных. Также не требуется и адаптация скорости передачи к параметрам канала. В работе [17] показано, что при малой длине сообщения время доставки срочного сообщения меньше, чем при доставке такого же сообщения по любому из протоколов передачи потоковых данных, требующих адаптации к каналу.

Доставка срочных сообщений не прерывает передачу потоковых данных, так как срочные сообщения доставляются как фрагменты последовательности служебного сообщения. Срочное сообщение может иметь длину порядка 10^2 бит и передаваться с фиксированной скоростью, приемлемой для широкого спектра параметров гидроакустического канала [5]. С другой стороны, время передачи пакета не должно превышать время когерентности канала [19], и тогда скорость передачи должна быть достаточно высокой, чтобы длина сообщения соответствовала временным ограничениям гидроакустического канала.

Протокол физического уровня на основе технологии S2C [18] предоставляет возможность надежной передачи срочных сообщений с фиксированной скоростью передачи. Это относится и к каналам с высокой динамикой характеристик, в частности к горизонтальным каналам небольшой глубины в процессе перемещения приемного и передающего устройств.

Доставка асинхронных срочных сообщений осуществляется на основе метода АЛОНА, эффективного в отсутствие обмена потоками данных между узлами гидроакустической сети. Асинхронные срочные сообщения также могут доставляться как часть служебных сообщений, сопровождающих доставку пакетов потоковых данных.

Управление доступом к каналу для передачи синхронных срочных сообщений осуществляется с помощью протоколов более высокого уровня, чем канальный. В частности, протокол D-MAC предоставляет пользовательский интерфейс, позволяющий протоколам более высокого уровня обеспечивать синхронизацию с физическим уровнем, например задавать время отправки срочных сообщений и получать время поступления ответного сообщения в приемный тракт (передача син-

хронных срочных сообщений при обмене потоковыми данными не предусмотрена).

Синхронные ширококвотельные срочные сообщения (с.ш.с.с.) отправляются по требованию протокола более высокого уровня и не требуют получения подтверждения о доставке (передача с.ш.с.с. также не предусмотрена при обмене потоковыми данными). Передача с.ш.с.с. начинается либо сразу после запроса протокола более высокого уровня, либо в другой момент времени, определяемый этим протоколом.

В последнем случае начало передачи определяется в виде суммы времени τ и некоторой задержки отправки δ , так что передача с.ш.с.с. начинается в момент $\tau + \delta$. Протокол D-MAC передает значение задержки δ в составе с.ш.с.с. вместе с другой информацией получателю сообщения. После завершения передачи D-MAC отправляет протоколу более высокого уровня отчет с меткой начала передачи с.ш.с.с. Протокол D-MAC на стороне получателя декодирует сообщение, отмечает метку времени приема μ и возвращает его протоколу верхнего уровня вместе с декодированным сообщением и значением задержки δ .

СФЕРИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЛИННОБАЗОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Д.б.с.п. может быть создана на основе сферического или гиперболического метода позиционирования [20]. В данной работе использован сферический метод позиционирования, который основан на измерении времени распространения акустических сигналов между базовыми станциями и объектом позиционирования с последующим вычислением координат объекта с помощью трилатерации. Управление процессами измерений осуществляется D-MAC-протоколом и пользовательским интерфейсом, который позволяет протоколам более высокого уровня обеспечивать обмен и синхронизацию передачи данных с физическим уровнем с помощью синхронных ширококвотельных срочных сообщений.

В этом разделе приведено описание алгоритма обмена с.ш.с.с., реализующего сферический метод длиннбазового позиционирования, который обеспечивает измерение всех взаимных задержек распространения между базовыми станциями, а также между каждой из базовых станций и объектом позиционирования.

Задержки распространения

Как упоминалось выше, задержка распространения сигнала может быть измерена при одностороннем или двустороннем обмене сигналами между базовыми станциями и объектом позиционирования. При одностороннем обмене требуется точная син-

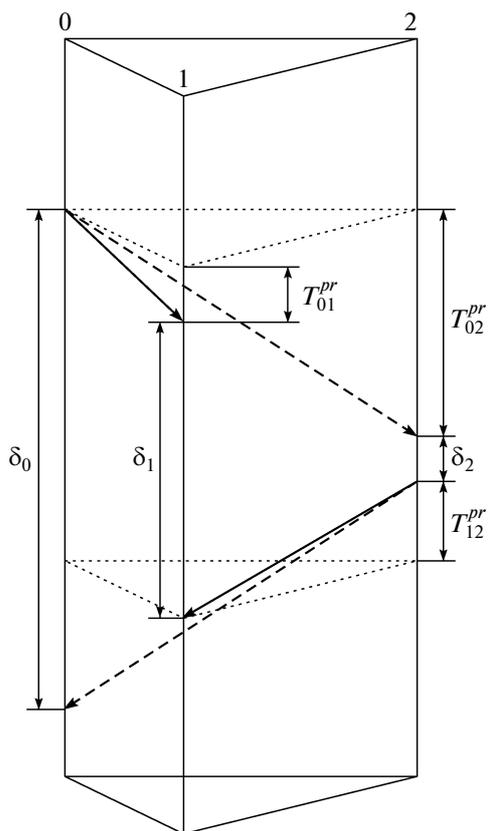


Рис. 1. Эскиз пространственно-временной диаграммы локализации объекта позиционирования.

хронизация между базовыми станциями и объектом позиционирования. Это требование трудно выполнимо для большинства практических задач. По этой причине, использование двустороннего обмена является предпочтительным.

Рассмотрим схему обмена сообщениями, которую иллюстрирует рис. 1. Здесь цифрами 0 и 1 обозначены базовые станции, цифрой 2 – объект позиционирования. Базовая станция 0 (гидроакустический модем 0) отправляет сообщение, объект позиционирования (гидроакустический модем 2) измеряет время приема этого сигнала и отправляет ответное сообщение с некоторой задержкой δ_2 . Значение задержки отправки δ_2 передается как часть ответного сообщения.

Базовая станция 0 измеряет время приема и оценивает задержку распространения сигнала (см. рис. 1):

$$T_{02}^{pr} = (\delta_0 - \delta_2)/2. \quad (1)$$

В случае базовой станции 1

$$T_{01}^{pr} + \delta_1 = T_{02}^{pr} + \delta_2 + T_{12}^{pr}. \quad (2)$$

В результате задержка распространения T_{12}^{pr} между модемами 1 и 2 может быть получена из выражения

$$T_{12}^{pr} = T_{01}^{pr} + \delta_1 - (\delta_0 + \delta_2)/2. \quad (3)$$

Задержка распространения T_{01}^{pr} между базовыми станциями предполагается известной. Для завершения оценки задержки распространения между станциями 1 и 2 значение δ_0 должно быть передано станции 1.

Другим вариантом является передача значения $\gamma_{12} = T_{12}^{pr} + \delta_0/2$ базовой станции 0. Этот вариант будет рассмотрен ниже.

Цикл обмена сообщениями

Пусть длиннобазовая антенна состоит из N базовых станций и M объектов позиционирования. Цикл обмена сообщениями начинается с передачи с.ш.с.с. одной из базовых станций (стартовой станцией). Получив начало с.ш.с.с., инициирующего цикл, каждый объект позиционирования определяет интервалы времени для отправки своего ответа. Таким образом формируется временная цепочка обмена сообщениями. Базовые станции получают с.ш.с.с. от всех объектов позиционирования и оценивают дальности до них. Затем они передают оценки этих дальностей стартовой станции. В зависимости от исполнения д.б.с.п. такая передача может осуществляться по гидроакустическому каналу, радиоканалу или кабелю.

Позиционирование одного объекта требует передачи двух с.ш.с.с. и доставки $N - 1$ значений τ_{i1} от i -й базовой станции к стартовой станции, где индексом 1 обозначен первый объект позиционирования. Позиционирование дополнительного (j -го) объекта, требует передачи одного с.ш.с.с. и $N - 1$ значений τ_{ij} от всех базовых станций к стартовой базовой станции. Значения τ_{ij} для фиксированного числа i могут доставляться одним сообщением, поэтому количество пакетов, доставляемых стартовой станции, остается неизменным. Один цикл позиционирования M объектов требует передачи $M + 1$ с.ш.с.с. и $N - 1$ пакетов с M значениями задержек τ_{ij} в каждом из них. Если базовые станции размещены на дне моря для автономной работы, то доставка τ_{ij} может выполняться по гидроакустическому каналу. В этом случае в конце цикла обмена сообщениями стартовая базовая станция получает значения задержек τ_{ij} путем передачи потоковых данных, предусмотренных D-MAC-протоколом.

Рассмотрим настройку задержки отправки д.б.с.п. Задержка отправки с.ш.с.с. должна быть определена как функция, которая зависит от сетевого адреса станции и, дополнительно, от специального кода, включенного в состав обмениваемых сообщений. Например, с.ш.с.с. может включать в себя последовательность адресов станций или хэш-код последовательности, в частности, для предопределения порядка обмена между станци-

ями. В простейшем случае каждая станция вычисляет задержку передачи для отправки ответа путем умножения порядкового номера сообщения на максимально возможное значение задержки распространения для данной конфигурации длиннбазовой антенны. Эта функция известна всем станциям гидроакустической сети.

После завершения цикла обмена стартовая станция получает все задержки распространения между объектами позиционирования и базовыми станциями. Этим данным достаточно для оценки положения объектов позиционирования, предполагая прямолинейное распространение сигнала в гидроакустическом канале. Если в.р.с.з. известен, позиции объектов могут быть рассчитаны по более сложному алгоритму, учитывающему непрямолинейность траекторий распространения сигнала.

Алгоритмы определения положения объекта позиционирования

Как показано в работах [13, 21], упрощающее предположение о прямолинейном распространении сигнала не обеспечивает высокой точности позиционирования. В свою очередь оценка формы траектории при известном в.р.с.з. обеспечивает более высокую точность.

В работе [13] использовалась трассировка лучей по методу, изложенному в работе [12], основанному на решении системы уравнений для траектории распространения сигнала. Основная идея этого алгоритма состоит в расчете поверхностей, имеющих равное удаление для каждой из базовых станций, и вычислении положения цели как точки, в которой сумма квадратов расстояний до всех таких поверхностей минимальна. Хотя этот алгоритм дает высокую точность оценки позиции, его вычислительная трудоемкость очень высока.

В работе [21] представлен другой подход, в котором в.р.с.з. аппроксимируется несколькими линейными участками. Идея состоит в построении траектории распространения сигнала в стратифицированной среде, состоящей из нескольких слоев, в пределах которых скорость звука не меняется. Этот подход позволяет добиться такой же точности, как в работе [13], но имеет существенно меньшую вычислительную сложность.

В работе [12] система уравнений, описывающих траекторию распространения сигнала, представлена в следующем виде (уравнения даны в цилиндрической системе координат, где r обозначает горизонтальное удаление, а z – глубину):

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{1}{c(r, z)} \frac{dr}{ds} \right) = - \frac{1}{c^2(r, z)} \nabla c(r, z), \quad (4)$$

где $r = [r(s), z(s)]$ – координата, задаваемая функцией длины дуги s ; $r(s)$ – смещение по горизонта-

ли; $z(s)$ – смещение по вертикали; $c(r, z)$ – скорость звука.

Уравнения могут быть упрощены до уравнений первого порядка введением переменных $\rho(s)$, $\zeta(s)$, пропорциональных вектору касательной в данной точке:

$$\frac{dr}{ds} = c\rho(s), \quad (5)$$

$$\frac{d\rho}{ds} = - \frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial r}, \quad (6)$$

$$\frac{dz}{ds} = c\zeta(s), \quad (7)$$

$$\frac{d\zeta}{ds} = - \frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (8)$$

Предполагается, что скорость звука c меняется только с глубиной, поэтому начальными условиями являются

$$r(0) = r_s, \quad z(0) = z_s, \quad (9)$$

$$\rho(0) = \cos(\alpha)/c(0), \quad \zeta(0) = \sin(\alpha)/c(0), \quad (10)$$

где r_s и z_s обозначают положение источника сигнала, α – угол по отношению к горизонтальной плоскости, проходящей через соответствующую базовую станцию.

Пусть задержка распространения между базовой станцией i и объектом позиционирования j равна τ_{ij} и определена в ходе обмена с.ш.с.с. по алгоритму, описанному выше. Если акустическая волна излучается базовой станцией в момент времени $t = 0$, то поверхность, равноудаленная от данной базовой станции, определяется как множество точек, которые эта волна достигает в момент времени $t = \tau_{ij}$.

Кроме того, пусть так же, как в работе [13], в.р.с.з. не меняется при горизонтальном смещении от базовой станции, тогда существует осевая симметрия линий удаления от базовой станции. Назовем сечение этой поверхности в плоскости горизонта изолинией дальности. Изолиния дальности может быть получена путем задания угла α в системе уравнений для траектории распространения сигнала. Сделаем упрощающее предположение, что с увеличением угла α глубина изолинии дальности изменяется монотонно.

Начальное приближение положения цели может быть получено в рамках прямолинейной модели распространения сигнала c . Эта модель предполагает, что звук распространяется прямолинейно с некоторой средней скоростью. Наклонная дальность между базовой станцией и объектом позиционирования равна

$$R_{ij}^{(0)} = \tau_{ij}c, \quad (11)$$

где i – индекс базовой станции, j – индекс объекта позиционирования. Это значение должно быть определено для каждой из базовых станций.

Положение объекта оценивается путем трилатерации. Обозначим координаты начального при-

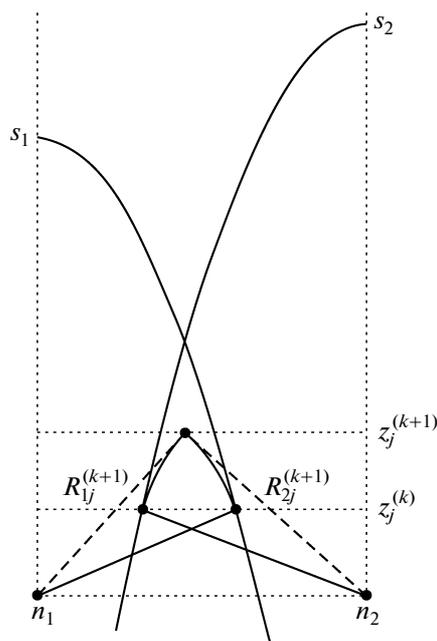


Рис. 2. Иллюстрация к уточнению положения объекта позиционирования (в плоскости).

ближения для положения объекта позиционирования $(x_j^{(0)}, y_j^{(0)}, z_j^{(0)})$. Найдем наклонные дальности от базовой станции i до объекта позиционирования j с использованием системы уравнений для траектории распространения сигнала со следующими граничными условиями:

$$r(0) = 0, \quad z(0) = z_i, \quad z(s_{ij}) = z_j^{(k)}, \quad (12)$$

где r – горизонтальное удаление; z – глубина; s_{ij} – длина дуги в момент времени τ_{ij} ; $z_j^{(k)}$ – значение z -координаты объекта позиционирования, полученное на k -ой итерации уточнения положения объекта позиционирования. Уравнение (11) с граничными условиями (12) может быть решено с использованием метода деления отрезка пополам, изменяя угол α в пределах $(-90^\circ, +90^\circ)$. Решение существует, если $z_j^{(k)}$ лежит внутри интервала глубин, соответствующих границам угла α .

Упрощающее предположение, предложенное выше, обеспечивает сходимость алгоритма. Пары (α, z) , получаемые в ходе деления отрезка попо-

Таблица 1. Геодезическая привязка базовых станций на дне

№ устройства	x (север), м	y (восток), м	z (глубина), м
1	-124.3	47.8	1356.9
4	-126.4	7.6	1357.0
7	-134.0	146.4	1357.4

лам, могут сохраняться и использоваться для уточнения первоначального интервала в ходе следующей итерации уточнения положения объекта позиционирования. В результате решение задачи может быть получено в виде $(r_{ij}^{(k+1)}, z_j^{(k+1)})$. Наклонная дальность на итерации $k+1$ равна

$$R_{ij}^{(k+1)} = \sqrt{(z_j^{(k+1)})^2 + (r_{ij}^{(k+1)})^2}. \quad (13)$$

Рис. 2 иллюстрирует процесс уточнения положения объекта позиционирования в плоскости (S_1 и S_2 – изолинии дальностей от станций n_1 и n_2 ; j – индекс объекта).

На итерации $k+1$ находятся точки на изолиниях дальности, соответствующих глубине $z_j^{(k)}$, а затем определяются наклонные дальности $R_{1j}^{(k+1)}$ и $R_{2j}^{(k+1)}$ между базовыми станциями и объектом позиционирования.

С определением новой наклонной дальности наряду с $(k+1)$ -м уточнением глубины $z_j^{(k+1)}$ определяются новые координаты объекта позиционирования. Итерационный процесс прерывается при выполнении одного из следующих условий:

- $\|z_j^{(k+1)} - z_j^{(k)}\| < \varepsilon$, где ε – некоторое наперед заданное малое значение;
- максимальное число итераций k_{\max} достигнуто;
- решение краевой задачи не существует для заданных значений задержки распространения сигнала;
- трилатерация невозможна для заданных значений задержки распространения сигнала.

По завершении итерационного процесса по упрощенному алгоритму получаем такую же точность определения координат объекта позиционирования, как в работе [13].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В апреле 2012 года на озере Байкал был развернут и введен в эксплуатацию модернизированный экспериментальный кластер телескопа НТ1000, включающий в себя д.б.с.п., являющуюся тестовым вариантом системы позиционирования НТ1000. Д.б.с.п. экспериментального кластера нейтринного телескопа состоит из девяти гидроакустических модемов: три из них формируют донную длиннобазовую антенну, а шесть других устройств являются объектами позиционирования (маяки-ответчиками), размещенными на трех гирляндах оптических модулей. Базовые станции прикреплены к якорям гирлянд кластера. Геодезическая привязка базовых станций (по отношению к реперу) была проведена непосредственно после развертывания кластера с поверхности льда, и ее результаты представлены в табл. 1. В табл. 2 приводятся номер гирлянды и глубина расположения каждого из девяти гидроакустических модемов.

Гидроакустическая система запускается по командам из берегового центра управления нейтринным телескопом с помощью берегового и подводного компьютеров по оптоэлектронному кабелю, связывающему береговой центр и прототип кластера НТ1000. Ниже представлены результаты анализа данных д.б.с.п., накопленных за период с 6 апреля по 4 мая 2012 года. За это время было проведено более 65 тысяч циклов измерений с периодом в 30 с.

В результате многолетнего мониторинга физических параметров воды в районе постановки Байкальского нейтринного телескопа было установлено, что сезонные колебания скорости звука в этом районе не превышают 0.1 м/с. Исходя из этого при обработке данных д.б.с.п. экспериментального кластера 2012 года координаты объектов позиционирования оценивались в предположении, что скорость звука на разных глубинах, представляющих практический интерес, не меняется со временем и соответствует в.р.с.з., измененному в начале апреля 2012 года.

Результаты измерения координат

На рис. 3 представлены результаты измерения координат x , y , z маяка-ответчика № 2 (высота над грунтом 431 м), откуда следует, что в период с 6 по 22 апреля происходили лишь незначительные изменения координат маяка-ответчика (в пределах одного метра). После 22 апреля ситуация изменилась. В течение 5 дней зафиксированы существенные изменения координат маяка-ответчика. Смещения маяка-ответчика № 2 от устойчивого положения достигали 7 м.

Таблица 2. Расположение акустических устройств

z (глубина), м	Гирлянда	Устройство
929	3	№ 2
1094	3	№ 3
1271	3	№ 5
1357 (дно)	2	№ 4
1197	1	№ 6
1357 (дно)	1	№ 1
1196	2	№ 8
1216	Лазер	№ 9
1357 (дно)	Лазер	№ 7

На рис. 4 представлены кривые перемещения маяка-ответчика № 2 в плоскости (x, y) . Устойчивое положение маяка-ответчика находится в окрестности точки с координатами (104.1 м, 29.6 м) — в подавляющем большинстве случаев отклонения от этой точки не превышают одного метра. В период наибольшей динамики, с 22 по 27 апреля, маяк-ответчик испытывает быстрые изменения положения с отклонениями от этой точки в восточном направлении до координат (105.5 м, 36.5 м). Размер пятна, в пределах которого мог находиться маяк-ответчик, превышал 8 м по сечению запад-восток и 3 м по сечению север-юг.

Результаты измерения координат x , y , z остальных маяков-ответчиков демонстрируют аналогичные смещения от устойчивого положения, достигающие 9 м, в тот же период времени (22–27 апреля 2012 года).

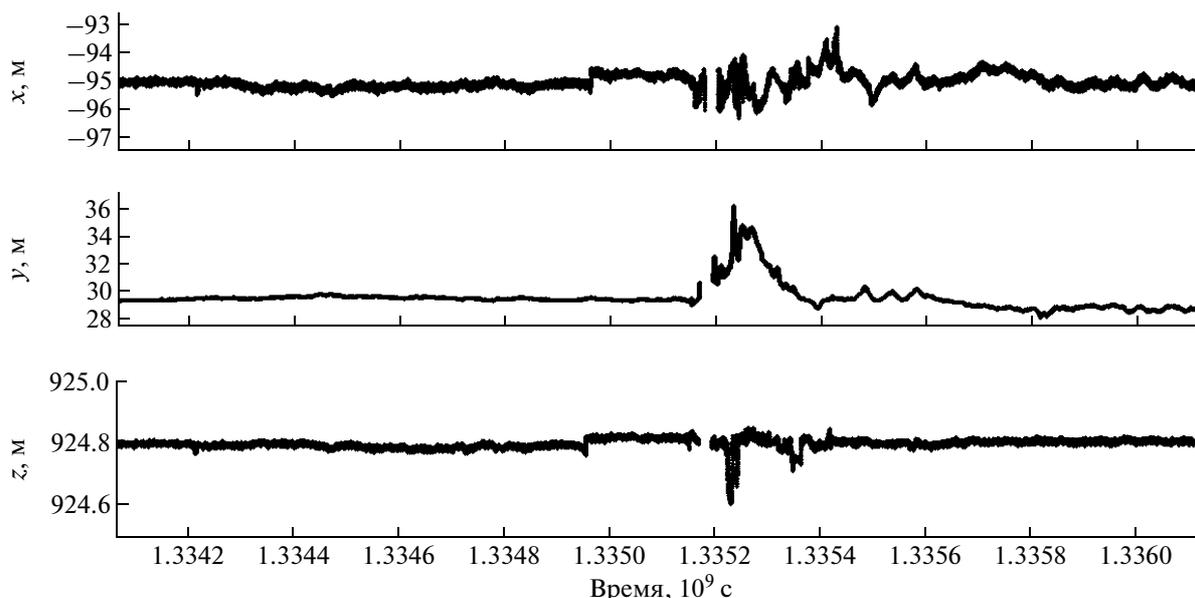


Рис. 3. Координаты x , y , z маяка-ответчика № 2.

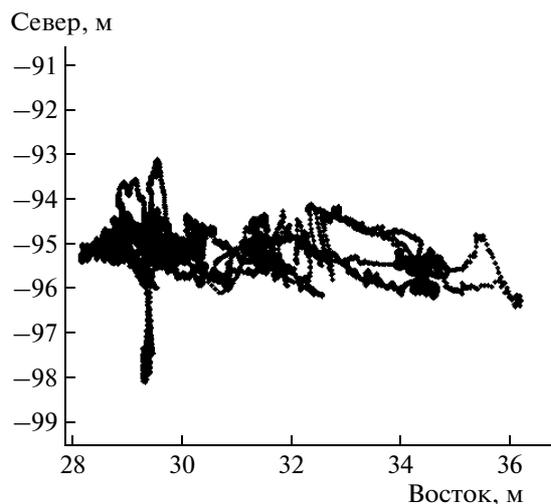


Рис. 4. Кривая перемещения маяка-ответчика № 2.

На рис. 5 приводятся y -координаты положения маяков-ответчиков № 2, № 3 и № 5, расположенных на гирлянде 3, в зависимости от времени наблюдения. Как следует из этого рисунка, перемещения маяков-ответчиков на разных глубинах хорошо согласованы. Из сопоставления аналогичных кривых для маяков-ответчиков, расположенных на других гирляндах, следует хорошая согласованность перемещений всех маяков-ответчиков на всех гирляндах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в работе алгоритм приема/передачи цифровой информации, основанный на протоколе D-MAC, позволил создать цепь обмена синхронными широкополосными срочными сообщениями между гидроакустическими модемами технологии S2C производства компании EvoLogics и таким образом обеспечить точные измерения задержек распространения сигналов в гидроакустическом канале. Объединение функций позиционирования и гидроакустической цифровой связи на основе широкополосных акустических модемов компании EvoLogics S2C и использование разработанных программных алгоритмов и протокола обмена данными, реализующих на канальном уровне протокол D-MAC, позволили создать надежную долговременную гидроакустическую систему позиционирования экспериментального кластера нейтринного телескопа NT1000.

Предложенный в работе метод учета нелинейности траекторий распространения сигнала, основанный на решении системы уравнений с граничными условиями, задаваемыми на основе упрощающих предположений о характеристиках среды распространения сигнала, позволил добиться высокой точности позиционирования при

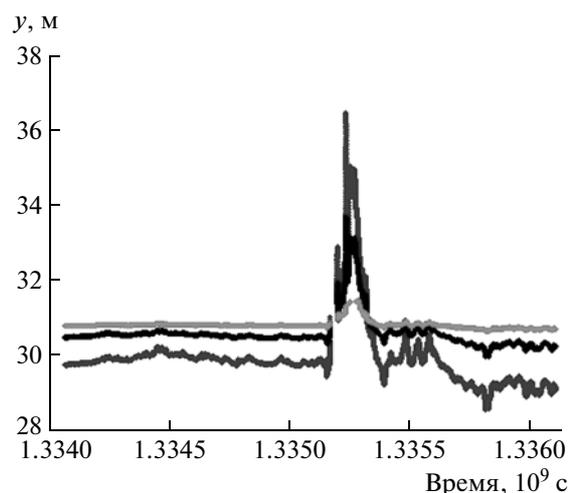


Рис. 5. Зависимость от времени y -координат маяков-ответчиков № 2, № 3 и № 5.

сравнительно невысокой сложности вычислений. При длине базовой линии от 40 до 140 м экспериментальная точность позиционирования маяков-ответчиков, находящихся в состоянии медленных перемещений на расстояниях до 420 м от донной антенны, имела порядок сантиметров (по среднеквадратическому отклонению).

За период с 6 апреля по 4 мая 2012 года системой позиционирования кластера 2012 года было выполнено более 65000 измерений местоположения каждого из объектов позиционирования и соответственно проведено такое же количество сеансов цифровой гидроакустической связи между станциями и объектами позиционирования (при номинальной скорости передачи цифровой информации 1 кбит/с). Полученные результаты подтверждают высокую надежность функционирования тестируемой д.б.с.п. и канала цифровой гидроакустической связи.

Описанная в статье архитектура протокола D-MAC обеспечивает гибкость и оперативность разработки специальных приложений для выполнения разнообразных подводных технических задач, требующих позиционирования подводных объектов и цифровой связи с ними.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК 16.518.11.7056, ГК 14.740.11.0890, П681, П878, П1146, Соглашение № 8706), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 11-02-00983, 11-02-12097, 11-02-00062, 12-02-10009, 12-02-00001), Научно-образовательного центра “Байкал”, Программы стратегического развития Иркутского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Balkanov V.A. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2009. V. 602. P. 227.
2. *Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Belolaptikov I.A. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2011. V. 626–627. P. 13.
3. *Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Belolaptikov I.A. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2011. V. 639. P. 30.
4. *Айнутдинов В.М., Балканов В.А., Белолептиков И.А. и др.* // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 6. С. 721.
5. *Kebkal O.* // Proceedings of the 4th International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. 20–24 June 2011, Kos, Greece. ISBN: 978-960-98883-5-6.
6. *Kebkal O., Komar M., Kebkal K. et al.* // Proceedings of the OCEAN 2011 IEEE Conference and Exhibition. 6–9 June 2011, Santander, Spain; <http://dx.doi.org/10.1109/Oceans-Spain.2011.6003549>
7. *Kinsey J.C., Eustice R.M., Whitcomb L.L.* // IFAC Proceedings of the Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft. Lisbon, Portugal. 2006. P. 1351.
8. *Tan Hwee-Pink, Diamant R., Winston K.G.S. et al.* // Ocean Engineering. 2011. V. 38. № 14–15. P. 1663.
9. *Chitre M., Shahabudeen S., Stojanovic M.* // Marine Technology Soc. J. 2011. V. 42. P. 103.
10. *Chen C.-T.* Reevaluation of Wilson's sound-speed measurements for pure water (Ph.D. Dissertation). University of Miami, Coral Gables, FL. 1977. P. 159.
11. *Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Balkanov V.A. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2009. V. 598. P. 282.
12. *Porter M.B., Bucker H.P.* // J. Acoustical Society of America. 1987. V. 82. P. 1349.
13. *Ameer P.M., Jacob L.* // Communications Letters. 2010. V. 14. № 10. P. 930.
14. *Thomas H.G.* // Proceedings of Autonomous Underwater Vehicles (AUV'98). 1998. P. 181.
15. *Othman A.K.* // Proc. of 5th IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN'08). 2008. P. 1.
16. *Isik M.T., Akan O.B.* // Wireless Communications. 2009. V. 8. № 9. P. 4457.
17. *Kebkal O.G.* // Proceedings of the OCEANS 2009 IEEE Conference and Exhibition. 11–14 May 2009, Bremen, Germany; <http://dx.doi.org/10.1109/Oceans.2009.5278150>
18. *Kebkal K.G., Bannasch R.* // J. Acoustical Society of America. 2002. V. 112. № 5. P. 2043.
19. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003.
20. *Kebkal O.G., Kebkal K.G., Bannasch R.* // Proceedings of the OCEANS 2012 IEEE Conference and Exhibition. 21–24 May 2012, Yeosu, Korea; <http://dx.doi.org/10.1109/Oceans-Yeosu.2012.6263529>
21. *Ramezani H., Geert L.* // Sensors. 2012. V. 12. № 3. P. 2996.